

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖRT TEKERDEN TAHRİKLİ VE DÖRT TEKERDEN YÖNELİMLİ
MOBİL MANİPÜLATÖR SİSTEMİNİN
ELEKTRİKSEL TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Bilge GÜROL**

Anabilim Dalı : DİSİPLİNLERARASI

Programı : MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2007

**DÖRT TEKERDEN TAHRİKLİ VE DÖRT TEKERDEN YÖNELİMLİ
MOBİL MANİPÜLATÖR SİSTEMİNİN
ELEKTRİKSEL TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Bilge GÜROL
(518031005)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Aralık 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Ocak 2007**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hakan TEMELTAŞ
Diğer Jüri Üyeleri Doç. Dr. Mehmet Turan SÖYLEMEZ (İ.T.Ü.)
Doç. Dr. Ata MUĞAN (İ.T.Ü.)**

OCAK 2007

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca, her konuda tecrübeleri ile yol gösteren ve desteklerini esirgemeyen, değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Hakan TEMELTAŞ ve Sayın Dr. S. Murat YEŞİLOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2006

Bilge GÜROL

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. MOBİL ROBOTUN KİNEMATİK MODELİ	3
3. MOBİL MANİPÜLATÖRÜN MEKANİK YAPISI	11
3.1. Taşıyıcı Gövde	12
3.2. Taşıyıcı Kol	13
3.3. Tahrik Sistemi	14
3.4. Tekerlek	18
4. MOBİL MANİPÜLATÖRÜN ELEKTRİKSEL DONANIMI	20
4.1. Elektriksel Güç Sistemi	20
4.1.1. Akü Grubu	20
4.1.2. Güç Dağılımı	21
4.1.3. Yarı-İletken Röleler	22
4.1.4. DC-DC Çeviriciler	22
4.2. Servo Motorlar ve Servo Sürücüler	25
4.2.1. Servo Motorlar	25
4.2.1.1. Tahrik Motorları	26
4.2.1.2. Yönlendirme Motorları	30
4.2.2. Servo Motor Sürücüleri	32
4.2.2.1. Sürücülerin Haberleşme Arabirimleri	34
4.2.2.2. Sayısal Giriş ve Çıkışlar	37
4.2.2.3. Analog Girişler	40
4.2.2.4. Enkoder Çıkışları	41
4.2.3. Sürücü Ayarları	42
4.3. Motor Kontrol Kartı	51
4.3.1. Kontrol Modülleri	53
4.3.2. Hareket Kontrol Sistemi	56
4.4. Kontrol Bilgisayar Sistemi	57
4.4.1. Endüstriyel Anakart	58
4.4.2. İşlemci Kartı	59
5. SONUÇLAR	61

KAYNAKLAR	63
EK A	65
ÖZGEÇMİŞ	68

KISALTMALAR

4WS	: Four-Wheel-Steer
4WD	: Four-Wheel-Drive
ATA	: Advanced Technology Attachment
COM	: Common
CCW	: Counterclockwise
CW	: Clockwise
DSP	: Digital Signal Processor
GND	: Ground
ICR	: Instantaneous Center of Rotation
IDE	: Integrated Drive Electronics
INS	: Inertial Navigation System
ISA	: Industri Standart Architecture
LED	: Light-Emitting Diode
MIPS	: Millions of Instructions Per Second
PCI	: Peripheral Component Interconnect
PICMG	: PCI Industrial Computer Manufacturers Group
PLC	: Programmable Logic Controller
PWM	: Pulse Width Modulation
RAM	: Random Access Memory
RISC	: Reduced Instruction Set Computer
USB	: Universal Serial Bus
VGA	: Video Graphics Array
VHDCI	: Very High Density Cable Interconnect

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1 : Tahrik motorlarının genel özellikleri	26
Tablo 4.2 : Tahrik motorlarının detaylı özellikleri.....	27
Tablo 4.3 : Motor komutasyonu ve hall-etkisi sensör çıkışları	28
Tablo 4.4 : Motor fazlarının renk kodları.....	29
Tablo 4.5 : Enkoder ve hall-etkisi sensörü konnektörü pin karşılıkları	30
Tablo 4.6 : Yönlendirme motorlarının genel özellikleri	30
Tablo 4.7 : Yönlendirme motorlarının elektriksel parametreleri	31
Tablo 4.8 : Modülün kart üzerindeki konumuna bağlı olarak kullanılan konnektör	53

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1 : Robot kolun tabanından uç noktasına doğru grafiksel gösterimi.....	3
Şekil 2.2 : Ağaç topolojisi gösterimi.....	4
Şekil 2.3 : Kapalı kinematik zincir topolojisi gösterimi	4
Şekil 2.4 : Taşıyıcı kolun ve tekerleğin, robot kol şeklinde modellenmesi	5
Şekil 2.5 : Taşıyıcı kol eksen takımlarının gösterimi.....	6
Şekil 2.6 : Tekerlek ötelemesinin, dönme açısına bağlı gösterimi.....	7
Şekil 2.7 : Mobil robot taşıyıcı kollarının birleşme noktasının gösterimi.....	9
Şekil 3.1 : Mobil manipülatör; a) katı modeli, b) uygulaması	11
Şekil 3.2 : Mobil robotun temel bileşenleri.....	11
Şekil 3.3 : Akü ve Mitsubishi PA-10 robot kolun sistemdeki yerleri	12
Şekil 3.4 : Mobil robotun elektriksel donanımının yerleştirilmesi; a) katı model üzerinde gösterim, b) gerçek konumlar	12
Şekil 3.5 : Taşıyıcı gövde katı modeli.....	13
Şekil 3.6 : Taşıyıcı gövdenin yapısal analizi.....	13
Şekil 3.7 : Taşıyıcı kol katı modeli	14
Şekil 3.8 : Tahrik sistemi; a) katı modeli, b) uygulaması	14
Şekil 3.9 : Tahrik sisteminde kullanılan redüktörler	15
Şekil 3.10 : Redüktör genel görünüşü ve detayı	15
Şekil 3.11 : Dalgalı dişli mekanizması; a) genel görünüş b) kesit görünüşü	16
Şekil 3.12 : Dalgalı dişli mekanizması detay; a) temel elemanları, b) genel yerleşimi.....	16
Şekil 3.13 : Dalgalı dişli mekanizması çalışma prensibi.....	17
Şekil 3.14 : Tekerlek yapısı; a) katı modeli, b) malzeme yapısı, c) uygulaması	19
Şekil 4.1 : Akü grubu	20
Şekil 4.2 : Akü deşarj karakteristiği	21
Şekil 4.3 : Akü bölmesinin robot üzerindeki konumu	21
Şekil 4.4 : Mobil manipülatör enerji dağıtım şeması	22
Şekil 4.5 : Sensör ve kontrol bilgisayarı için gerekli gerilim seviyeleri	23
Şekil 4.6 : DC-DC çeviricilerin güç ve gerilim değerleri	23
Şekil 4.7 : 150W@5V, 100W@5V ve 75W@3.3V modüllerden oluşan DC-DC çevirici grubu	24
Şekil 4.8 : 100W@24V ve 2 adet 100W@12V modüllerden oluşan DC-DC çevirici grubu	24
Şekil 4.9 : 2 adet 100W@15V modülden oluşan DC-DC çevirici grubu	24
Şekil 4.10 : Modüllerin yerleşimi	25
Şekil 4.11 : Yönlendirme ve tahrik motorlarının yerleşimi	25
Şekil 4.12 : Servo motorların kodlama sistemi	26
Şekil 4.13 : Tahrik motorlarının tork-hız karakteristiği	27
Şekil 4.14 : Tahrik motorlarının detay çizimleri	28
Şekil 4.15 : Motor güç kablosu ve konnektörü	28
Şekil 4.16 : Enkoder ve hall-etkisi sensör kablosu	29

Şekil 4.17 :	Enkoder ve hall-etkisi sensör konnektörü (motor tarafı)	29
Şekil 4.18 :	Enkoder ve hall-etkisi sensör konnektörü (sürücü tarafı)	29
Şekil 4.19 :	Yönlendirme motorlarının detay çizimi	31
Şekil 4.20 :	Yönlendirme motorlarının tork-hız karakteristiği	32
Şekil 4.21 :	Servo motor sürücüleri a) BLU100S b)BLU200S	32
Şekil 4.22 :	Sürücülerin blok şeması	33
Şekil 4.23 :	Sürücülerin bağlantı konnektörleri	34
Şekil 4.24 :	RS-232 bağlantı konnektörü	35
Şekil 4.25 :	RS-485 bağlantı klemensi	35
Şekil 4.26 :	RS-485 bağlantı tipi seçim pinlerinin sürücü üzerindeki konumu	35
Şekil 4.27 :	RS-485 haberleşmesinin 4-telli bağlantı şeması	36
Şekil 4.28 :	RS-485 haberleşmesinin 2-telli bağlantı şeması	36
Şekil 4.29 :	RS-485 bağlantı ayarları	37
Şekil 4.30 :	DB-25 konnektörüne bağlı giriş ve çıkışlar	38
Şekil 4.31 :	Yüksek hızlı sayısal girişlerin elektrik şeması	38
Şekil 4.32 :	Sayısal girişlerin elektrik şeması	39
Şekil 4.33 :	Sayısal çıkışların elektrik şeması	39
Şekil 4.34 :	Durum LED'lerinin hata sebebine karşılık yanıp-sönme sayıları	40
Şekil 4.35 :	Servo motor sürücülerin, hareket kontrol kartına bağlantı şeması	41
Şekil 4.36 :	Enkoder çıkışı ayarlaması	41
Şekil 4.37 :	Ayar programı sekmeleri ve butonları	42
Şekil 4.38 :	Sürücü modeli seçim menüsü	43
Şekil 4.39 :	Motor ve enkoder ayar sekmesi	44
Şekil 4.40 :	Sürücünün kullanılacağı mod seçimi sekmesi	45
Şekil 4.41 :	Kontrol sinyali seçenekleri	45
Şekil 4.42 :	Hız modunda yapılabilecek ayarlamalar	46
Şekil 4.43 :	Pozisyon modunda yapılabilecek ayarlamalar	47
Şekil 4.44 :	Sürücüye özgü çalışma modları	48
Şekil 4.45 :	Sürücü giriş – çıkış ayarları	48
Şekil 4.46 :	a) Limit anahtarının bağlantı şeması b) Limit sensörü bağlantı şeması	49
Şekil 4.47 :	Alarm geçmiş penceresi	49
Şekil 4.48 :	Kontrol parametreleri ayar penceresi	50
Şekil 4.49 :	Kontrol parametrelerini örnekleme ve izleme penceresi	50
Şekil 4.50 :	Sürücü ve motor durumunu gerçek zamanlı izleme penceresi	51
Şekil 4.51 :	Hareket kontrol ana kartı	52
Şekil 4.52 :	VHDCI konnektörler	53
Şekil 4.53 :	Servo motor kontrol modülü a) üstten görünüm b) alttan görünüm	54
Şekil 4.54 :	Kontrol modülünün analog çıkış devre şeması	54
Şekil 4.55 :	Pozitif ve negatif limitler ile başlangıç noktası sinyal giriş devre şeması	55
Şekil 4.56 :	Enkoder giriş devre şeması	55
Şekil 4.57 :	DCX-BF3XX-H klemens kartı	56
Şekil 4.58 :	Bir koldaki motor ve sürücülerin hareket kontrol sistemine bağlantısı	56
Şekil 4.59 :	Hareket kontrol sisteminin genel yapısı	57
Şekil 4.60 :	Endüstriyel anakart	58
Şekil 4.61 :	PCI köprü yapısı	58
Şekil 4.62 :	İşlemci kartı	59
Şekil 4.63 :	İşlemci kartının monitör, ethernet, klavye ve fare bağlantı portları	59
Şekil A.1 :	Bir robot kola ait vektörel ifadeler	65

SEMBOL LİSTESİ

${}^i\vec{h}_j$	: i nolu taşıyıcı koldaki j nolu eklemin dönme/öteleme eksen vektörü
$\vec{r}_i$	: i nolu taşıyıcı koldaki tekerin yarıçap vektörü
$\vec{d}_i$	: i nolu taşıyıcı koldaki tekerlek milini gösteren vektör
$\vec{l}_i$	: i nolu taşıyıcı kol uzunluğunu gösteren vektör
${}^i\vec{x}_j, {}^i\vec{y}_j, {}^i\vec{z}_j$	: i nolu taşıyıcı koldaki j nolu ekleme ilişkin eksen takımı
${}^i\vec{V}_j$	: i nolu taşıyıcı koldaki j nolu kolun uzaysal hız vektörü
${}^i\vec{\omega}_j$	: i nolu taşıyıcı koldaki j nolu kolun açısal hız vektörü
${}^i\vec{v}_j$	: i nolu taşıyıcı koldaki j nolu kolun çizgisel hız vektörü
${}^i\underline{V}$	: i nolu taşıyıcı kolun uzaysal hız matrisi
${}^i\mathbf{H}$	: i nolu taşıyıcı kol için rotasyon matrisi
${}^i\Phi$	: i nolu kol için yayılım matrisi
$\hat{r}$	: r vektörü ile vektörel çarpım işlemi
${}^i\dot{\underline{\phi}}$	: i nolu taşıyıcı kolun eklemlerinin dönme ve öteleme hız matrisi
${}^i\dot{\underline{\theta}}$	: i nolu taşıyıcı kolun eklemlerinin dönme hız matrisi
iJ	: i nolu taşıyıcı kol için Jacobian matrisi
J^*	: Jacobian matrisinin sanal tersi
$\tilde{J}$	: Jacobian matrisinin sıfır uzayı
iV_t	: i nolu taşıyıcı kolun uç noktasının hızı
$\vec{V}_C$	: Taşıyıcı kolların birleşme noktasının hızı

DÖRT TEKERDEN TAHRİKLİ VE DÖRT TEKERDEN YÖNELİMLİ MOBİL MANİPÜLATÖR SİSTEMİNİN ELEKTRİKSEL TASARIMI

ÖZET

Tekerlekli mobil sistemler, robotik alanında yapılan araştırmaların önemli konularından birini oluşturmaktadır. Farklı tekerlek yapılarına ve mekanik tasarıma sahip mobil robotlar geliştirilmekte ve incelenmektedir. Dört tekerden tahrikli ve dört tekerden yönelimli mobil robotlar, doksanlı yılların başından itibaren araştırmacıların ilgi alanına girmeye başlamıştır. Pahalı ve karmaşık olan bu tür sistemlerle ilgili çalışmaların birçoğu, simülasyon olarak yapılmaktadır. Bu durum, elde edilen sonuçların doğruluğunun, gerçek sistem üzerinde sınanamaması sonucunu doğurmaktadır.

Bu alanda görülen eksiklik doğrultusunda, yedi serbestlik dereceli Mitsubishi PA-10 robot kolunu taşıyacak, dört tekerden tahrikli ve dört tekerden yönelimli bir mobil platformun tasarımı yapılmıştır. Bu sayede mobil robotun hareket serbestliği ile Mitsubishi PA-10 robot kolunun manipülasyon kabiliyeti birleştirilerek, bir mobil manipülatör sistemi elde edilmiştir. Ayrıca, çoklu sensör yapısı sayesinde sisteme otonom çalışma imkanı kazandırılmıştır.

Tasarım aşamasının ardından, üretimi gerçekleştirilen mobil manipülatörün, çalışır duruma getirilebilmesi için gereken elektriksel tasarım, kurulum ve ayarlamalar bu çalışmanın temel amacını oluşturmaktadır. Mobil robotun elektriksel donanımı; güç sistemi, hareket kontrol sistemi ve kontrol bilgisayar sistemi olmak üzere üç ana başlık altında toplanmıştır. Bu sistemlerin uyumlu ve güvenli olarak çalışmasını sağlamak amacıyla, donanım bileşenlerinin elektriksel özellikleri ve çalışma prensipleri belirlenmiş ve uygulamaları yapılmıştır. Mobil robotun, belirlenen yörüngede hareket etmesini sağlayacak tekerlek açılarının ve hızlarının kontrolü için gerekli kinematik model, dinamik modelleme çalışmalarına temel hazırlayacak şekilde, kapalı kinematik zincir topolojisi temel alınarak ve uzaysal vektör cebri kullanılarak oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar incelenerek, yapılması gereken iyileştirmelere ilişkin öneriler sunulmuştur.

ELECTRICAL DESIGN OF FOUR-WHEEL-STEER AND FOUR-WHEEL-DRIVE MOBILE MANIPULATOR SYSTEM

SUMMARY

Wheeled mobile systems are one of the important research topics of robotics. Mobile robots in different wheel types and mechanical design have been developed and examined. Four-wheel-steer and four-wheel-drive (4WS/4WD) mobile robots have been studied since early 90's. Due to cost and complexity of these systems, research in this field is usually conducted using simulations. Hence, results obtained from such studies cannot be verified.

Because of the insufficient practical studies on this topic, it is decided to design a 4WS/4WD mobile platform which can operate with 7 DOF Mitsubishi PA-10 robot arm. By unifying manipulation capabilities of Mitsubishi PA-10 robot arm with movement freedom of mobile robot, a mobile manipulator system is obtained. This system also has the autonomous operation capability by the help of multiple sensors types.

Scope of this thesis is the design, setup and tuning of electrical systems of mobile manipulator. Electrical hardware of the mobile robot is divided into three sub-systems; power system, motion control system and main control system. Electrical properties and characteristics of hardware components are examined for cooperation and harmony of the so called systems. To control the steering and velocity of the wheels of the mobile robot to follow a defined path, kinematic model, which is based on close kinematic chain topology, is obtained by using spatial vector algebra. Also a dynamic model can be acquired for future studies based on this model. Finally, results are discussed and necessary developments are proposed.

1. GİRİŞ

Mobil robotlar, sensör ve motor teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak çeşitli şekillerde geliştirilmekte ve bu robotlar üzerine yapılan araştırmalar, her geçen gün çeşitlenerek artmaktadır. Tekerlekli mobil robotlar, tek tekerlekten oluşan yapılardan [1], çok tekerli ve vagonlu [2] sistemlere kadar geniş bir yelpazede gruplanabilmektedir. Bulardan, dört tekerden tahrikli ve dört tekerden yönelimli olan sistemler 4x4x4 araç olarak tanımlanmaktadır. Bu tezde incelenecek olan mobil robot da 4x4x4 bir sistemdir.

Dört tekeri bağımsız olarak yönlendirilebilen ve tahrik edilebilen sistemler üzerine yapılmış çalışmalara literatürde sıklıkla rastlamak mümkün değildir. Doksanlı yılların başında yapılan çalışmalar kinematik model üzerine yoğunlaşmıştır. Bu tür sistemlerin dinamik modellenmesi ve kontrolü üzerine ilk çalışmaları Makatchev ve diğ. yaptığı görülmektedir [3,4]. Tarımsal amaçlı geliştirilen benzer bir sistem kullanarak, holonomik olmayan sistemlerin dinamik modellenmesi ve kontrolü üzerine Sorensen'in çalışmaları bulunmaktadır [5-8]. Dört tekerli mobil robotların hassas navigasyonu üzerine He ve diğ. çalışma yapmışlardır [9]. Yapılan son çalışmalardan biri de Weingarten haritaları kullanarak manevra stratejileri oluşturma üzerine Yalçın ve diğ. araştırmalarını içermektedir [10]. Bilimsel çalışmaların dışında, askeri ve ticari amaçlı olarak geliştirilmiş birkaç model bulunmaktadır [11,12].

Bu tip sistemlerle ilgili çalışmalar genel olarak simülasyon biçiminde yapılmıştır. Karmaşık yapıdaki bu sistemler için elde edilen modellerin doğruluğu gerçek sistemler üzerinde kontrol etmek gerekmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalardaki eksiklikler fark edilmiş ve yapılacak araştırmaların gerçek bir sistem üzerinde denenip sonuçların incelenebilmesini sağlamak amacıyla; dört tekerden tahrikli ve dört tekerden yönelimli mobil robot ile yedi serbestlik dereceli Mitsubishi PA-10 robot kolu birleştirilerek, çoklu sensör yapılı otonom bir mobil manipülatör sistemi oluşturulmuştur.

Oluşturulan bu sistemin elektriksel donanımının güvenli ve uyumlu biçimde çalışır duruma getirilmesi bu çalışmanın temel amacıdır. Mobil manipülatör, bu amaçla, güç sistemi, hareket sistemi ve kontrol sistemi gibi alt sistemlere ayrılmıştır. Bu sistemleri oluşturan elemanların teknik özellikleri incelenerek, sorunsuz çalışmaları için gereken fiziksel bağlantı ve ayar işlemleri uygulanmıştır. Bu aşamalar, gelecekte mobil manipülatör üzerinde çalışacak araştırmacılara yardımcı olmak amacıyla mümkün olduğunca ayrıntılı biçimde açıklanmıştır.

Tezin bölümlerini kısaca özetlemek gerekirse: ikinci bölümde; mobil robotun kinematik modeli, uzaysal vektör cebri kullanılarak incelenmektedir. Üçüncü bölümde; mobil robotun mekanik tasarımını yapan Dal'ın tez çalışmasında [13] ayrıntılı olarak incelenen mobil robotun mekanik özellikleri, ana hatları ile özetlenmeye çalışılmıştır. Dördüncü bölümde; ana güç ve anahtarlama sistemi, servo motorlar ve sürücüler, hareket kontrol sistemi ve kontrol bilgisayar sistemleri fiziksel ve elektriksel olarak incelenmiş, kurulum ve ayar işlemleri için izlenen yollar anlatılmıştır. Çalışmada ulaşılan sonuçlar, elde edilen veriler sonuç bölümünde özetlenmiş ve gelecekte yapılabilecek çalışmalara ilişkin öneriler sunulmuştur.

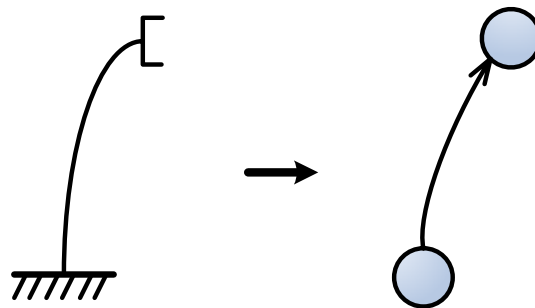
2. MOBİL ROBOTUN KİNEMATİK MODELİ

Bu bölümde dört tekerden tahrikli ve dört tekerden yönelimli mobil robotun kinematik modeli incelenecektir. Oluşturulan model, mobil robotun, belirlenen bir yolu istenen şekilde izlemesi için gerekli tekerlek açılarının ve hızlarının belirlenmesinde kullanılacaktır.

Mobil robotların kinematik modelleri, çoğunlukla anlık dönme merkezi (instantaneous center of rotation (ICR)) temel alınarak oluşturulmaktadır. Tekerlek açıları, izlenecek yörüngenin eğrilik yarıçapına bağlı olarak hesaplanmaktadır.

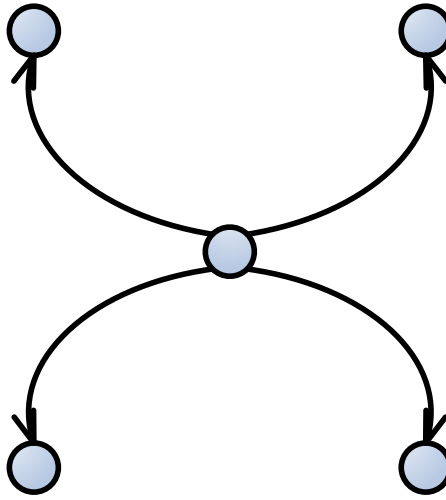
Bu bölümde, Yeşiloğlu'nun tezinde [14] uzaysal vektör cebri (spatial vector algebra) kullanılarak oluşturulmuş kinematik model incelenecektir. Uzaysal vektörler, rijit yapıların dinamik modellemesini ve analizini kolaylaştıran altı boyutlu vektörler olarak tanımlanabilir. Konunun anlaşılabilmesi için temel kavramlar Ek-A'da açıklanmaya çalışılmıştır. Uzaysal vektörlerin, robot dinamiği alanında kullanımı ve iteratif programlama üzerine detaylı bilgi için Rodriguez ve Jain'in çalışmaları incelenebilir [15-20].

Paralel kolların modellemesinde iki topoloji temel olarak alınabilir. Bunlar, kapalı kinematik zincir (closed-kinematic chain) ve ağaç (tree) topolojileridir. Paralel kollardan her biri Şekil 2.1'deki gibi, tabandan (base) uç (tip) noktasına yönelen ok olarak gösterilebilir.



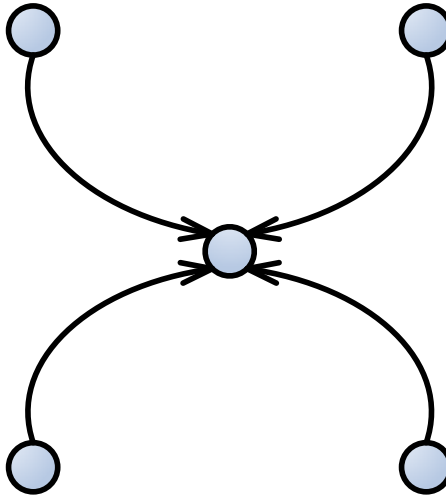
Şekil 2.1 : Robot kolun tabanından uç noktasına doğru grafiksel gösterimi

Ağaç topolojisinde, paralel kolların tabanları, tek noktada birleşmiş şekilde ve kollar dal şeklinde gösterilmektedir (Şekil 2.2).



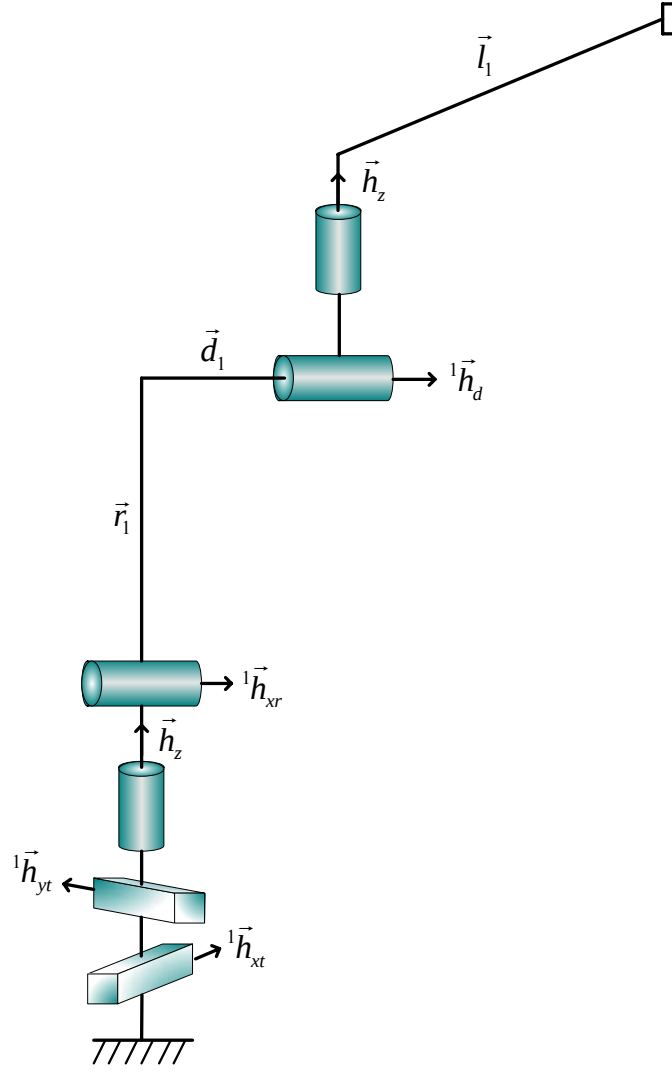
Şekil 2.2 : Ağaç topolojisi gösterimi

Kapalı kinematik zinciri topolojisinde ise paralel kolların uç noktaları tek bir noktada birleşmişlerdir (Şekil 2.3).



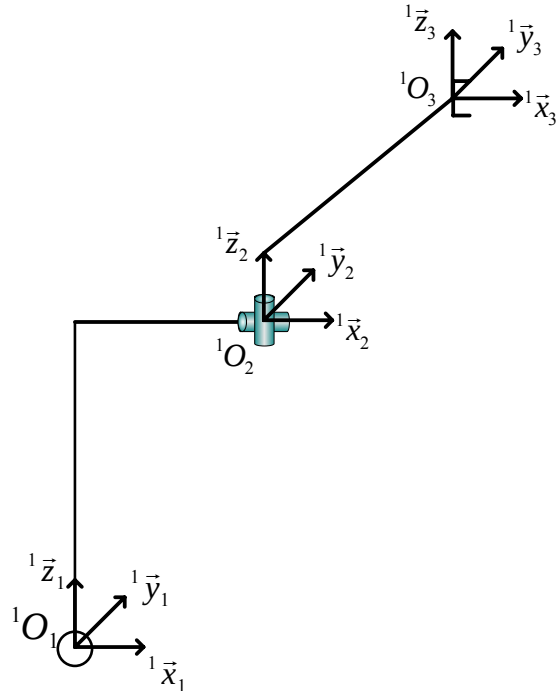
Şekil 2.3 : Kapalı kinematik zincir topolojisi gösterimi

Dört tekerden tahrikli ve dört tekerden yönelimli mobil robotun modellenmesinde kapalı kinematik zincir topolojisi temel alınacaktır. Mobil robot temel olarak, Bölüm 3'te anlatılan şekilde, taşıyıcı gövdeye bağlı dört adet taşıyıcı kol ve bunlara bağlı tekerleklerden oluşmaktadır. Her bir taşıyıcı kol, tekerlek temas noktası; taban ve taşıyıcı gövdeye bağlantı noktası; uç noktası olacak şekilde modellenmiştir (Şekil 2.4). Diğer kollar da benzer yapıda oldukları için, işlemler bir tanesinin üzerinde yapılıp, son aşamada tüm sistemin modeli oluşturulacaktır.



Şekil 2.4 : Taşıyıcı kolun ve tekerleğin, robot kol şeklinde modellenmesi

Tabandan itibaren ilk dört eklem, tekerlek ile yüzey arasındaki temas noktasını göstermektedirler. İlk iki eklem, prizmatik eklemlerdir ve temas noktasının ötelenme hareketini karşılamaktadırlar. Üç ve dördüncü eklemler ise teker yarıçap vektörünün, temas noktası etrafındaki dönme hareketini karşılamaktadır. Öteleme hareketi, dönme hareketine bağımlı olarak tanımlanabilmektedir. Beşinci ve altıncı eklemler bağımsız olup, tekerin dönme ve yönelim motorlarını göstermektedirler. Şekil 2.4'te gösterilen yapı, Şekil 2.5'te gösterilen eksen takımları ile gösterilebilir.



Şekil 2.5 : Taşıyıcı kol eksen takımlarının gösterimi

Birinci ve ikinci eklemler için oluşturulacak uzaysal hız vektörlerinden, genel hız matrisi elde edilecektir. Bu matrise, uç noktasının hız yayılım matrisi ile birleştirilerek, uç noktasının genel hız ifadesi elde edilecektir.

$${}^1\vec{V}_1 = \begin{bmatrix} {}^1\vec{\omega}_1 \\ {}^1\vec{v}_1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^6 \quad (2.1)$$

$${}^1\vec{V}_2 = \begin{bmatrix} {}^1\vec{\omega}_2 \\ {}^1\vec{v}_2 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^6 \quad (2.2)$$

$${}^1\underline{V} = \begin{bmatrix} {}^1\vec{V}_1 \\ {}^1\vec{V}_2 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{12} \quad (2.3)$$

Rotasyon matrisi, dönme eksenlerine bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$${}^1H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \vec{h}_z & {}^1\vec{h}_{xr} & 0 & 0 \\ {}^1\vec{h}_{xt} & {}^1\vec{h}_{yt} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & {}^1\vec{h}_d & {}^1\vec{h}_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

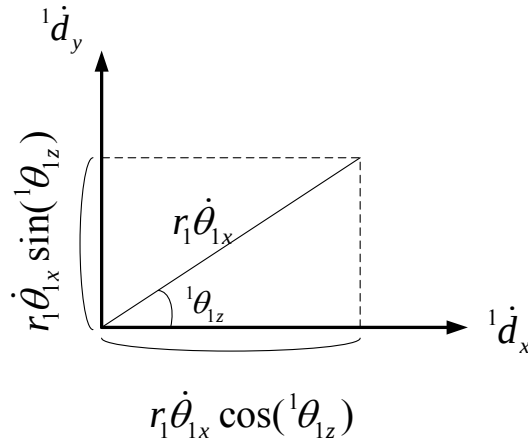
Hız yayılım matrisi aşağıdaki şekilde oluşturulabilir.

$${}^1\Phi = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ I & 0 & I & 0 \\ -\hat{r}_1 - \hat{d}_1 & I & 0 & I \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Dönme veya öteleme şeklindeki eklem değişkenleri, $\underline{\dot{\phi}}$ gibi bir matris ile tanımlanabilmektedir.

$$\underline{{}^1\dot{\phi}} = \begin{bmatrix} {}^1\dot{d}_x \\ {}^1\dot{d}_y \\ {}^1\dot{\theta}_{1z} \\ {}^1\dot{\theta}_{1x} \\ {}^1\dot{\theta}_d \\ {}^1\dot{\theta}_s \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Değme noktasındaki ötelemenin, dönme açılarına bağlı olarak değişimi Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6 : Tekerlek ötelemesinin, dönme açısına bağlı gösterimi

$${}^1\vec{\dot{d}} = r_1\dot{\theta}_{1x} {}^1\vec{y}_2 = r_1\dot{\theta}_{1x} {}^1\vec{y}_1 \quad (2.7)$$

(2.7)'deki eşitliklerden, öteleme vektörü aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir.

$${}^1\vec{\dot{d}} = \begin{bmatrix} {}^1\dot{d}_x \\ {}^1\dot{d}_y \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1\dot{\theta}_{1x} {}^1\vec{y}_{1x} \\ r_1\dot{\theta}_{1x} {}^1\vec{y}_{1y} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Buna göre $\underline{\dot{\phi}}$ matrisi, yalnızca açısal hızları içerecek şekilde (2.9)'daki gibi yazılabilir.

$$\underline{\dot{\phi}} = \begin{bmatrix} {}^1\dot{d}_x \\ {}^1\dot{d}_y \\ {}^1\dot{\theta}_{1z} \\ {}^1\dot{\theta}_{1x} \\ {}^1\dot{\theta}_d \\ {}^1\dot{\theta}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & r_1 {}^1y_{1x} & 0 & 0 \\ 0 & r_1 {}^1y_{1y} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} {}^1\dot{\theta}_{1z} \\ {}^1\dot{\theta}_{1x} \\ {}^1\dot{\theta}_d \\ {}^1\dot{\theta}_s \end{bmatrix}}_{{}^1\dot{\theta}} \quad (2.9)$$

Eklemler için hız ifadesi (2.10)'da görülen biçimde oluşturulur.

$$\underline{{}^1V} = {}^1\Phi {}^1H {}^1B {}^1\dot{\theta} \quad (2.10)$$

Tekerlek ile gövde arasındaki taşıyıcı kol için yayılım matrisi

$${}^1\Phi_{3,2} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ -\hat{l}_1 & I \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

kullanılarak, taşıyıcı kolun, uç noktası için yayılım matrisi (2.12)'deki gibi yazılır.

$${}^1\Phi_t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & -\hat{l}_1 & I \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

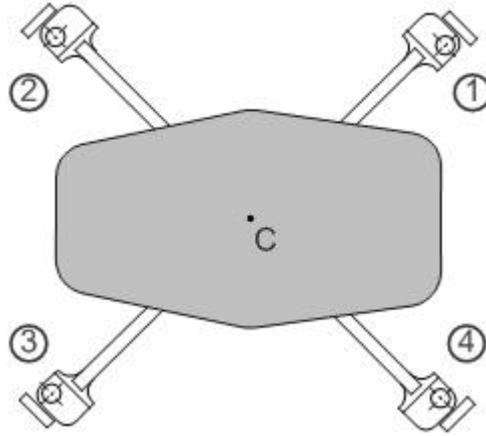
Uç noktası için hız ifadesi

$${}^1\vec{V}_t = \underbrace{{}^1\Phi_t {}^1\Phi {}^1H {}^1B}_{{}^1J} {}^1\dot{\theta} \quad (2.13)$$

biçiminde yazılabilir.

(2.13)'te görülen J matrisi Jacobian'dır. Genel anlamda Jacobian, eklem uzayından, çalışma uzayına geçiş sağlamaktadır.

Bir kol için hız ifadesi oluşturulduktan sonra, dört kolun uç noktalarının Şekil 2.7'de görülen C noktasında birleşmesinden oluşan paralel sistemin modeli yazılabilir.



Şekil 2.7 : Mobil robot taşıyıcı kollarının birleşme noktasının gösterimi [13]

Sistemi oluşturan dört manipülatöre ilişkin uç noktalarındaki hız ifadeleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\underline{V}_t = \begin{bmatrix} {}^1\vec{V}_t \\ {}^2\vec{V}_t \\ {}^3\vec{V}_t \\ {}^4\vec{V}_t \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Her bir kolun uç noktalarının, birleşme noktasındaki hızlarının eşitliği, sistemin kinematik kısıtıdır.

$${}^1\vec{V}_t = {}^2\vec{V}_t = {}^3\vec{V}_t = {}^4\vec{V}_t = \vec{V}_C \quad (2.15)$$

(2.15)'e göre, (2.14) düzenlenerek (2.16) elde edilir.

$$\underline{V}_t = \begin{bmatrix} {}^1\vec{V}_t \\ {}^2\vec{V}_t \\ {}^3\vec{V}_t \\ {}^4\vec{V}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{V}_C \\ \vec{V}_C \\ \vec{V}_C \\ \vec{V}_C \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} I \\ I \\ I \\ I \end{bmatrix}}_A \vec{V}_C \quad (2.16)$$

$\underline{V}_t$ matrisi, (2.13) kullanılarak aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$\underline{V}_t = \underbrace{\begin{bmatrix} {}^1\Phi_t {}^1\Phi {}^1H {}^1B & 0 & 0 & 0 \\ 0 & {}^2\Phi_t {}^2\Phi {}^2H {}^2B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & {}^3\Phi_t {}^3\Phi {}^3H {}^3B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & {}^4\Phi_t {}^4\Phi {}^4H {}^4B \end{bmatrix}}_J \underbrace{\begin{bmatrix} {}^1\dot{\underline{\theta}} \\ {}^2\dot{\underline{\theta}} \\ {}^3\dot{\underline{\theta}} \\ {}^4\dot{\underline{\theta}} \end{bmatrix}}_{\dot{\underline{\theta}}} \quad (2.17)$$

(2.17)'deki matrisleri açık halde aşağıdaki şekilde yazmak ve boyut analizi yapmak mümkündür.

$$\begin{bmatrix} {}^1V_t \\ {}^2V_t \\ {}^3V_t \\ {}^4V_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^1\Phi_t \\ {}^2\Phi_t \\ {}^3\Phi_t \\ {}^4\Phi_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1\Phi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & {}^2\Phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & {}^3\Phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & {}^4\Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1H & 0 & 0 & 0 \\ 0 & {}^2H & 0 & 0 \\ 0 & 0 & {}^3H & 0 \\ 0 & 0 & 0 & {}^4H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1B & 0 & 0 & 0 \\ 0 & {}^2B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & {}^3B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & {}^4B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1\dot{\underline{\theta}} \\ {}^2\dot{\underline{\theta}} \\ {}^3\dot{\underline{\theta}} \\ {}^4\dot{\underline{\theta}} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

(2.16) ve (2.17) denklemlerinden aşağıdaki eşitliğe ulaşılır.

$$J\dot{\underline{\theta}} = A\vec{V}_c \quad (2.19)$$

Eklem hızları, aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilmektedir.

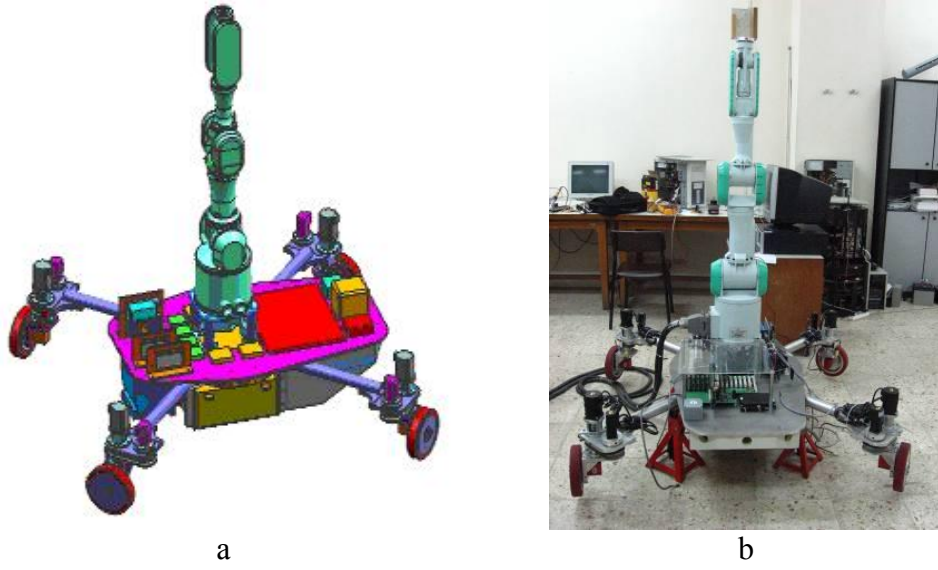
$$\dot{\underline{\theta}} = J^\dagger A\vec{V}_c + \tilde{J}\dot{\underline{\theta}}_s \quad (2.20)$$

(2.20)'deki $J^\dagger$, Jacobian matrisinin sanal tersi (pseudo-inverse), $\tilde{J}$ ise Jacobian'ın sıfır-uzay (nullspace, annihilator) matrisini göstermektedir. Jacobian ile sıfır uzay matrisi arasında bağıntı aşağıdaki gibidir.

$$J\tilde{J} = 0 \quad (2.21)$$

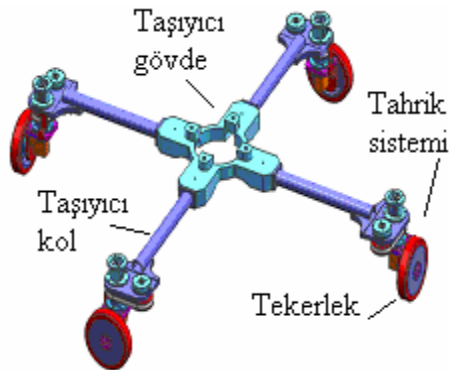
3. MOBİL MANİPÜLATÖRÜN MEKANİK YAPISI

Mobil platform, Mitsubishi PA-10 robot kolu ile beraber çalışacak şekilde tasarlanmış (Şekil 3.1a) ve çalışma sırasında oluşacak dinamik yüklere dayanacak şekilde üretilmiştir (Şekil 3.1b).



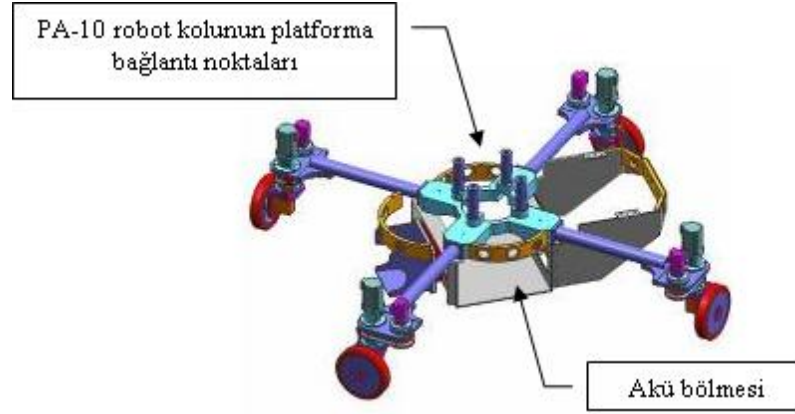
Şekil 3.1 : Mobil manipülatör; a) katı modeli, b) uygulaması [13]

Mobil robotun iskeletini, Şekil 3.2’de görüldüğü gibi; taşıyıcı gövde, taşıyıcı kollar, bu kollara bağlı tahrik mekanizmaları ile tekerlekler oluşturmaktadır.



Şekil 3.2 : Mobil robotun temel bileşenleri [13]

Sistemin en ağır bileşenlerinden olan akülerin ve Mitsubishi PA-10 robot kolunun platforma yerleştirilecekleri yerler, ağırlığın eşit olarak tekerlere dağıtılması amacıyla, ağırlık merkezi, mobil manipülatörün geometrik merkezi ile çakışacak şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 : Akü ve Mitsubishi PA-10 robot kolun sistemdeki yerleri [13]

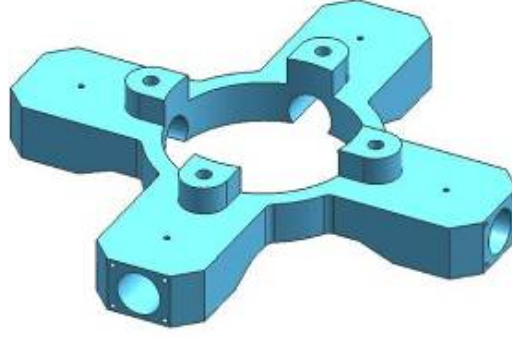
Mobil manipülatörün elektriksel donanımını oluşturan; güç sistemi bileşenleri, sürücüler, algılayıcılar ve kontrol bilgisayarı, platformun üst ve alt yüzeylerine uygun bağlantılarla konumlandırılmışlardır. (Şekil 3.4)



Şekil 3.4: Mobil robotun elektriksel donanımının yerleştirilmesi; a) katı model üzerinde gösterim, b) gerçek konumlar [13]

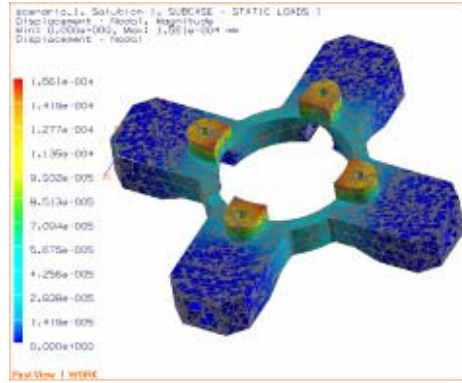
3.1 Taşıyıcı Gövde

Taşıyıcı gövde tasarımı sırasında, Mitsubishi PA-10 robot kolunun ve mobil robotun yaratacağı statik ve dinamik yükler açısından dayanıklılık, enerji tasarrufu bakımından hafiflik temel alınmıştır(Şekil 3.5).



Şekil 3.5 : Taşıyıcı gövde katı modeli [13]

Malzeme olarak; hafif, dayanıklı, kolay işlenebilir ve korozyona dayanıklı olduğu için uçak ve uzay sanayinde de kullanılan Al-7075 serisi sert alüminyum seçilmiştir. Birleşme noktalarında direnç kaynağı kullanımına, korozyon açısından, ark kaynağı kullanımına oranla daha uygun olan malzemenin, ayrıca eğilme mukavemeti de yüksektir.



Şekil 3.6: Taşıyıcı gövdenin yapısal analizi [13]

Kuvvet aktarımının yapıldığı ve gerilmenin arttığı bölgeler kalın tutulup, yapılan bilgisayar destekli tasarım işlemleri sonucu, yük taşıma özelliği olmayan bölgelere boşaltma işlemleri uygulanarak, gövde ağırlığı optimize edilmiştir (Şekil 3.6).

3.2 Taşıyıcı Kol

Taşıyıcı gövde; mobil robotun ağırlığını, dört adet taşıyıcı kol ile tekerleklerle aktarmaktadır (Şekil 3.7). Dış çapı 50 mm, et kalınlığı 8 mm olan taşıyıcı kollarda, gövde imalatında da kullanılan Al-7075 serisi sert alüminyum malzeme kullanılmıştır.



Şekil 3.7 : Taşıyıcı kol katı modeli [13]

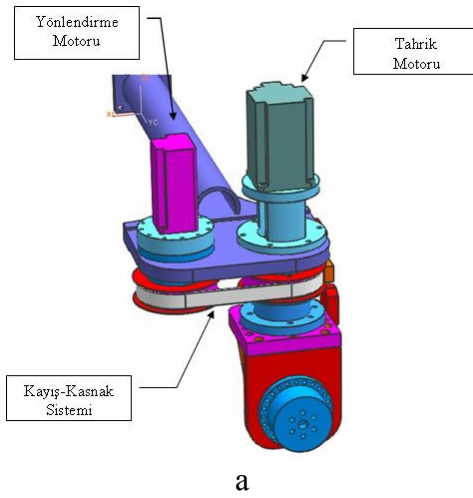
Taşıyıcı kollar; eğilme, burulma ve normal gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu sebeple eğilme yönündeki kesit alanı yüksek tutulmuştur.

Taşıyıcı kolların gövde ile birleştirildiği kısımlar tatlı sıklıkta geçecek şekilde tasarlanmıştır. Diğer uçta bulunan boşluklara, mobil robotun yönlendirmesi sırasında, tahrik motorunun kablo sarması problemini ortadan kaldırmak için, özel olarak tasarlanan sisteme uygun şekilde, motorlar yerleştirilmektedir.

Motorların yerleştirildiği bölmede mukavemeti artırmaya etkisi olmayan bölgeler yuvarlatılarak estetik bir görünüm sağlanmıştır.

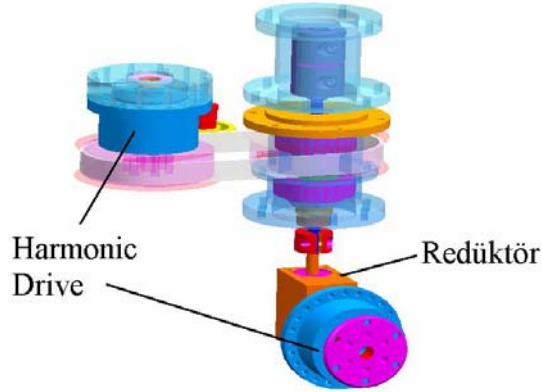
3.3 Tahrik Sistemi

Mobil robotun belirleyici özelliği olan; dört tekerin bağımsız yönlendirilmesi ve tahrik edilmesi işlemi ile ortaya çıkan, tahrik motorunun kablo sarma problemini çözmek amacıyla, özel bir tasarım yapılmıştır (Şekil 3.8).



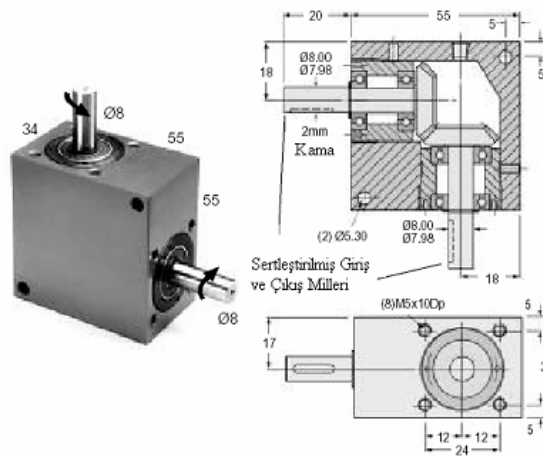
Şekil 3.8 : Tahrik sistemi; a) katı modeli, b) uygulaması [13]

Tahrik sisteminde kullanılan motorların nominal devir sayıları 3000 devirdir. Motorların milinden alınan tork değerinin, tekerin hareketini sağlayacak değerlere yükseltilmesi amacıyla Şekil 3.9’da görüldüğü gibi özel redüktörler kullanılmıştır.



Şekil 3.9 : Tahrik sisteminde kullanılan redüktörler [13]

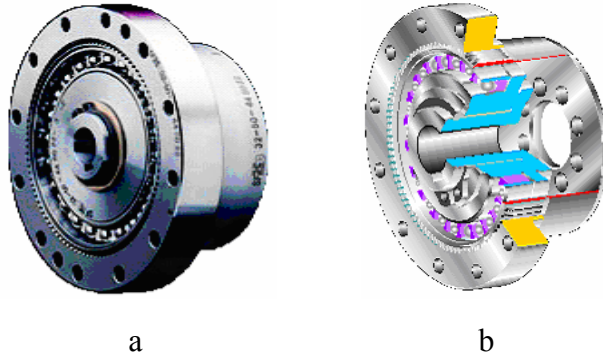
Tahrik motorunun sistemdeki konumuna bağlı olarak, teker dönme eksenini ile motor mili dönme eksenini arasında 90° açı bulunmaktadır. Bu durum motor milindeki hareketin tekere aktarılması için Şekil 3.10’da görülen redüktörü kullanmayı gerektirmiştir. Tahrik motorunun mili, bir uzatma mili ile 1:1 çevrim oranına sahip konik dişli bir redüktöre bağlanmıştır. Bu redüktörün görevi tahrik motorunun hareketini 90° çevirerek tekerleğe aktarmaktır.



Şekil 3.10 : Redüktör genel görünüşü ve detayı [13]

Tahrik motorunun milinden alınan hareket 90° çevrildikten sonra devir sayısını düşürüp buna bağlı olarak moment değerini yükseltecek redüktöre aktarılır. Bu redüktörün özelliği “harmonic drive” olarak bilinen dalgalı dişli mekanizmasına

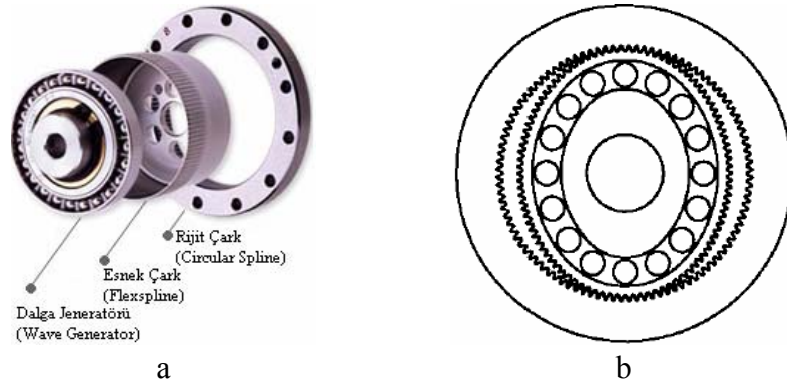
sahip olmasıdır (Şekil 3.11). Kullanılan redüktörün çevrim oranı 30:1 değerindedir ve dişli boşluğu bulunmamaktadır.



Şekil 3.11: Dalgalı dişli mekanizması; a) genel görünüş b) kesit görünüşü [13]

Dalgalı dişli mekanizmalarının patenti Dr.C. Walton Musser tarafından 1955 yılında ABD’de alınmıştır. Metallerin elastik dinamik özelliği kullanılarak geliştirilmiştir.

Temel bileşenleri Şekil 3.12a’da görüldüğü gibi, dalga üretici (wave generator), esnek çark (flexspline) ve rijit çark (circular spline) olarak sıralanabilir.



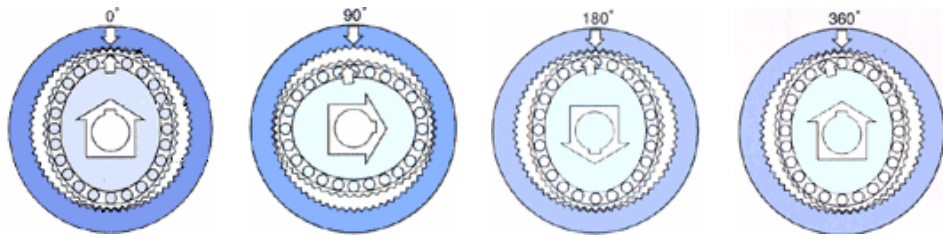
Şekil 3.12 : Dalgalı dişli mekanizması detayı; a) temel elemanları, b) genel yerleşimi

Dalga üretici; küçük bilyelerin, eliptik yapıdaki bir milin üzerine dizilmesi ile oluşur. Bu yapının karşıdan görünüşü Şekil 3.12b’deki gibidir. Elastik dış bilezik bilyelerle elastik deformasyon halindeyken, iç bilezik mile sabitlenmiştir. Dalga jeneratörünün genelde giriş miline bağlanması ile tork hareket üreticiden alınmış olur.

Esnek çark; dış yüzeyinde dişleri olan esnek bir kap yapısında olan metal kaskak bileşendir. Kabin arka kısmı diyafram olarak da adlandırılır ve genellikle çıkış miline bağlanır.

Rijit çark; iç yüzeyine diş açılmış rijit yapıda çelik bir halkadır. Rijit çark esnek çarkın diş sayısından iki adet fazla dişe sahip olup genelde bir çerçeveye sabitlenir.

Dalga jeneratörü, hareket üretici motor tarafından tahrik edildiğinde, esnek çarkta eliptik veya dalga benzeri yapıda hareket oluşturmaktadır. Bu hareket; esnek çarkın dış yüzeyindeki dişlerinin, sabit çarkın iç yüzeyindeki dişlerine geçmesini sağlar. Bu temas, mil merkezinden eşit uzaklıktaki iki noktanın, dönme halindeyken sürekli hareketiyle sağlanır. Bu hareket aynı zamanda dalga jeneratörünün en küçük eksenindeki iki noktadaki dişlerin birbirinden tamamen ayrılmasına olanak sağlar (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 : Dalgalı dişli mekanizması çalışma prensibi [13]

Esnek çarkın sahip olduğu diş sayısının sabit çarkkinden iki adet eksik olması ve dalga jeneratörünün eliptik yapısının tam dişli ayrılmasına olanak sağlaması; dalga jeneratörünün her bir tam turunda, esnek çarkın, sabit çarka göre iki diş yer değiştirmesine sebep olur. Bu yer değiştirme, dalga jeneratörünün dönüş yönüne her zaman ters yönde gerçekleşmektedir.

Örneğin; dalga jeneratörü, saat yönünde dönmesine karşın, esnek çark her turda iki diş ve saat yönüne ters yönde dönecektir.

Böylece, dalgalı dişli mekanizmasını oluşturan üç elemandan oluşan bu yapı, bir hız düşürücü yeteneğine sahip olur. Ana güç kaynağından, dalga jeneratörüne girilen yüksek hızdaki hareket, esnek çarkta yalnızca her dönüşte iki dişlik bir harekete sebep olacaktır. Bu hareket, dalga jeneratörüne göre yavaş ve ters yönlü bir harekettir.

Dalgalı dişli mekanizmasının çevrim oranı esnek çarktaki diş sayısı ikiye bölünerek bulunur. Örneğin sabit çark 202 dişe sahip olduğunda esnek çark 200 dişe sahip olsun. Bunun sonucundaki çevrim oranı da

$$200/(202-200)=100:1$$

(3.1)

olacaktır.

Kullanım alanları; işleme tezgahları, yüksek hızlı baskı operasyonları, robotik uygulamalar, uzay ve askeri uygulamalardır.

Mobil robot tekerleğinin düzlem üzerindeki yönünü belirlemek amacıyla, yönlendirme motorundan alınan hareket de Harmonic Drive markalı HFUC-17-30-2UH ürün koduna ve 30:1 çevrim oranına sahip redüktörle sisteme uygulanabilir hale getirilir.

Daha sonraki aşamada hareket farklı bir eksene aktarılmalıdır. Bunu sağlamak amacıyla dişli kayış sistemi kullanılmıştır.

T5 diş formuna sahip kayış, üzerine yine aynı formda diş açılmış iki dişli kasnak arasında güç iletimi sağlamaktadır. Bu dişli kayış sistemi sisteminde çevrim oranı

$$i_k = 1:1$$

(3.2)

olup herhangi bir devir düşümü yapılmamaktadır.

Tahrik eden dişli, ön yüzeyden dalgalı dişli mekanizmasına bağlanmış olup, tahrik edilen dişli ise kuvvet aktarım braketine sabitlenmiştir. Kuvvet aktarım braketi rulman bağlantı gövdesi etrafında iki adet konik rulman ile yataklanmıştır. Daha sonra ise hareketi tekerleğe aktarmak amacıyla tekerlek, üst adaptöre bağlanmıştır.

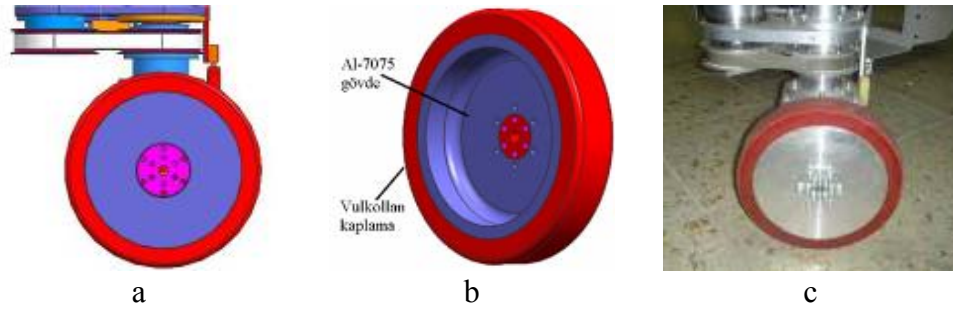
Dişli kayışın çalışmasından ötürü zamanla boyunda oluşacak uzamaları ve sonucunda doğacak boşluğu almak amacıyla, ayarlanabilir kayış gergi konstrüksiyonu kullanılmıştır.

3.4 Tekerlek

Mobil robotta kullanılan tekerlekler, gerekli tahrik momentini minimize edecek şekilde tasarlanmıştır.

Üzerlerine düşen yükleri karşılayabilmeleri için mümkün olduğunca sağlam ve basma yüzeyleri geniş bir yapıya sahiptirler. Çapı 200 mm. olan tekerler, Al-7075 sert alüminyum malzemeden üretilen gövde ile elastik kaplamadan oluşmaktadırlar (Şekil 3.14).

Mobil robotun hareketi sırasında oluşabilecek kayma durumlarını önlemek amacıyla kaplama malzemesi uygun sertlik ve sürtünme katsayısına sahip olmalıdır. Ayrıca büyük yüklere maruz kaldıklarında deforme olmamaları için yüksek dayanıma ve dinamik özelliklere sahip olmalıdır. Oluşacak eksenel yüklere karşı dayanıklılık sağlamak amacıyla malzemenin sert alüminyum ile birleştirme işlemi döküm yöntemi kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.14 : Tekerlek yapısı; a) katı modeli, b) malzeme yapısı, c) uygulaması [13]

Yukarıda belirtilen şartları sağlamasından ötürü, ağır yük taşımada kullanılan araçlar ile forklift araçlarında da geniş kullanım alanı bulan Vulkollan malzeme, teker kaplaması olarak seçilmiştir.

Düşük hızda yüksek deformasyon veya yüksek hızda düşük deformasyon sebepli yüksek dinamik taşımalar, elastik kaplamada ısı oluşmasına neden olur. Bu da yük taşıma özelliğini bozar. Vulkollan bir poliüretan elastomeridir ve elastomerlerin sahip olduğu sönümleme özelliğinden dolayı hareket sırasında oluşan ısı düşüktür.

Mobil robotun hareketsiz kaldığı sürelerde, ağırlıktan ötürü, tekerlerin basma yüzeylerinde sertleşme ve deformasyon oluşması, mobil robotun hareketlerini zorlaştırabilir. Kullanılan elastik kaplamanın sürekli deformasyona dayanımı fazla olduğu için bu durumun önüne geçilmiştir.

Vulkollan, malzemenin sertlik değeri 93 shore'dur. Tekerlek üzerine kaplanmış malzemenin laboratuvar zeminindeki (seramik kaplama) harekete başlama sırasındaki ve hareket sırasındaki ortalama yuvarlanma dirençleri aşağıdaki gibidir.

$$\mu_{byd} = 0.011 \sim 0.014 \quad (3.3)$$

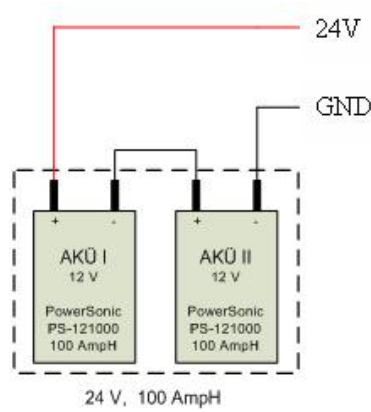
$$\mu_{hyd} = 0.008 \sim 0.009 \quad (3.4)$$

4. MOBİL MANİPÜLATÖRÜN ELEKTRİKSEL DONANIMI

4.1 Elektriksel Güç Sistemi

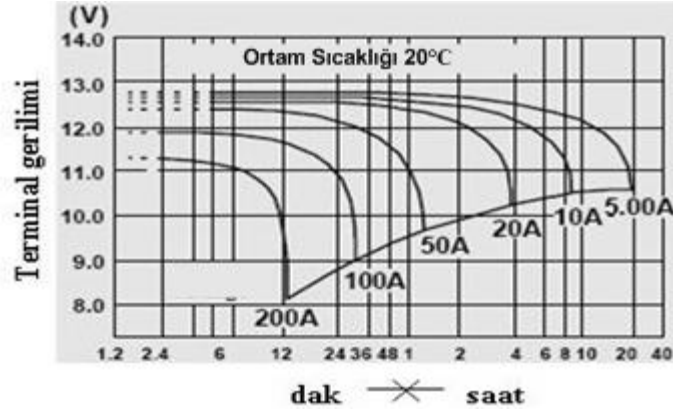
Mobil robotun tahrik sisteminin ve algılayıcılar ile kontrol bilgisayarının çalışması için gerekli enerji, iki adet akünün seri olarak bağlanması ile oluşturulan akü grubundan sağlanmaktadır. Elde edilen 24V'luk gerilim seviyesi yarı iletken röleler yardımı ile hareket ve kontrol sistemlerine dağıtılmaktadır.

4.1.1 Akü Grubu



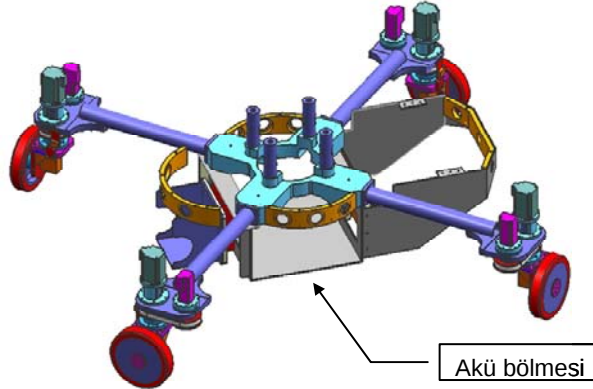
Şekil 4.1 : Akü grubu

İki adet 12V, 100Ah değerinde akü Şekil 4.1’de gösterildiği gibi seri bağlanarak 24V’luk gerilim sağlayan akü grubu oluşturulmuştur. Aküler, Powersonic firması tarafından üretilmişlerdir. En yüksek deşarj akımı 300A olan aküler, 100A’lık akımı 30 dakika boyunca sağlayabilme kapasitesine sahiptir (Şekil 4.2). En düşük 10.5V gerilime kadar deşarj edilebilen aküler, akım 30A ile sınırlandırılarak 14.4~14.7V arasında gerilim uygulanarak şarj edilebilmektedir. Boşta gerilimi 13.5~13.8V değerini geçmeyecek şekilde sabit gerilim uygulanarak sürekli şarj halinde tutulabilirler.



Şekil 4.2 : Akü deşarj karakteristiği [21]

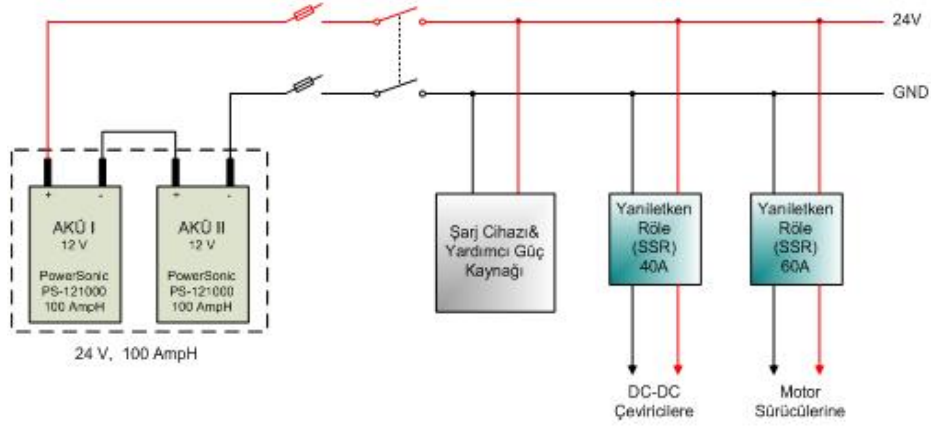
İki akü, toplamda 62 kg'lık ağırlık ile Mitsubishi PA-10 robot kolundan sonra, mobil manipülatör sisteminin, ikinci en ağır bileşenini oluşturmaktadır. Sistemin ağırlık merkezini, geometrik merkez eksenine yaklaştırmak için aküler, Şekil 4.3'de görülen bölmeye yerleştirilmiştir. Ayrıca, bu şekilde, ağırlık merkezi yere mümkün olduğunca yaklaştırılarak, mobil robotun dönme hareketi sırasındaki denge ve kararlılığı artırılmıştır.



Şekil 4.3 : Akü bölmesinin robot üzerindeki konumu [13]

4.1.2 Güç Dağılımı

Akülerden elde edilen güç, Şekil 4.4'te gösterildiği gibi iki ana koldan mobil manipülatör sistemine dağıtılır. Kollardan birisi herhangi bir gerilim değişimi yapılmadan yarı iletken röle yardımı ile servo motor sürücülere bağlanır. Tüm servo motorların, aynı anda nominal güç değerlerinde çalışmaları durumunda 1200W değerinde güce ihtiyaç vardır. Ancak tüm motorların en yüksek akım değerlerinde çalışmaları, fiziksel sebeplerden dolayı, gerçekleşmeyecek bir durumdur. Bu kolda kullanılan yarı-iletken röle 60A olarak seçilmiştir.



Şekil 4.4 : Mobil manipülatör enerji dağıtım şeması

Algılayıcılar ve kontrol sistemi için Şekil 4.5’de görüldüğü gibi 8 farklı gerilim seviyesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gerilim seviyelerini elde etmek amacıyla kullanılan DC-DC çeviricilerin, sisteme bağlantısı 40A’lık yarı-iletken röle ile ikinci kol üzerinden yapılmaktadır.

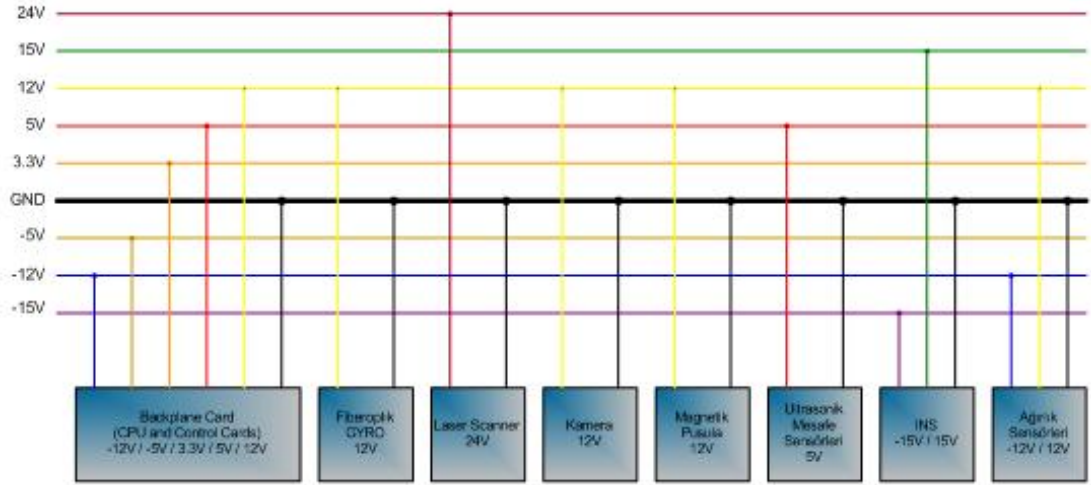
Boşalan aküleri şarj etmek ve ayrıca kontrol sistemini tek başına çalıştırmak için yardımcı bir güç kaynağı kullanılması planlanmaktadır. Yardımcı güç kaynağı sadece kontrol sistemini besleyecek güçte olduğu için, devreye girdiğinde, servo motor sürücüler, genel sistemden ayrılacaktır.

4.1.3 Yarı-İletken Röleler

Mobil manipülatör sisteminin, iki ana güç kolunun anahtarlama, yarı-iletken röleler ile yapılmaktadır. Çekilen güçlere bağlı olarak, servo motor ve sürücü sistemini besleyen kolda 60A, kontrol ve algılayıcı sistemini besleyen kolda da 40A’lık yarı-iletken röleler kullanılmaktadır (Şekil 4.4). Doğru akımı anahtarlama özelliğindeki bu röleler, 3.5~35V aralığında DC işaret ile kontrol edilebilmektedir.

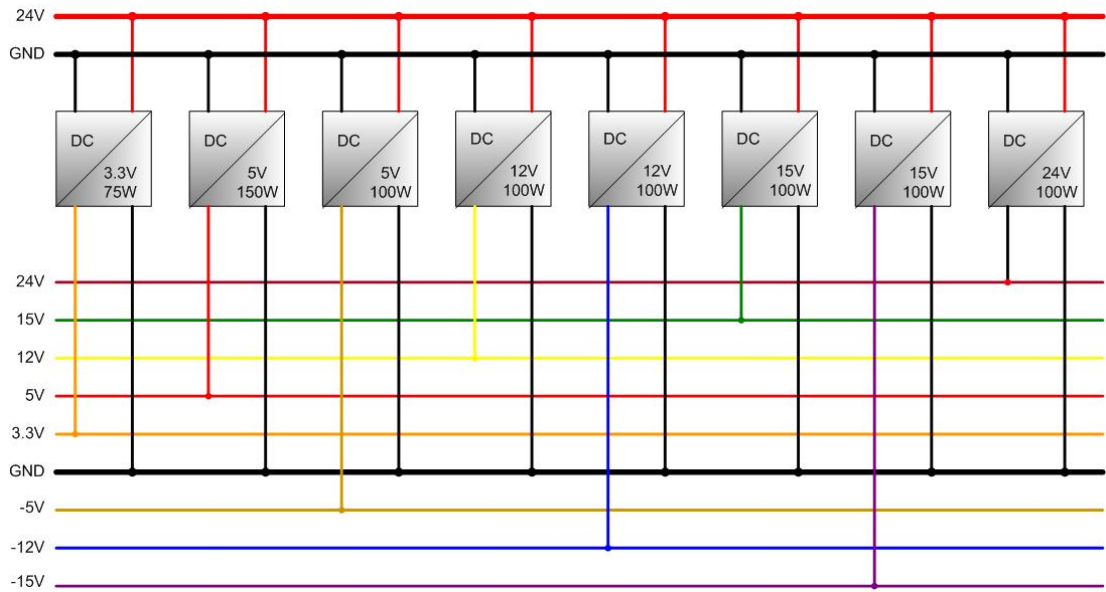
4.1.4 DC-DC Çeviriciler

Mobil manipülatör, enerjisini iki adet 12V akünün seri bağlanması ile oluşturulan 24V’luk sistemden almaktadır. Bu gerilim seviyesi motor sürücüler için gerekli olan değere karşılık gelmektedir. Ancak, manipülatör üzerinde bulunan, başta kontrol bilgisayarı olmak üzere diğer sensörler, farklı gerilim seviyelerine ihtiyaç duymaktadırlar (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 : Sensör ve kontrol bilgisayarı için gerekli gerilim seviyeleri

İhtiyaç duyulan gerilim seviyeleri Şekil 4.6’da görülen sekiz adet DC-DC çevirici kullanılarak elde edilmektedir. Bu çeviriciler Vicor firması tarafından üretilmişlerdir. İki adet üçlü ve bir adet ikili grup halinde toplam üç gruptan ibarettir.



Şekil 4.6 : DC-DC çeviricilerin güç ve gerilim değerleri

Birinci grup Şekil 4.7’de görüldüğü gibi 5V 150W’lık mini modül, 5V 100W ve 3.3V 75W’lık mikro modüllerden oluşmuştur. Kontrol bilgisayarı ve ultrasonik sensörlerin beslemesinde kullanılmaktadır.



Şekil 4.7: 150W@5V, 100W@5V ve 75W@3.3V modüllerden oluşan DC-DC çevirici grubu

İkinci grup bir adet 24V 100W mikro modül ve iki adet 12V 100W mikro modülden oluşmuştur (Şekil 4.8). Lazer tarayıcı ile kontrol bilgisayarının ihtiyaç duyduğu gerilim seviyelerini sağlamaktadır. Ayrıca fiberoptik gyro, manyetik pusula, kamera sistemi ve ağırlık algılayıcıları da bu gruptan beslenmektedirler.



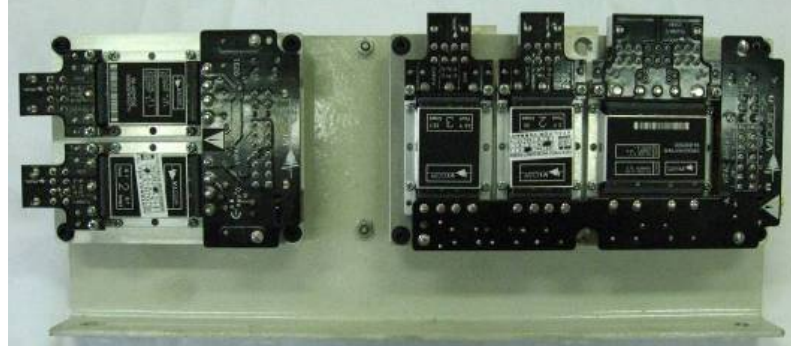
Şekil 4.8 : 100W@24V ve 2 adet 100W@12V modüllerden oluşan DC-DC çevirici grubu

Üçüncü grup iki adet 15V 100W mikro modülden oluşmaktadır (Şekil 4.9). INS birimi için gerekli enerji bu modüllerden sağlanmaktadır.



Şekil 4.9 : 2 adet 100W@15V modülden oluşan DC-DC çevirici grubu

Gruplar, alüminyum sac üzerine birinci ve üçüncü grup ön yüzde, ikinci grup arka yüzde olmak üzere Şekil 4.10’da gösterilen şekilde monte edilmiştir. Bu sac, mobil robot platformunun alt kısmında ayrılan bölüme yerleştirilmiştir.



Şekil 4.10 : Modüllerin yerleşimi

4.2 Servo Motorlar ve Servo Sürücüler

4.2.1 Servo Motorlar

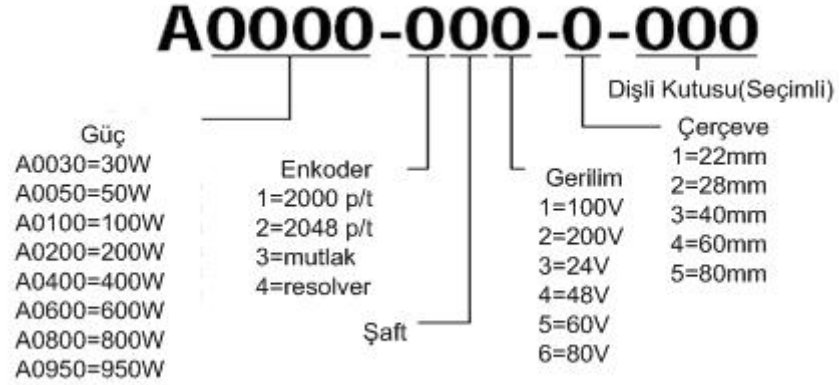
Bu projede, Applied Motion Products firmasının Alpha serisi fırçasız servo motorları kullanılmıştır. Her bir tekerin hareketi, biri tahrik, diğeri yönlendirme için kullanılan iki adet servo motor tarafından sağlanmaktadır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 : Yönlendirme ve tahrik motorlarının yerleşimi

Motorların özellikleri, etiketlerindeki kodlardan anlaşılabilir. Şekil 4.12’de bu motorların kodlama sistemi görülmektedir. A harfi ile başlayan rakam grubu motorun gücünü belirlemektedir. İkinci grup enkoder, şaft ve gerilim değerlerini belirlemede

kullanılmaktadır. Üçüncü grupta yer alan tek rakam motorun fiziksel büyüklüğü ile ilgilidir. Son grup ise seçime bağlı özellikleri ve dişli kutusu özelliklerini belirlemektedir.



Şekil 4.12 : Servo motorların kodlama sistemi

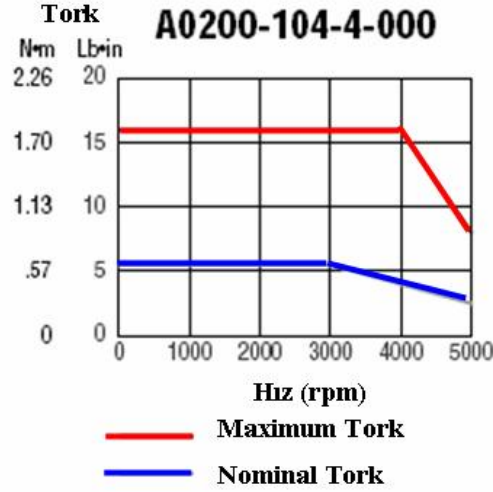
4.2.1.1 Tahrik Motorları

Kullanılan tahrik motorlarının genel özelliklerini “A0200 – 104 – 4 – 000” olan etiketlerinden hareketle Tablo 4.1’den görmek mümkündür.

Tablo 4.1 : Tahrik motorlarının genel özellikleri

Motor Gücü	200W
Enkoder Tipi	2000 çizgi/tur
Şaft Tipi	Dairesel
Gerilim Seviyesi	48V
Kalıp Boyutu	60mm

Motorların elektriksel özelliklerinin ayrıntıları Tablo 4.2’de gösterilmiştir. 200W değerindeki bu motorların nominal devri 3000 d/dak’dır. 48V değerine kadar gerilimlerde kullanılabilen motorların çektiği nominal akım değeri 6.7 A’dır. Her bir motor yaklaşık 2.5 kg. ağırlıktadır.



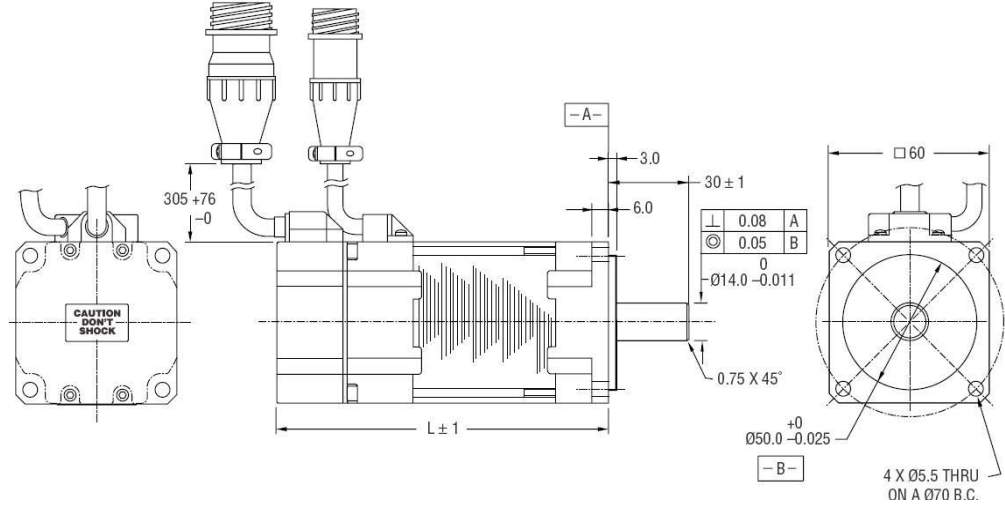
Şekil 4.13 : Tahrik motorlarının tork-hız karakteristiği

Nominal tork değeri 0.64 Nm olan motorlardan, kısa süreli olarak, en fazla 1.9 Nm moment elde edilebilir (Şekil 4.13).

Tablo 4.2 : Tahrik motorlarının detaylı özellikleri [23]

Kalıp Boyutu (mm)			60 mm	
Parça Numarası			A0200-104-4-000	
Gerilim	V		48	
Çıkış Gücü	W		200	
Maximum Hız	rpm		5,000	
Nominal Hızı	rpm		3,000	
Nominal Tork	N.m.	lb-in	0.64	5.66
Maximum Tork (@3x Nominal Akım)	N.m.	lb-in	1.91	16.9
KT Tork Sabiti	N.m./A	lb-in/A	0.095	0.84
KE Gerilim Sabiti	V/krpm		10.0	
Sargı Direnci	ohm		.37	
Sargı Endüktansı	mH		1.10	
Nominal Akım	A		6.7	
Rotor Eylemsizliği	g-cm ²	oz-in-sec ²	200	2.83 x E-3
Max. Sargı Sıcaklığı			Class B (130° C)	
Sürtünme Torku (max)	N.m.	lb-in	0.04	0.35
Ağırlık (lbs)			2.42	
Faz Sayısı			3	
Kutup Sayısı			8	

Motorların yapısal özelliklerinin detayları Şekil 4.14’de gösterilmektedir. Enkoder bölmesi ile birlikte tahrik motorlarının uzunluğu 93mm’dir. 60x60 mm boyutlarında kare yapıdadırlar.



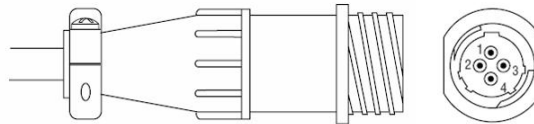
Şekil 4.14 : Tahrik motorlarının detay çizimleri [23]

Servo motor sürücüler, uygulanan kontrol sinyaline bağlı olarak, motorların istenen şekilde çalışmasını sağlayacak gerilimi Tablo 4.3’de belirtilen komutasyon şeklinde uygular. Hareket sonucunda, hall-etkisi sensörlerinde oluşan sinyaller Tablo 4.3’de gösterilmiştir.

Tablo 4.3 : Motor komutasyonu ve hall-etkisi sensör çıkışları

Adım Sırası	1	2	3	4	5	6	1
Motor Bağlantısı	A	+	+	-	-	-	+
	B	-	+	+	-	-	-
	C	-	-	+	+	-	-
Hall Sensör Çıkışı	U	0	+	1	1	1	0
	V	1	0	0	0	1	1
	W	1	1	1	0	0	1

Motor ile servo sürücü arasındaki güç bağlantısı dört iletkenli kablo ile yapılmaktadır. Kablonun motor tarafındaki bağlantısı endüstriyel konektör (Şekil 4.15), sürücü tarafındaki bağlantısı ise klemens vasıtasıyla yapılmaktadır.



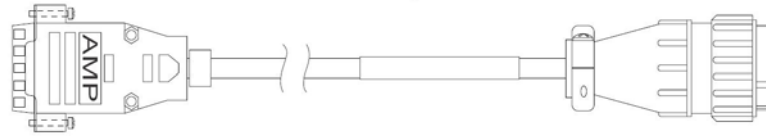
Şekil 4.15 : Motor güç kablosu ve konektörü [23]

Fazların ayırt edilebilmesi için Tablo 4.4’te gösterilen renklere kablolar kullanılmıştır.

Tablo 4.4 : Motor fazlarının renk kodları

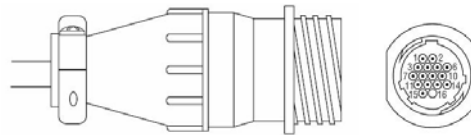
Pin #	Fonksiyon	Renk
1	A	Kırmızı
2	B	Beyaz
3	C	Siyah
4	GND	Yeşil

Motorlara entegre durumdaki enkoder ve hall-etkisi sensörlerinden alınan sinyallerin sürücülere gönderilmesi için Şekil 4.16’da görülen kablo kullanılmaktadır.

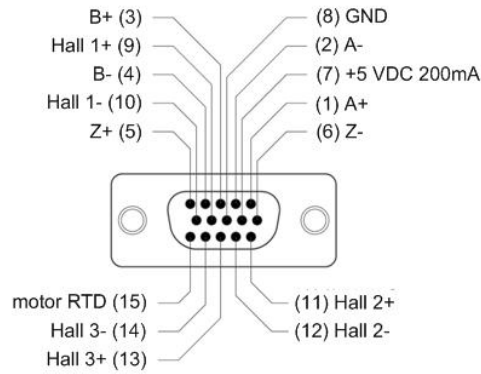


Şekil 4.16 : Enkoder ve hall-etkisi sensör kablosu [23]

Kablonun motor tarafında endüstriyel konnektör (Şekil 4.17), sürücü tarafında ise HD-15 konnektör (Şekil 4.18) bulunmaktadır.



Şekil 4.17 : Enkoder ve hall-etkisi sensör konnektörü (motor tarafı) [23]



Şekil 4.18 : Enkoder ve hall-etkisi sensör konnektörü (sürücü tarafı) [22]

Ayrıntıları Tablo 4.5’te görülen 15 iletkenli bu kablo üzerinden, aynı zamanda enkoderin beslemesi yapılmaktadır. Bu sayede dışarıdan beslemeye gerek kalmadan enkoder sinyallerinin hareket kontrol kartına taşınması mümkündür.

Tablo 4.5 : Enkoder ve hall-etkisi sensörü konnektörü pin karşılıkları

Pin #	Fonksiyon	Renk	Pin #	Fonksiyon	Renk
1	A+	Mavi	9	Hall 2+	Gri
2	A–	Mavi/Siyah	10	Hall 2–	Gri/Siyah
3	B+	Yeşil	11	Hall 3+	Beyaz
4	B–	Yeşil/Siyah	12	Hall 3–	Beyaz/Siyah
5	Index Z+	Sarı	13	+5V	Kırmızı
6	Index Z–	Sarı/Siyah	14	GND	Siyah
7	Hall 1+	Kahve	15	Ekran	Zırh
8	Hall 1–	Kahve/Siyah	16	N/C	N/C

4.2.1.2 Yönlendirme Motorları

Yönlendirme için gerekli güç değerleri tahrik sistemine oranla daha az olduğu için yine Alpha serisinden 100W değerindeki motorlardan “A100 – 104 – 3 - 000” kod numaralı motorlar seçilmiştir. Yönlendirme motorlarının genel özellikleri Tablo 4.6’da gösterilmiştir.

Tablo 4.6 : Yönlendirme motorlarının genel özellikleri

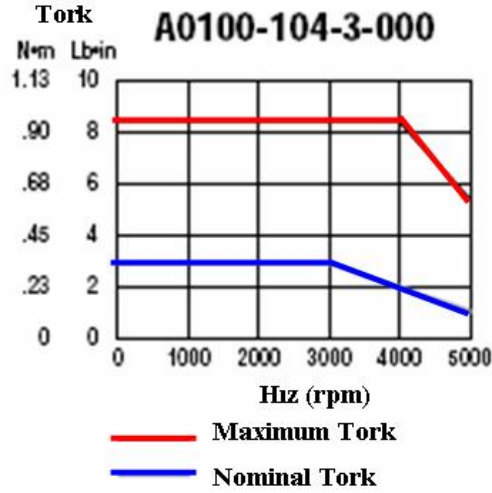
Motor Gücü	100W
Enkoder Tipi	2000 çizgi/tur
Şaft Tipi	Dairesel
Gerilim Seviyesi	48V
Kalıp Boyutu	40mm

Güç ve buna bağlı olarak, akım değerleri yaklaşık olarak tahrik motorlarının yarısı değerinde olan yönlendirme motorlarının elektriksel parametrelerinin ayrıntıları Tablo 4.7’den incelenebilir.

Kalıp Boyutu (mm)			40 mm	
Parça Numarası			A0100-104-3-000	
Gerilim	V		48	
Çıkış Gücü	W		100	
Maximum Hız	rpm		5,000	
Nominal Hızı	rpm		3,000	
Nominal Tork	N.m.	lb-in	0.318	2.81
Maximum Tork (@3x Nominal Akım)	N.m.	lb-in	0.95	8.41
KT Tork Sabiti	N.m. /A	lb-in /A	0.11	0.97
KE Gerilim Sabiti	V/krpm		11.7	
Sargı Direnci	Ohm		2.00	
Sargı Endüktansı	mH		2.60	
Nominal Akım	A		3	
Rotor Eylemsizliği	g-cm2	oz-in-sec2	42	5.95 x E-4
Max. Sargı Sıcaklığı			Class B (130° C)	
Sürtünme Torku (max)	N.m.	lb-in	0.03	0.27
Ağırlık (lbs)			1.10	
Faz Sayısı			3	
Kutup Sayısı			8	

[illegible]

Nominal devir değeri olan 3000 d/dak 'ya kadar 0.32 Nm tork elde edilebilen motorlar, en yüksek 0.95 Nm tork üretebilmektedirler (Şekil 4.20).



Şekil 4.20 : Yönlendirme motorlarının tork-hız karakteristiği

Yönlendirme motorları ile sürücüler arasındaki güç ve sensör kabloları ile konnektörler, tahrik motorları için kullanılan ve Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18’de gösterilen kablo ve konnektörlerin aynısıdır.

4.2.2 Servo Motor Sürücüleri

Projede, Applied Motion Products firmasının ürettiği BLU serisi servo motor sürücüleri kullanılmıştır. Tahrik motorları 200W gücünde olduklarından her biri için 200W değerinde BLU200S servo sürücü, yönlendirme motorları 100W gücünde oldukları için de 100W değerinde BLU100S servo sürücüler seçilmiştir (Şekil 4.21).



a

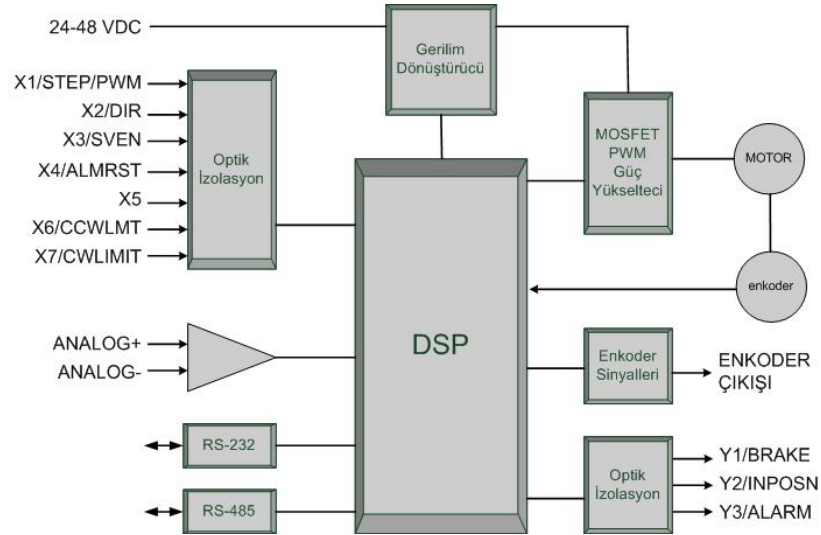


b

Şekil 4.21: Servo motor sürücüleri a) BLU100S b)BLU200S

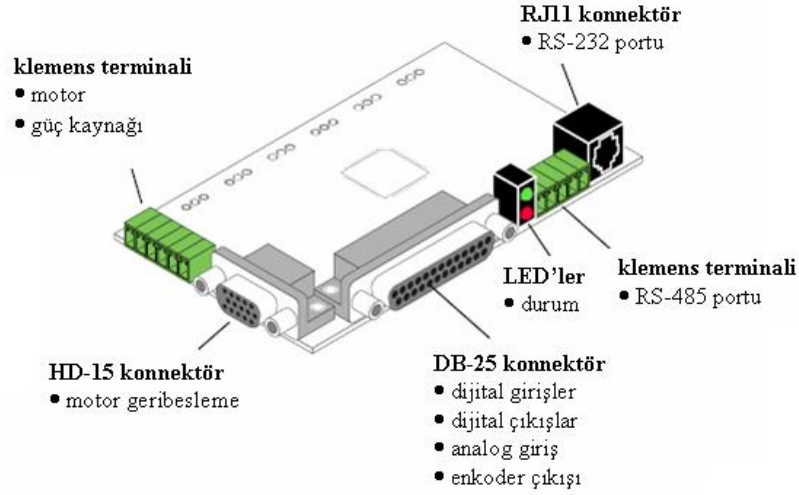
Sürücüler, güç katları haricinde, benzer elektronik yapıdadırlar. DSP tabanlı hibrid kontrolörün, yüksek hızda sinyal işleme yeteneği, sayısal giriş ve çıkış arabirimlerinin kullanımı ile tamamlanmaktadır. Şekil 4.22’deki blok şemasından

görüldüğü gibi, sürücüler hem analog, hem de sayısal sinyalleri kabul etmekte, ayrıca sayısal çıkış sinyalleri üretebilmektedir. RS-232 ve RS-485 arabirimleri ile bilgisayar veya benzer kontrol cihazları ile iletişim kurabilmektedir. 24~48 VDC aralığındaki giriş gerilimi, sürücünün ihtiyaç duyduğu seviyelere, sürücüye entegre bir dönüştürücü vasıtasıyla çevrilmektedir.



Şekil 4.22 : Sürücülerin blok şeması [22]

Servo motor sürücülerin; besleme, motor, enkoder ve bilgisayar bağlantı konnektörleri Şekil 4.23'te görülmektedir. Sürücü beslemesi ve motor güç bağlantıları aynı klemens terminali üzerinden yapılmaktadır. Dördü motor, ikisi sürücü besleme bağlantısı için olmak üzere altı klemens bulunmaktadır. Motorlara entegre, hall-etkisi sensörleri ile enkoderden alınan işaretlerin sürücüye aktarılması için HD-15 tipi dişi konnektör kullanılmıştır. Ayrıca, enkoder beslemesi de yine bu konnektör üzerinden yapılmaktadır. Sayısal giriş-çıkış ve analog giriş sinyalleri için DB-25 tipi dişi konnektör bulunmaktadır. Sürücünün, hareket kontrol sistemi ile birlikte çalışması gereken durumlarda, enkoder sinyallerinin hareket kontrol sistemine iletilmesi işlemi bu konnektörden yapılabilmektedir. RS-485 bağlantı konnektörü beş klemensli terminal yapıdadır. RS-232 bağlantısı ise RJ-11 tipi konnektör üzerinden sağlanmaktadır.



4.23 : Sürücülerin bağlantı konnektörleri [22]

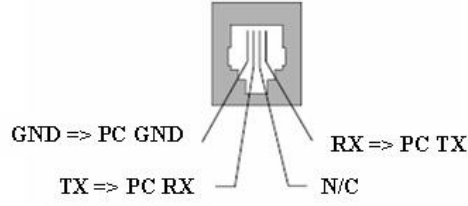
Sürücülerin genel özellikleri:

- Tork, hız veya pozisyon modunda çalışma özelliğine sahiptir.
- Analog veya sayısal kontrol sinyali uygulanabilir.
- RS-232 ve RS-485 arabirimleri kullanılarak gönderilen komutlarla çalışabilir.
- 100W için 4.5A ve 200W için 9A nominal akım kapasitesine sahiptir.
- Anlık 13.5A akım değerine dayanabilir.
- 24-48VDC aralığında çalışabilir.
- Yedi adet optik olarak izole edilmiş sayısal giriş uygulanabilir.
- Üç adet optik olarak izole edilmiş sayısal çıkış alınabilir.
- Hız ve tork kontrolü için +/-10V analog kontrol sinyali uygulanabilir.

4.2.2.1 Sürücülerin Haberleşme Arabirimleri

Sürücülerin bilgisayarla haberleşmesi RS-232 veya RS-485 arabirimlerinden biri kullanılarak yapılabilmektedir.

RS-232 portu RJ-11 konnektörü şeklinde tasarlanmıştır (Şekil 4.24). Sürücü ile birlikte gelen 2 metre kablo ile bağlantı yapılabilmektedir. Ancak gerekli olduğunda 15 metreyi geçmemek koşulu ile kablo uzatılabilmektedir.



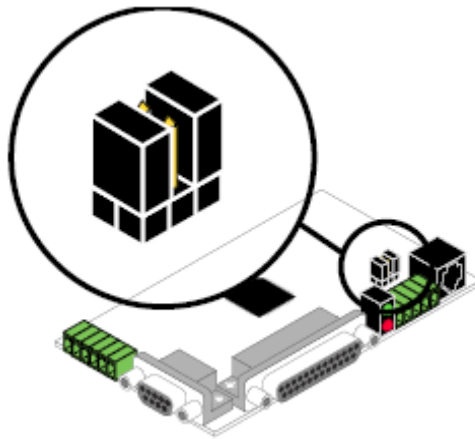
Şekil 4.24 : RS-232 bağlantı konnektörü [22]

RS-485 portu klemens terminali şeklinde tasarlanmıştır (Şekil 4.25). Bu arabirimin avantajı; bir bilgisayara birden çok (16'ya kadar) cihazın bağlanmasına imkân vermesidir. Ayrıca, haberleşme mesafesi, uygun kablolar ile 300 metreye kadar artırılabilir.



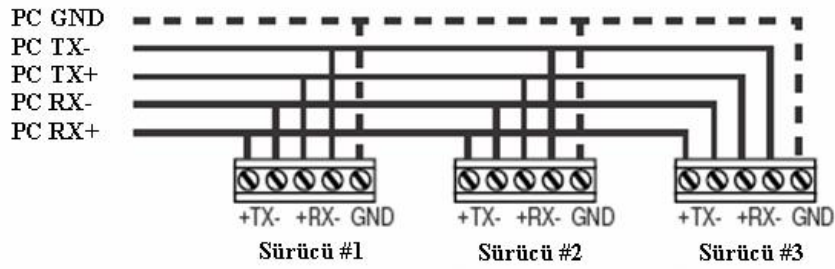
Şekil 4.25 : RS-485 bağlantı klemensi [22]

RS-485 haberleşmesi, 4 ve 2 telli bağlantı ile yapılabilir. 4 telli bağlantı, aynı zaman zarfında, hem veri göndermeye hem de veri almaya imkan verir (Full-Duplex). Sürücünün RS-485 portunun hemen arkasında bulunan ve Şekil 4.26'da görülebilen 6 pinli konnektör ile bağlantı tipi seçimi yapılmaktadır. Şekil 4.26'da görüldüğü gibi dıştaki pinler birleştirilirse 2-telli bağlantı seçilmiş olur (Half-Duplex). Bu bağlantılar kaldırıldığında 4-telli haberleşme mümkün olacaktır.



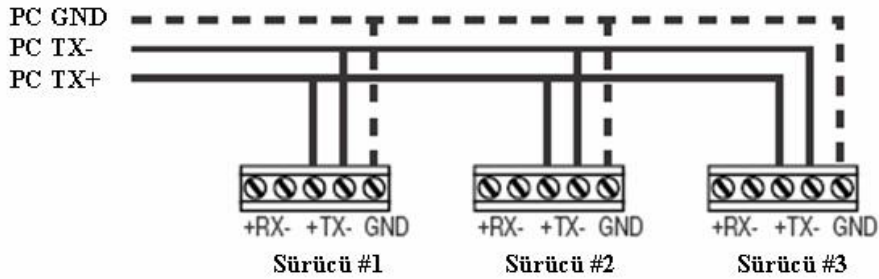
Şekil 4.26 : RS-485 bağlantı tipi seçim pinlerinin sürücü üzerindeki konumu

Şekil 4.27'deki bağlantı şemasından da görülebileceği gibi sürücüler 4-telli bağlantıya imkân vermektedir. Sürücü üzerindeki TX +/- terminalleri, bilgisayardaki RX +/- uçlarına, bilgisayardaki TX +/- uçları ise sürücüdeki RX +/- terminallerine bağlanmalıdır. Farklı güç kaynaklarından besleme yapılması durumunda ortak referans noktası sağlamak amacıyla bilgisayar ve sürücülerin GND bağlantılarını birleştirmek gereklidir. Sistemin aynı güç kaynağından beslenmesi durumunda GND bağlantısının yapılması zorunlu değildir.



Şekil 4.27 : RS-485 haberleşmesinin 4-telli bağlantı şeması

Sürücü aynı zamanda 2-telli bağlantı ile de bilgisayara bağlanabilir(Şekil 4.28). 2-telli bağlantı da ise aynı anda veri gönderim ve alımı mümkün değildir.

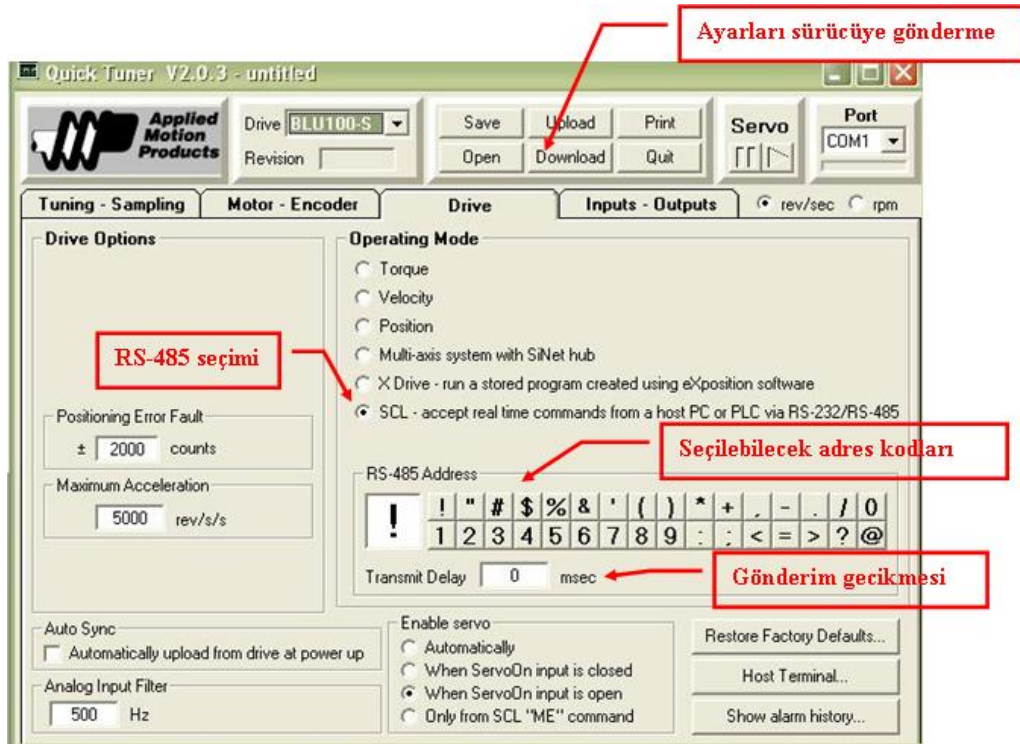


Şekil 4.28 : RS-485 haberleşmesinin 2-telli bağlantı şeması

Bu bağlantı türü seçildiğinde bazı sorunlar çıkabilmektedir. Bu sorunların kaynağı; bilgisayarın gönderdiği bir komutun ardından, sürücünün cevap vermeye başlamasından önce, bilgisayarın gönderici moddan çıkıp, alıcı durumuna hemen geçememesidir. Bu sorunu çözmek için sürücünün gönderim geciktirici (TD - transmit delay) komutu ile sürücünün veri göndermeye başlamadan önce, belirlenen sürede beklemesi sağlanmalıdır.

Kullanılacak bağlantı tipi seçildikten sonra, aynı hat üzerindeki her bir sürücüye, ayrı bir adres vermek gereklidir. Bu işlem her bir sürücü bilgisayara RS-232 portu üzerinden tek tek bağlanarak gerçekleştirilir. Fiziksel bağlantı kurulduktan sonra

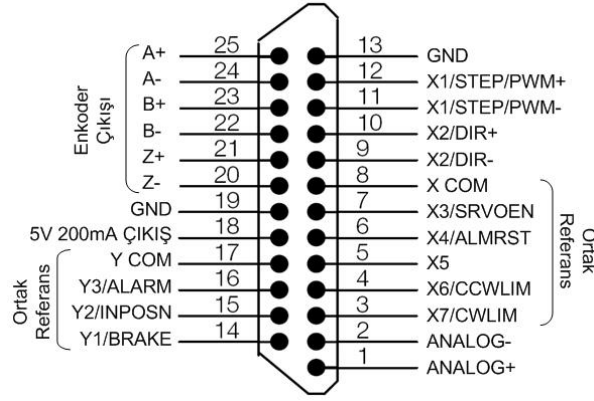
“Quick Tuner” sürücü ayar programı açılır ve bu işlemten sonra sürücüye enerji verilebilir. Şekil 4.29’da görüldüğü gibi programın “Drive” sürücü sekmesi açılır. “Operating Mode” çerçevesinden, işletme modu olarak “SCL” seçim kutusu işaretlenir. Adres çerçevesinde yer alan adres kodlarından biri seçilir. Burada önemli olan her bir sürücüye farklı bir kodun verilmesidir. Eğer 2-telli bağlantı tipi kullanılacaksa yukarıda anlatılan sebeplerden dolayı “Transmit Delay“ gönderim gecikmesi bölmesine, gerekli olan gecikme süresi milisaniye cinsinden girilir. Bu işlemler tamamlandıktan sonra ayarların sürücüye yüklenebilmesi için “Download” yükleme butonu tıklanır. Tüm aşamalar sorunsuz şekilde tamamlanmasının ardından sürücü ile bilgisayar arasında, RS-485 arabirimi kullanılarak haberleşme yapılabilir ve seri olarak komut gönderilebilir.



Şekil 4.29 : RS-485 bağlantı ayarları

4.2.2.2 Sayısal Giriş ve Çıkışlar

Sayısal giriş ve çıkışlar, DB-25 tipi, dişi konnektör üzerinden yapılmaktadır. Şekil 4.30’da görülen bu konnektör ile ayrıca analog giriş sinyali, enkoder çıkışı ile bunlara ek olarak 200mA değerine kadar 5V’luk besleme yapılabilir.

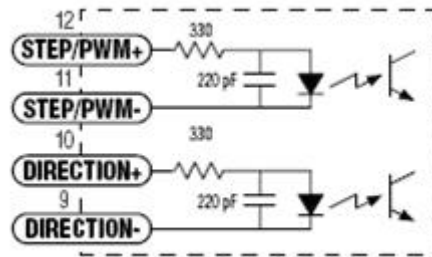


Şekil 4.30 : DB-25 konnektörüne bağlı giriş ve çıkışlar

Sürücülerde farklı fonksiyonlar için iki tip sayısal giriş bulunmaktadır:

- PWM ve yön bilgisi için yüksek hızlı optik izoleli sayısal girişler
- Diğer sinyaller için optik izoleli sayısal girişler

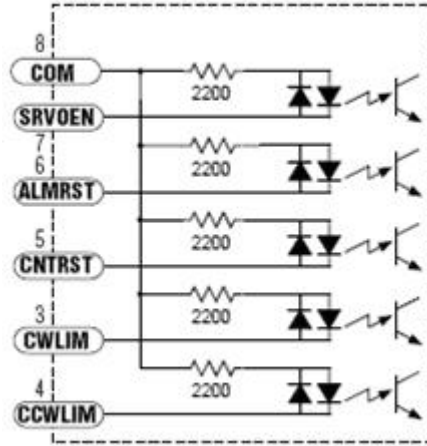
Yüksek hızlı girişlerden, iki temel sinyal girişi yapılabilir. Bunlardan birisi yön sinyalidir. Diğer giriş PWM ile hız kontrolü için kullanılır. Optik olarak izole edilmiş bu girişlere uygulanan sinyallerin genliği 5V’u ve frekansı 2 MHz’i aşmamalıdır. Ancak PLC gibi cihazlarla kontrol yapılması gerektiğinde girişlere uygun dirençler eklenerek 24V’a kadar gerilimlerde çalışılabilir. Girişlere uygulanacak sinyaller ortak referanslı veya diferansiyel tipte olabilir. Şekil 4.31’de bu girişlerin elektrik şeması görülmektedir.



Şekil 4.31 : Yüksek hızlı sayısal girişlerin elektrik şeması [22]

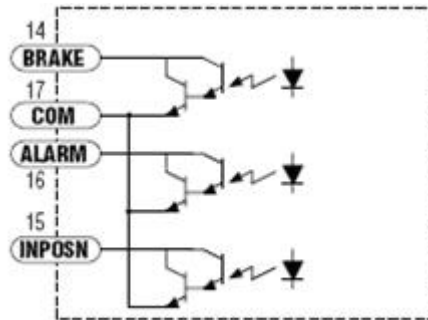
Bunların dışında servoyu devreye alma, alarm resetleme ve limit fonksiyonları için sayısal girişler mevcuttur. Bu girişlere 12-24V aralığında DC gerilim uygulanabilir. Bunlara ek olarak bir de “COM”, ortak bağlantı ucu mevcuttur. Bu uç her zaman sistem toprağına bağlanmak zorunda değildir. Örneğin, akım akıtan bir cihaz ya da sistemle kullanılacaksa (NPN ya da sinking), “COM” güç kaynağının “+” (pozitif) kutbuna bağlanmalıdır. Eğer akım sağlayan bir cihaz yada sistemle kullanılacaksa

(PNP yada sourcing), bu uç güç kaynağının “-” (negatif ya da toprak) kutbuna bağlanmalıdır. Bu sayısal girişlere ait elektrik şeması Şekil 4.32’de görülmektedir.



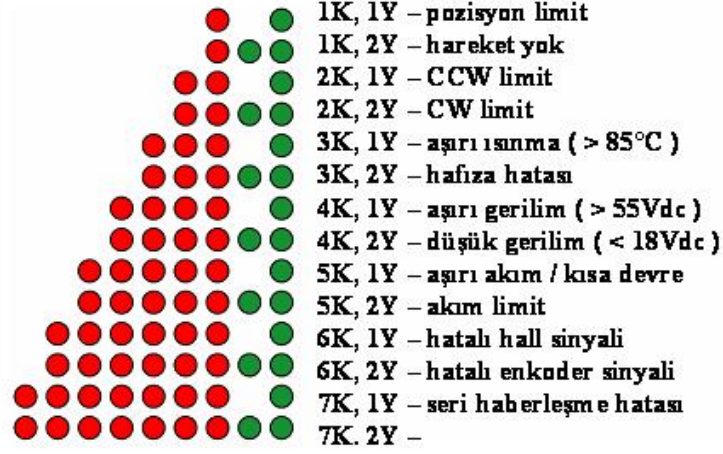
Şekil 4.32 : Sayısal girişlerin elektrik şeması [22]

Sürücülerde ayrıca üç adet sayısal çıkış bulunmaktadır. “BRAKE” çıkışı, frenleme mekanizması kullanılması durumunda, sürücünün bu mekanizmayı otomatik olarak devreye almasını ve motoru durdurmasını sağlar. “INPOSN” çıkışı ile istenen pozisyona ulaşıldığı bilgisi alınır. Kontrol sırasında oluşan hatalar sonucunda, siren çaldırma vb. gibi ikaz işlemleri için “ALARM” çıkışı kullanılabilir. Optik olarak izole edilmiş bu çıkışlara ait elektrik şeması Şekil 4.33’te görülmektedir.



Şekil 4.33 : Sayısal çıkışların elektrik şeması [22]

Oluşan hatanın sebebi ayrıca durum LED’leri izlenerek anlaşılabilir. Yeşil ve kırmızı renkli LED’lerin yanıp-sönme sayılarına karşılık, oluşan hatanın sebepleri şekil 4.34’te gösterilmiştir.



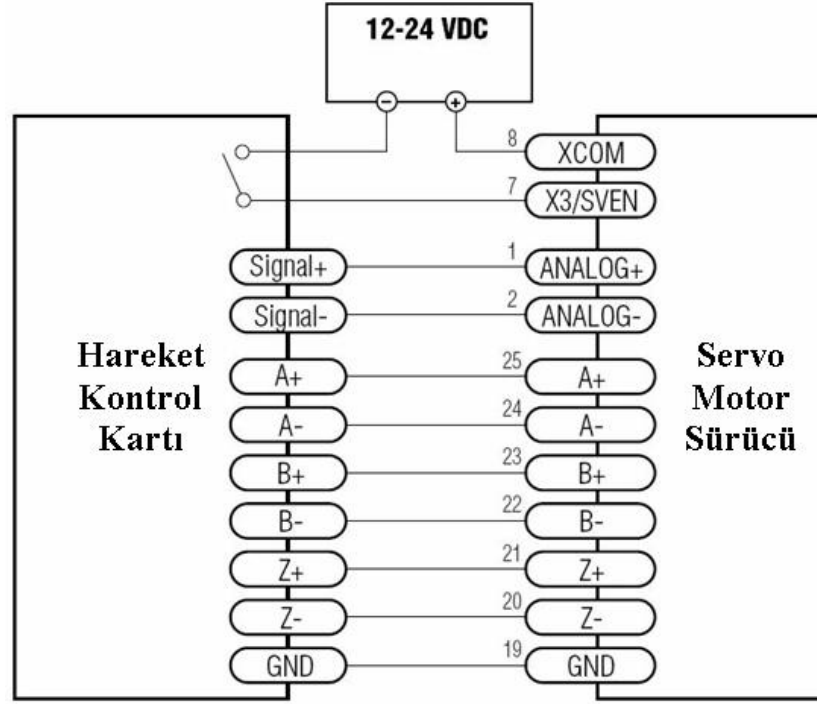
Şekil 4.34 : Durum LED’lerinin hata sebebine karşılık yanıp-sönme sayıları

4.2.2.3 Analog Girişler

Servo motor sürücülerinde tork ve hız modlarında kullanılabilmektedir ve bu modlar seçildiğinde, sürücülere analog kontrol sinyali uygulanabilmektedir. Analog sinyal, diferansiyel olarak uygulanabileceği gibi ortak referanslı olarak da uygulanabilmektedir. Ayrıca uygulanacak sinyalin genliği, sürücü ayarlarından seçilip, en yüksek kontrol sinyaline karşılık, uygulanacak akım ve ulaşılacak hız değerleri belirlenebilmektedir.

Uygulanan kontrol sinyalinin genliği ile seçilen moda göre hız ve akım değerleri doğrusal olarak ayarlanabilmektedir. Sinyalin polaritesi ile de hareketin yönü belirlenmektedir.

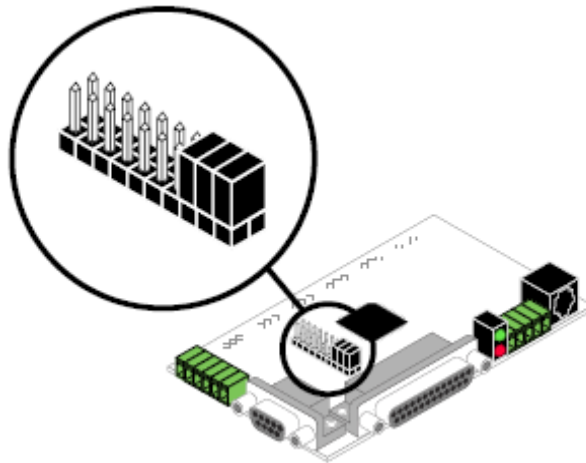
Bu girişler kullanılarak, harici hareket kontrol sistemleri ile sürücülerin çalışması mümkün olabilmektedir (Şekil 4.35). Bu projede kullanılan hareket kontrol kartı da +/-10V aralığında kontrol sinyali üretmekte ve sürücülerle bu açıdan uyum sağlamaktadır.



Şekil 4.35 : Servo motor sürücülerin, hareket kontrol kartına bağlantı şeması [22]

4.2.2.4 Enkoder Çıkışları

Hareket kontrol kartı ile birlikte çalışma gibi enkoder sinyaline ihtiyaç duyulan durumlarda, sürücülere gelen enkoder sinyalleri DB-25 konnektörü üzerinden harici sistemlere iletilebilmektedir. A, B ve Z (indeks) sinyalleri diferansiyel veya ortak referanslı olarak kullanılabilir. Ancak bu sinyalleri alabilmek için sürücü üzerinde bulunan ve Şekil 4.36’da gösterilen pinler köprülenmelidir.



Şekil 4.36 : Enkoder çıkışı ayarlaması [22]

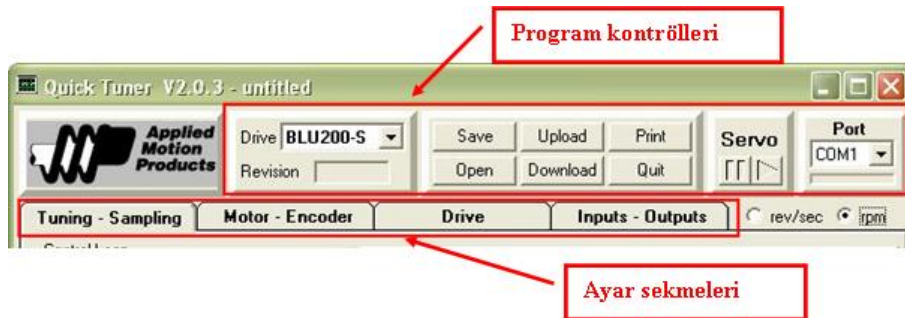
4.2.3 Sürücü Ayarları

Motor ve enkoderin bağlantıları yapıldıktan sonra sistemin düzgün işleyebilmesi için sürücünün ayarlanması gerekmektedir. Bunun için sürücü ile gelen “Quick Tuner” programı kullanılacaktır. Ayarlara başlamadan önce aşağıdaki adımlar sıra ile uygulanmalıdır:

- Motor ve enkoder, sürücüye bağlanmalıdır.
- Sürücü, güç kaynağına bağlanmalıdır.
- Bilgisayara “Quick Tuner” programı yüklenmeli ve çalıştırılmalıdır.
- Bilgisayar ile sürücü arasında seri haberleşme bağlantısı yapılmalıdır.
- Sürücüye, yukarıda sayılan adımlar tamamlandıktan sonra enerji verilebilir.

Motor ve enkoder parametreleri programa girilerek, ayarlar sürücüye yüklenmelidir.

Program, sürücü ve haberleşme kontrollerinin bulunduğu bölme ile dört sekmeden oluşan ayar bölmelerinden oluşmaktadır (Şekil 4.37).



Şekil 4.37 : Ayar programı sekmeleri ve butonları

Program başlatıldıktan sonra, ilk olarak seri haberleşmenin hangi port üzerinden yapılacağını seçmek gereklidir. Bu işlem için Şekil 4.37’de sağ üst köşede bulunan “Port” açılır menüsünden, seri haberleşme kablosunun bilgisayara bağlandığı port seçilir.

Sürücü modeli Şekil 4.38’de görülen “Drive” bölmesinden seçildikten sonra, sürücüye enerji verildiğinde, “Revision” bölümünde sürücüye yüklenmiş olan programın versiyonu görünecektir.



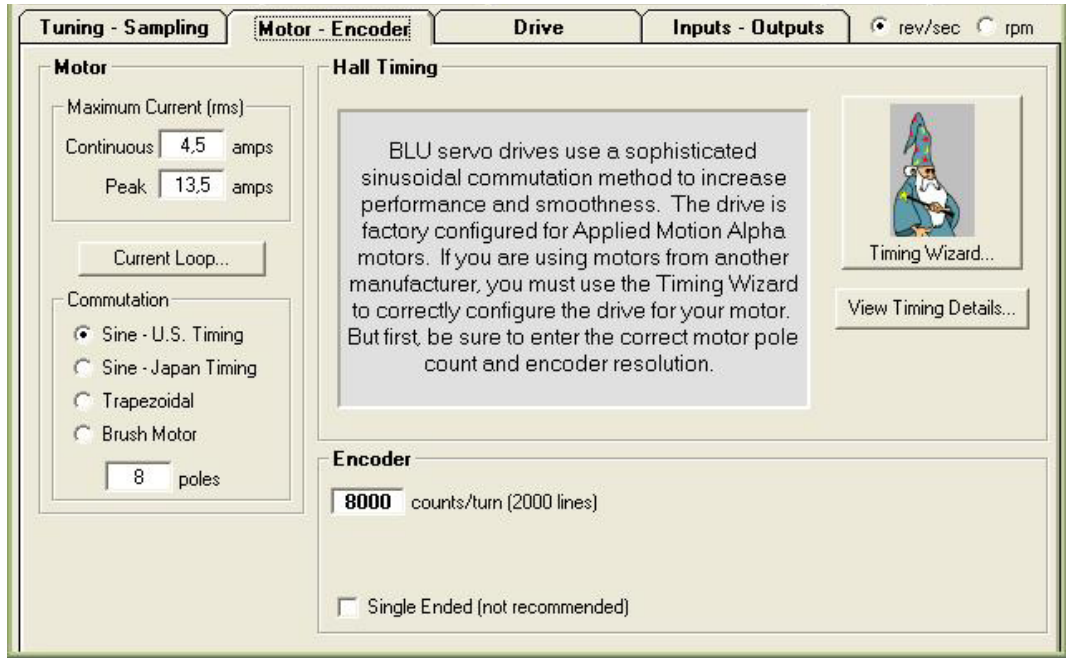
Şekil 4.38 : Sürücü modeli seçim menüsü

Şekil 4.37’de çeşitli butonlar görülmektedir. Bu butonların işlevlerini sıralayacak olursak:

- Save: Parametre ve ayarların kaydedilmesini sağlar.
- Open: Daha önceden kaydedilmiş ayarların, kayıt dosyasından alınmasını sağlar.
- Upload: Yapılan ayarlamaların ve parametre değişimlerinin sürücüye yüklenmesini sağlar. Bu işlem sırasında “Port” bölümünün altındaki bölmede yükleme durumu izlenebilir.
- Download: Sürücüye daha önceden kaydedilmiş ayar ve parametrelerin programa alınmasını sağlar. Bu işlem sırasında “Port” bölümünün altındaki bölmede yükleme durumu izlenebilir.
- Print: Yazıcıdan çıktı almak için kullanılır.
- Quit: Programın sonlandırılmasını sağlar.

Servo bölümü altındaki butonlar kullanılarak, servo motor devreye alınıp, devreden çıkarılabilmektedir.

Sürücülerin ayarlanması işlemine motor ve enkoder ayarları ile başlanabilir. Bunun için Şekil 4.39’da gösterildiği gibi “Motor – Encoder” sekmesi seçilmelidir. Enkoder çerçevesi içindeki bölmeye, enkoderin bir devirde sağladığı darbe sayısı değerinin dört katı girilmelidir. Bunun sebebi, artımlı enkoderlerde (incremental encoder), fazlar arasındaki açı farkından kaynaklanan özellik kullanılarak yapılan hesaplama ile çözünürlüğün dört kat artırılmasıdır. Eğer diferansiyel olmayan bir enkoder kullanılıyor ise “Single Ended” bölümü işaretlenmelidir.

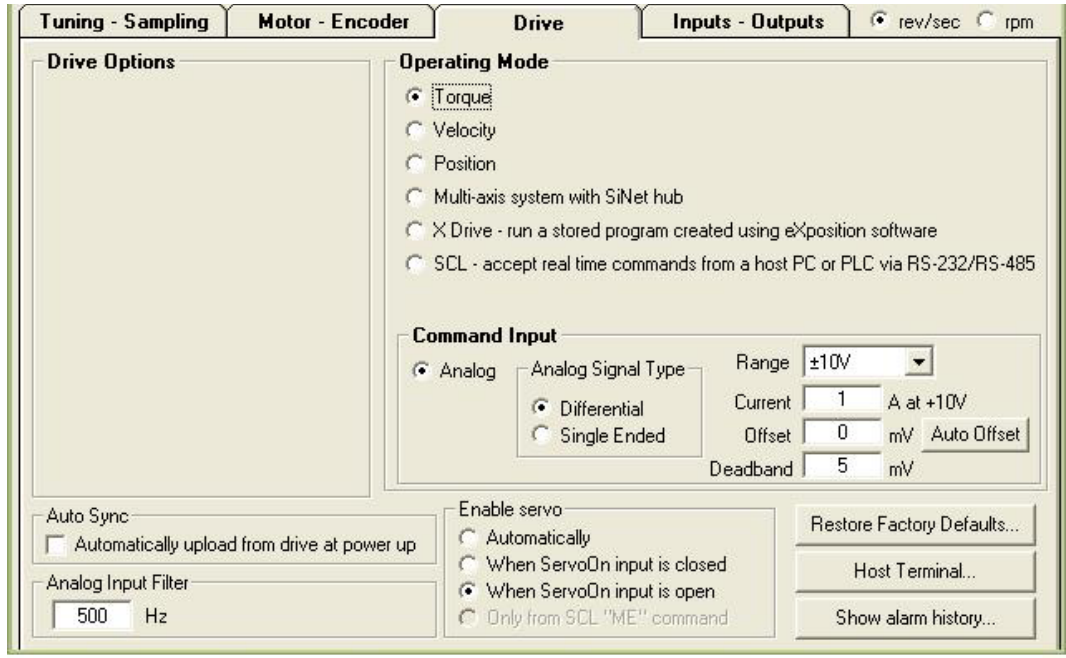


Şekil 4.39 : Motor ve enkoder ayar sekmesi

“Timing Wizard” butonu tıklanarak, enkoder ve hall etkisi sensörlerinin zamanlama ayarı yapılır. Butona tıklandıktan sonra program motor milinin bir yönde çevrilmesini isteyecektir. Harekete başladıktan bir süre sonra, durulması gerektiğine dair uyarı mesajı belirecektir. Bu andan itibaren belirli bir süre program ayarlama yapmak için bekleyecek ve işlemin başarı durumunu bildiren bir mesaj verecektir. Eğer işlemin başarısızlıkla sonuçlandığı uyarısı alınırsa bu sefer aynı işlemler motor mili ters yönde çevrilerek tekrarlanmalıdır. Tekrar hata mesajı alınırsa bu sefer “View Timing Details” butonu tıklanarak açılan pencerenin alt kısmındaki, yön bilgisi değiştirilerek, önceki adımlar tekrar edilmelidir.

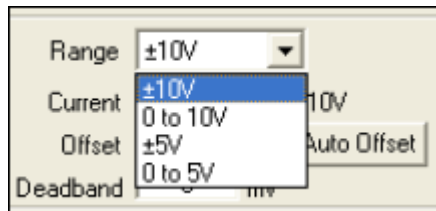
“Motor” çerçevesi içindeki, nominal ve maksimum akım değerleri, ilgili bölüme girilmelidir. Sürücü çalışma anında, bu değerleri gerçek zamanlı değerler ile karşılaştırarak, koruma mekanizmalarını devreye sokacaktır.

Sürücünün hangi modda çalışacağı ile ilgili parametrelerin ayarı Şekil 4.40’da görülen “Drive” sekmesinde belirlenecektir. Sürücü; tork, hız, pozisyon modlarında ve ayrıca sürücüye özel komutlar ile çalıştırılabilmektedir. “Operating Mode” çerçevesinden, kullanılacak olan mod seçilir.



Şekil 4.40 : Sürücünün kullanılacağı mod seçimi sekmesi

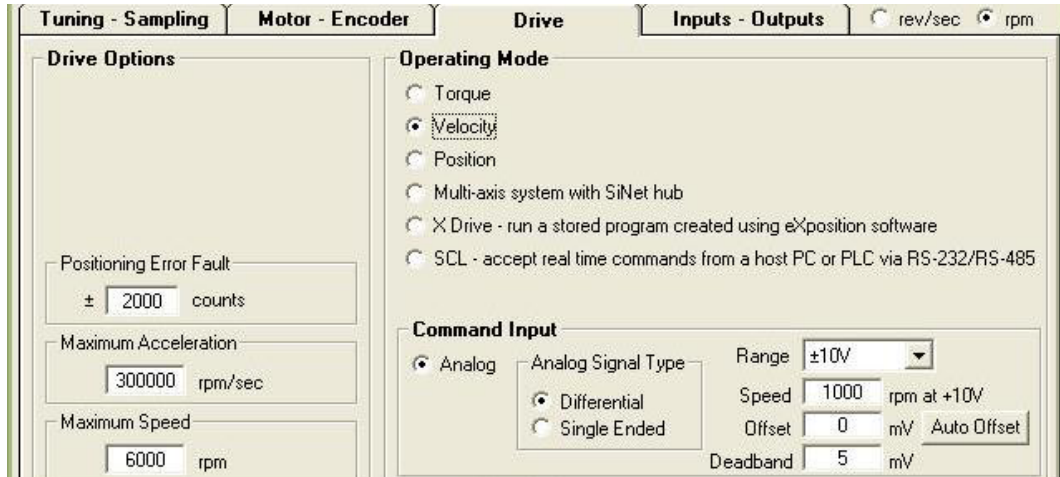
Şekil 4.40’da tork modu için yapılabilecek ayarlar görülmektedir. Seçilen moda bağlı olarak uygulanacak olan kontrol sinyalinin parametreleri, “Command Input” çerçevesinden ayarlanır. Tork ve hız modları için sadece analog sinyal uygulanabilir. “Analog Signal Type” çerçevesine sinyalin diferansiyel ya da ortak referanslı olması durumu işaretlenir. Elektriksel gürültünün yüksek olduğu ortamlarda diferansiyel sinyal tipi kullanılmalıdır. Sinyalin uygulama aralığı Şekil 4.41’de görülen “Range” bölümündeki değerlerden biri seçilerek ayarlanabilir.



Şekil 4.41 : Kontrol sinyali seçenekleri

“Current” bölümüne maksimum kontrol gerilimine karşılık uygulanması istenen, akım değeri girilir. Sürtünme ve bunun gibi harekete engel oluşturan etkilerden dolayı belirli bir sinyal eşiğine kadar motor harekete başlayamayabilir. Bu sebeple motorun harekete başlaması için gereken sinyal değerini “Offset” bölmesine girmek gerekmektedir. “Offset” ayarı el ile olarak yapılabileceği gibi “Auto Offset” butonu tıklanarak, otomatik olarak da gerçekleştirilebilir. Sinyalin gürültülü olması durumunda tam sıfır değeri elde edilemeyebilir. Bunun için “Deadband” bölümüne

girilecek değer ile istenen bir ölü bant aralığı ayarlanarak, bu aralıkta uygulanan sinyaller ile oluşabilecek, istenmeyen hareketler engellenir.



Şekil 4.42 : Hız modunda yapılabilecek ayarlamalar

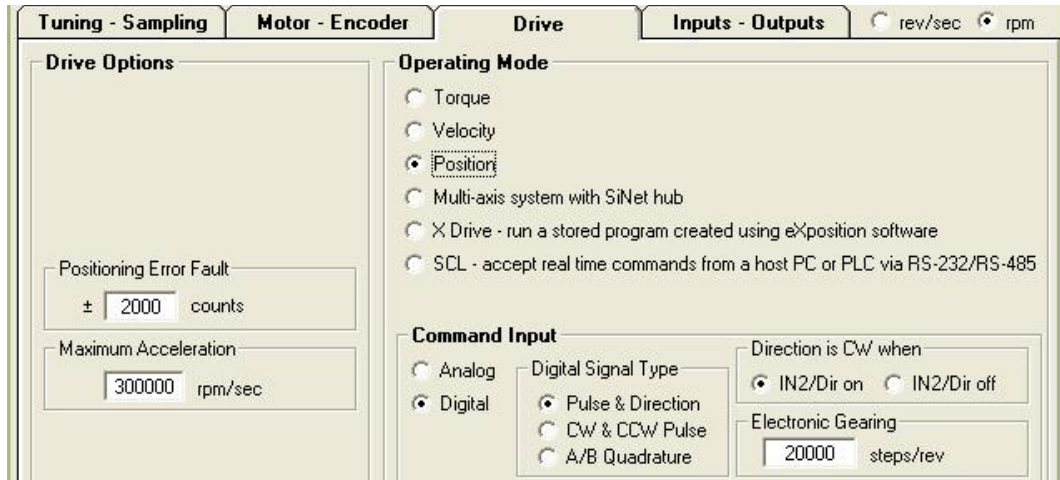
Şekil 4.42’de “Velocity” hız modunda yapılabilecek ayarlar görülmektedir. Tork modunda yapılacak ayarlar kısmında değinilen ayarların yanısıra en yüksek hız ve ivme değerlerinin sürücüye girilmesi işlemi yapılabilmektedir. Kontrol sinyalinin tanımlanması ile ilgili çerçevede, tork modunda akım değeri olarak ayarlanan bölüm, bu modda en yüksek kontrol sinyaline karşılık gelen hız değeri olarak ayarlanacaktır. Ayrıca pozisyonlama hatası ile ilgili parametre girişi de bu bölümde yapılabilmektedir. Böylece pozisyon hatası için atanan değerin aşılması durumunda, güvenlik amacıyla sürücü otomatik olarak motoru durduracaktır.

Şekil 4.43’te pozisyon modunda yapılabilen ayarlamalar incelenebilir. Tork ve hız modlarında kontrol sinyali analog olarak uygulanabilirken bu modda sayısal olarak uygulanabilmektedir. Sistem, “Digital Signal Type” çerçevesinde seçilen üç tipte sinyal ile kontrol edilebilir. Şekil 4.31’de gösterilmiş olan yüksek hızlı sayısal girişlerin hangi şekilde kullanılacağı bu bölümde belirlenir. “Pulse&Direction” seçeneği işaretlenirse, “PWM” sayısal girişine, motorun hızını belirleyen sinyal, “DIR” girişine de hareketin yönünü belirleyen sinyal uygulanabilmektedir. “DIR” girişine uygulanan sinyalin durumuna bağlı olarak motorun döneceği yön “Direction is CW when” çerçevesinden ayarlanabilmektedir. Burada “DIR” girişine uygulanan sinyalin mantıksal 1 veya 0 olması durumlarından hangisinde motor milinin saat yönünde döneceği belirlenmektedir.

“CW&CCW Pulse” seçeneği işaretlenirse, darbe sinyalinin uygulandığı giriş aynı zamanda motorun dönme yönünü belirlemektedir. Bu durumda “PWM” girişine uygulanan sinyal motor milinin bir yönde, “DIR” girişine uygulanan sinyal ise aksi yönde dönmesini sağlayacaktır.

“A/B Quadrature” seçeneği, başka bir motor ile birlikte eşzamanlı veya karşılıklı çalışma durumunda kullanılabilir. Bu seçenek, uydu modu (slave mode) olarak da adlandırılmaktadır. Bu seçenek ile çok motorlu sistemlerin tek enkoder yardımı ile senkronize şekilde çalışmaları mümkün olmaktadır.

Pozisyon modunun seçildiği durumlarda “Electronic Gearing” çerçevesinde yer alan bölmeye, motorun bir tam turdaki adım sayısı girilmelidir. Her bir darbe sinyalinde bir adımlık dönme gerçekleşecektir. Bu özellik sayesinde, önceden step motor kullanılan bir sistemin servo motor ile değiştirilmesi olanağı sağlanmıştır. Ayrıca servo motorun hareketinin çözünürlüğü de bu sayede isteğe bağlı olarak tanımlanmış olacaktır.



Şekil 4.43 : Pozisyon modunda yapılabilecek ayarlamalar

Yukarıda incelenen modlar dışında, sürücüye özgü programlama ortamlarında oluşturulan komutların yürütülmesine ilişkin seçenekler de bulunmaktadır (Şekil 4.44). Bunlardan, SCL komutlarının kullanılması için bilgisayar veya PLC ile, RS-232 veya RS-485 arabirimlerinden biri kullanılarak, bağlantı kurulması gerekmektedir. Bu bağlantı ayarlamaların yapılmasına ilişkin açıklamalar, bölüm 4.2.2.1’de ayrıntılı olarak yapılmıştır.

The screenshot shows the 'Drive' tab of a software interface. It has four sub-tabs: 'Tuning - Sampling', 'Motor - Encoder', 'Drive', and 'Inputs - Outputs'. The 'Drive' sub-tab is active. It contains two main sections: 'Drive Options' and 'Operating Mode'. In 'Drive Options', there are two input fields: 'Positioning Error Fault' set to ± 2000 counts and 'Maximum Acceleration' set to 300000 rpm/sec. In 'Operating Mode', there are five radio buttons: 'Torque', 'Velocity', 'Position', 'Multi-axis system with SiNet hub', and 'X Drive - run a stored program created using eXposition software'. The 'SCL - accept real time commands from a host PC or PLC via RS-232/RS-485' option is selected. Below this, there is an 'RS-485 Address' field with a keypad showing the address 1234567890. The 'Transmit Delay' is set to 0 msec.

Şekil 4.44 : Sürücüye özgü çalışma modları

Servo motor sürücülerin sayısal giriş ve çıkışlarının ayarlarının yapılabileceği program sekmesi Şekil 4.45’te görülmektedir.

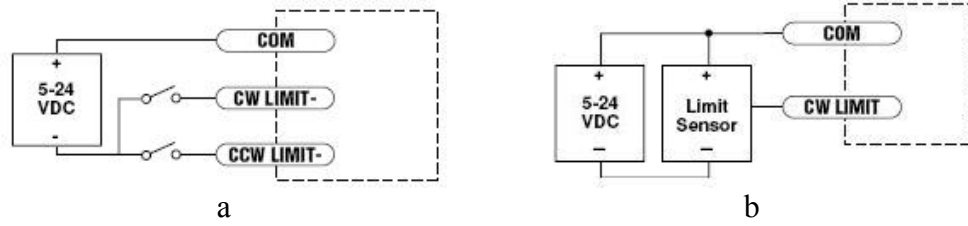
The screenshot shows the 'Inputs - Outputs' tab of the same software interface. It contains several sections: 'If an alarm occurs' with three radio buttons ('close alarm output', 'open alarm output', 'neither') and a checkbox 'Allow AlarmReset input to clear it (by closing)'; 'Limit sensors' with a dropdown menu set to 'closed'; 'Motion Output' with a checkbox 'Closed when position error is less than' and a value of 10 counts; and 'Brake' with a checkbox 'Automatically release brake when moving by' and two radio buttons ('closing the Brake output', 'opening the Brake output'). There are also two 'Wait' fields: 'Wait 200 msec before moving for brake to release' and 'Wait 200 msec for brake to engage before disabling servo'.

Şekil 4.45 : Sürücü giriş – çıkış ayarları

Hata durumunda, “Alarm” çıkışın hangi durumu alacağı “If an alarm occurs” çerçevesinden ayarlanmaktadır. “AlarmReset” girişinin, oluşan alarm durumlarını temizlemek için kullanılması gerektiğinde, bu çerçeve içindeki ilgili kutucuk işaretlenmelidir.

Limit anahtarı ya da benzer işlevli sensör kullanılması durumunda, anahtarın/sensörün kontaklarının durumuna bağlı olarak sınır belirleme işlemi “Limit

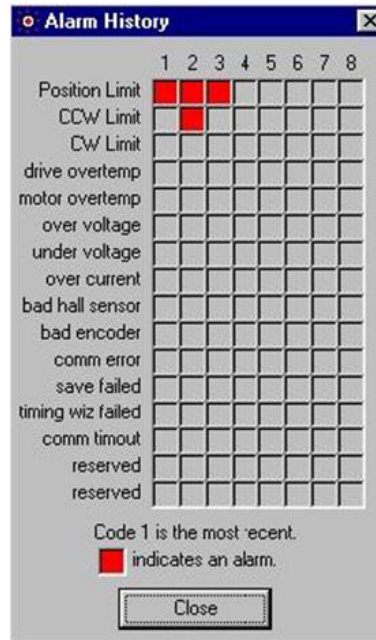
sensors” çerçevesinden yapılabilmektedir. Limit anahtarı ve limit veya yaklaşım sensörünün sürücü bağlantı şeması Şekil 4.46’da görülmektedir.



Şekil 4.46 : a) Limit anahtarının bağlantı şeması b) Limit sensörü bağlantı şeması

“Motion output” çerçevesi kullanılarak, belirlenen pozisyona, istenen değerde yaklaşılması durumunda çıkışın aktif olması durumu ayarlanabilir. Eğer elektromekanik fren mekanizması mevcut ise, bu sisteme ilişkin ayarlamalar “Brake” çerçevesinden yapılabilmektedir.

Yine bu sekmede bulunan “Show history” butonuna tıklanması durumunda, geçmiş alarm bilgilerine ulaşılabilir. Sekize kadar alarm durumu geçmişi ve bunların nedenleri Şekil 4.47’deki “Alarm History” alarm geçmişi penceresinden izlenebilmektedir.

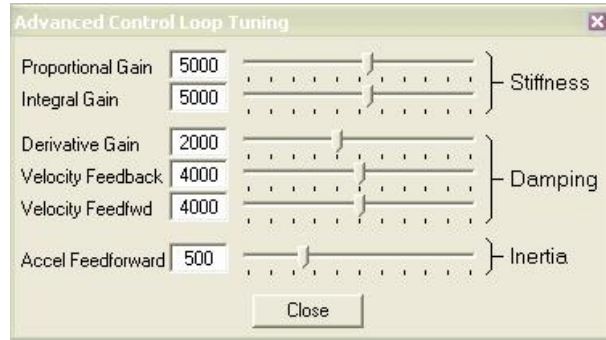


Şekil 4.47 : Alarm geçmişi penceresi

Motor, enkoder ve giriş çıkışlara ilişkin ayarlamalar tamamlandıktan sonra, kontrol parametrelerinin tanımlanması işlemine başlanabilir. Bu projede kullanılan motorlar,

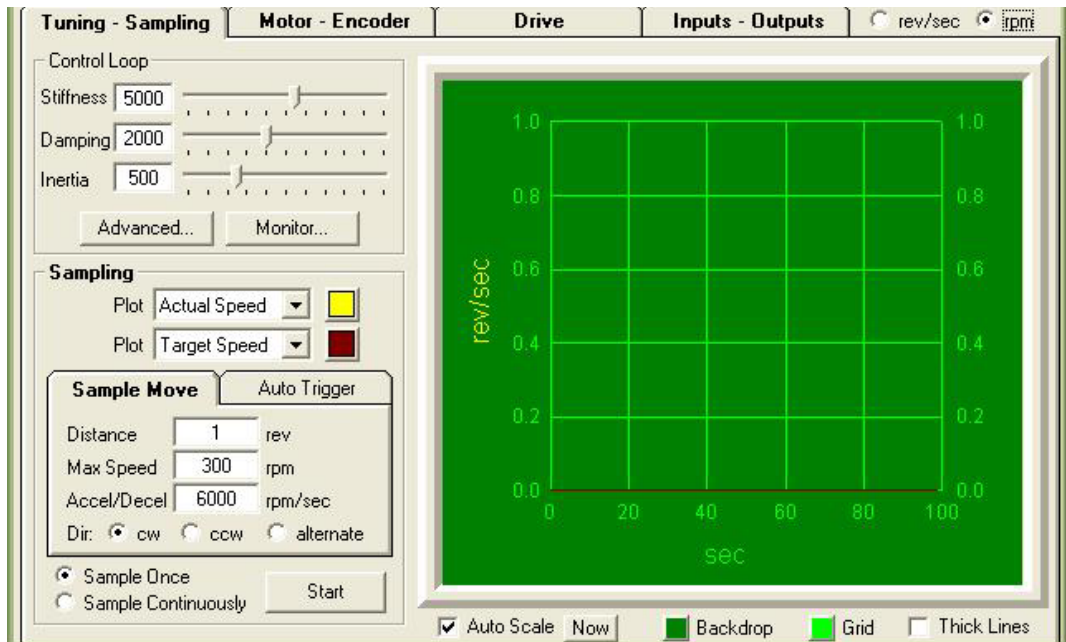
servo motor sürücüleri ile uyumlu motorlar olduğu için ayar yazılımı ile gelen dosyalardan kontrol parametreleri yüklenebilmektedir.

Ancak, farklı motor kullanılması veya kullanılan motorların kontrol parametrelerinin değiştirilmesi istendiği durumlarda, Şekil 4.48’de görülen, ileri kontrol çevrimi ayar pencersi (“Advanced Control Loop Tuning”) kullanılarak kontrol parametreleri değiştirilebilmektedir.



Şekil 4.48 : Kontrol parametreleri ayar penceresi

Girilen değerlere göre sistemin cevabı Şekil 4.49’da yeşil olarak görülen osiloskop ekranından izlenebilmektedir. “Sampling” örnekleme çerçevesinde bulunan bölmelere, motorun denenmek istendiği; hız, ivme ve yer değiştirme, dönüş yönü ve deneme sayısı bilgileri girilerek sistemin durumu izlenebilir.



Şekil 4.49 : Kontrol parametrelerini örnekleme ve izleme penceresi

Şekil 4.49'daki ayar sekmesinin “Control Loop” çerçevesi içinde bulunan “Monitor” butonu ile açılan ve Şekil 4.50’de görülen pencereden sürücünün durumu gerçek zamanlı olarak izlenebilmektedir. Monitor çerçeveleri içindeki bölmlerden seçilebilen parametreler şunlardır:

- Position hatası
- Anlık hız
- Hedef hız
- Kontrol akımı
- Anlık akım
- Besleme gerilimi
- Sürücü sıcaklığı
- Enkoder pals sayısı
- Alarm kodu
- Analog giriş gerilimi



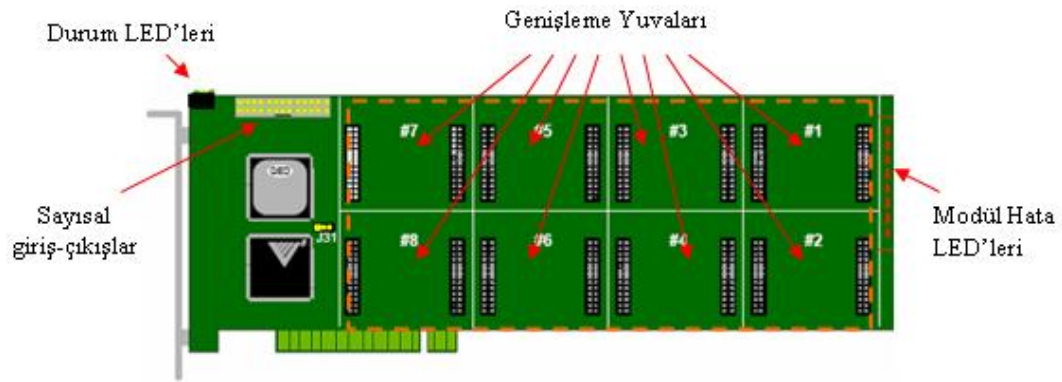
Şekil 4.50 : Sürücü ve motor durumunu gerçek zamanlı izleme penceresi

4.3 Motor Kontrol Kartı

Mobil robotun hareketlerinin kontrolü için “Precision MicroControl Corp. (PMC)” firmasının DCX-PCI300 hareket kontrol kartı kullanılmıştır. 16 adede kadar motoru

kontrol etme kabiliyetinde olan bu kart, dört adet kontrol modülü ile mobil robotun sekiz motorunu, kontrol bilgisayarının belirleyeceği şekilde analog kontrol sinyalleri ile kontrol edecektir.

Şekil 4.51’de görülen hareket kontrol kartı, bilgisayarla haberleşmesini, PCI veri yolu üzerinden yapmaktadır. Hareket kontrol kartı üzerinde 8 adet genişleme yuvası bulunmaktadır. Bu yuvalara, ihtiyaca bağlı olarak, servo ve adım motor kontrolörleri, sayısal ve analog giriş-çıkış modülleri yerleştirilerek, istenen kontrol sistemi oluşturulabilmekte ve çeşitli uygulamalar geliştirilebilmektedir.



Şekil 4.51 : Hareket kontrol ana kartı [24]

64-bit MIPS RISC işlemci, 4 MB RAM, 32 KB kalıcı belleğe sahip olan kart, 40 MHz Texas Instruments DSP’ye sahip olan modüller yardımı ile yüksek performans sağlamaktadır.

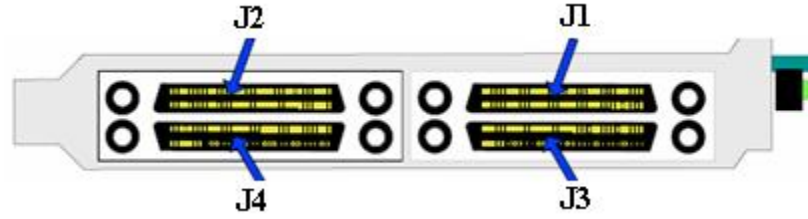
Komut kütüphanesi kullanılarak C/C++, Visual Basic, Delphi dillerinde uygulamalar geliştirilebilmektedir. Ayrıca LabVIEW programının hareket kütüphanesini desteklemektedir. Kurulum, ayar, sorun bulma ve giderme amacıyla hazırlanmış programlara sahiptir.

Modüler sistemi sayesinde servo motorlar ile adım motorları bir arada, senkronize ve koordineli olarak kontrol edilebilmektedir. Trapezoidal, parabolic ve s-eğrisi şeklinde hız profili oluşturulabilmektedir. 16 eksene kadar doğrusal ve eğrisel interpolasyon yapılabilmektedir.

Pozisyon, hız, tork ve kazanç kontrol modlarında kullanılabilen sistem, yüksek hızda pozisyon yakalama ve karşılaştırma yeteneğine sahiptir. Ayrıca dişliler arası boşluktan kaynaklanan problemleri giderme özelliği mevcuttur.

Servo kontrol, 16-bit çözünürlükteki dijital-analog çeviricilerden elde edilen, $\pm 10V$ aralığındaki analog kontrol sinyali ile yapılabilmektedir. Kontrol sinyali 16 bit çözünürlüktedir.

Pozisyon ve hız geribeslemesi çift-fazlı ve indeksli (A,B,Z) enkoder kullanılarak yapılabilmektedir. Enkoder girişleri her eksen için 10 MHz değerindedir ve gürültüyü önlemek amacıyla sayısal olarak filtrelenmiştir.



Şekil 4.52 : VHDCI konnektörler [24]

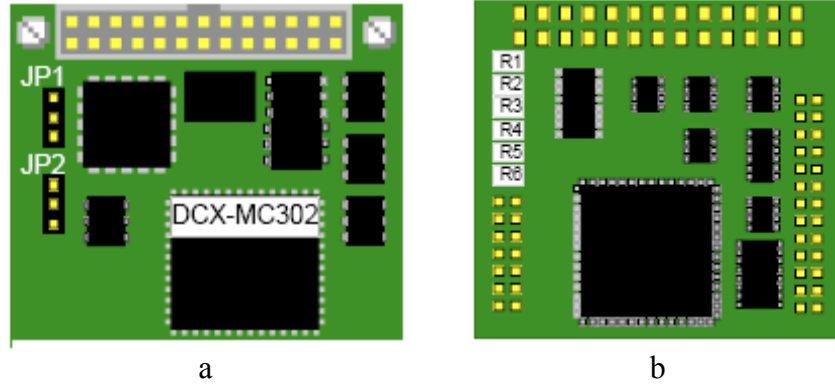
Modüllerin, giriş ve çıkış uçları 4 adet VHDCI konnektörü aracılığıyla kontrol edilecek sisteme bağlanmaktadır (Şekil 4.52). Tablo 4.8’de modülün kart üzerindeki konumuna bağlı olarak, kullanılacak konnektörler gösterilmiştir.

Tablo 4.8 : Modülün kart üzerindeki konumuna bağlı olarak kullanılan konnektör

Modül No	Konnektör
1	J1
7	J1
5	J3
3	J3
6	J4
4	J4
2	J2
8	J2

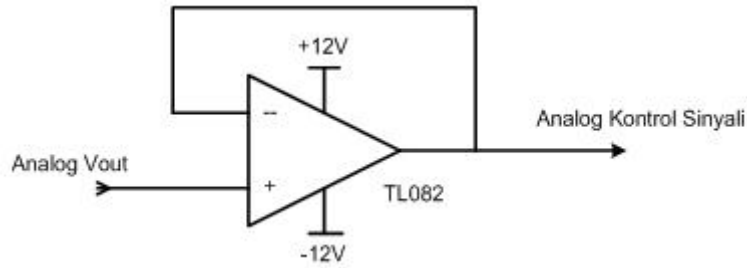
4.3.1 Kontrol Modülleri

Kontrol modülleri, PMC firması tarafından DCX-MC302-H kod numarası ile üretilen modüllerdir (Şekil 4.53). Her bir modül, iki eksen bağımsız olarak kontrol edebilmektedir. Mobil robot üzerindeki her bir kolda ikişerli gruplar şeklinde yerleştirilen motorların kontrolü için, bu modüllerden 4 adet bulunmaktadır. Böylece bir koldaki yönlendirme ve tahrik motorları tek modül yardımı ile kontrol edilebilmektedir.



Şekil 4.53 : Servo motor kontrol modülü a) üstten görünüm b) alttan görünüm [24]

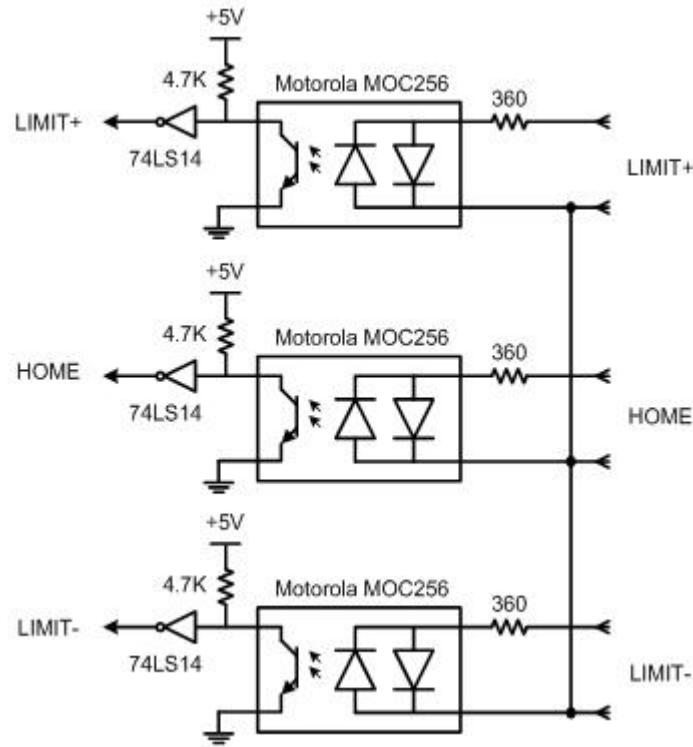
Hareket kontrolü, $-/+10V$ aralığında 16-bit çözünürlüklü analog işaret ile yapılmaktadır. Şekil 4.54’de kontrol modülünün analog çıkış devresi görülmektedir. Hız veya tork modunda, uygulanan sinyalin genliği ile orantılı olarak, sırası ile hız veya akım ayarlanmaktadır. Sinyalin polarizasyonu, hareketin yönünü belirlemektedir.



Şekil 4.54 : Kontrol modülünün analog çıkış devre şeması

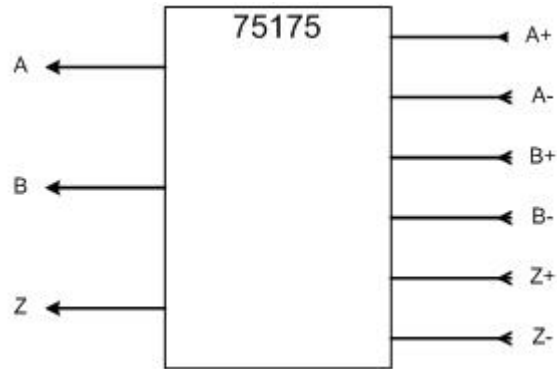
Servo sürücülerin aktive edilmesi ve komut sinyaline bağlı olarak motorlara hareket kazandırılmasını sağlamak amacıyla açık kollektör (open collector) tipte sayısal çıkış bulunmaktadır. 30 V gerilim değerine kadar 100 mA akım geçirilebilecek yapıdadır.

Her bir eksen için, başlangıç noktası ile pozitif ve negatif limit noktalarından alınan sinyallerin, modüle bağlantısı için optik olarak izole edilmiş sayısal girişler mevcuttur (Şekil 4.55). Girişlere uygulanacak sinyalin genliği 2.5 V ile 7.5 V aralığında sınırlandırılmıştır. Bu girişler kullanılarak, sistemin başlangıç anında, mobil robot yönlendirme motorlarının, limit anahtarları ile belirlenmiş, başlangıç konumlarını almaları sağlanmaktadır.



Şekil 4.55 : Pozitif ve negatif limitler ile başlangıç noktası sinyal giriş devre şeması

Modüller iki-fazlı (A,B) ve indeksli (Z), artımlı enkoderlerden geribesleme alabilmektedir. Giriş yenileme frekansı 10 MHz değerindedir. Diferansiyel veya ortak referanslı sinyal çıkışı olan enkoderler ile uyumludur. Şekil 4.56’da enkoder giriş devresi görülmektedir.

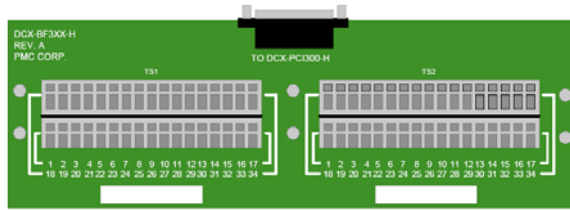


Şekil 4.56 : Enkoder giriş devre şeması

Ayrıca enkoder beslemesi 5 V veya 12 V gerim değerlerinden biri ile 250 mA akım değerine kadar yapılabilmektedir. Mobil robot üzerindeki enkoderler, servo sürücüler tarafından beslendiği için modül üzerindeki besleme çıkışı kullanılmayacaktır. Servo sürücülere bağlı enkoderlerin ürettiği işaretler, sürücü üzerindeki ayarlamalar

yapıldıktan sonra, sürücünün enkoder çıkışları(line driver) kullanılarak modüllere taşınacaktır.

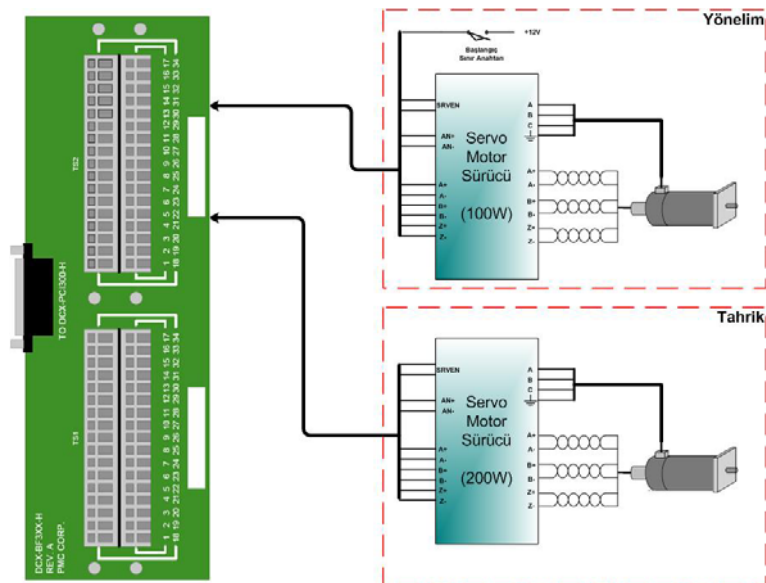
Modüllerin sahip olduğu bu giriş ve çıkışlar, sisteme DCX-BF3XX-H kodlu klemens kartı ile bağlanmaktadır (Şekil 4.57). Bu kart ile hareket kontrol kartı arasındaki bağlantı, iki ucunda VHDCI konnektörü bulunan özel kablo ile yapılmaktadır. Bir klemens kartı üzerinde iki grup klemens bulunmaktadır. İki kontrol modülünü, bir klemens kartına bağlayarak dört adet motoru kontrol etmek mümkündür. Böylece tüm sistemin bağlantısı 2 klemens kartı kullanılarak yapılabilmektedir.



Şekil 4.57 : DCX-BF3XX-H klemens kartı [24]

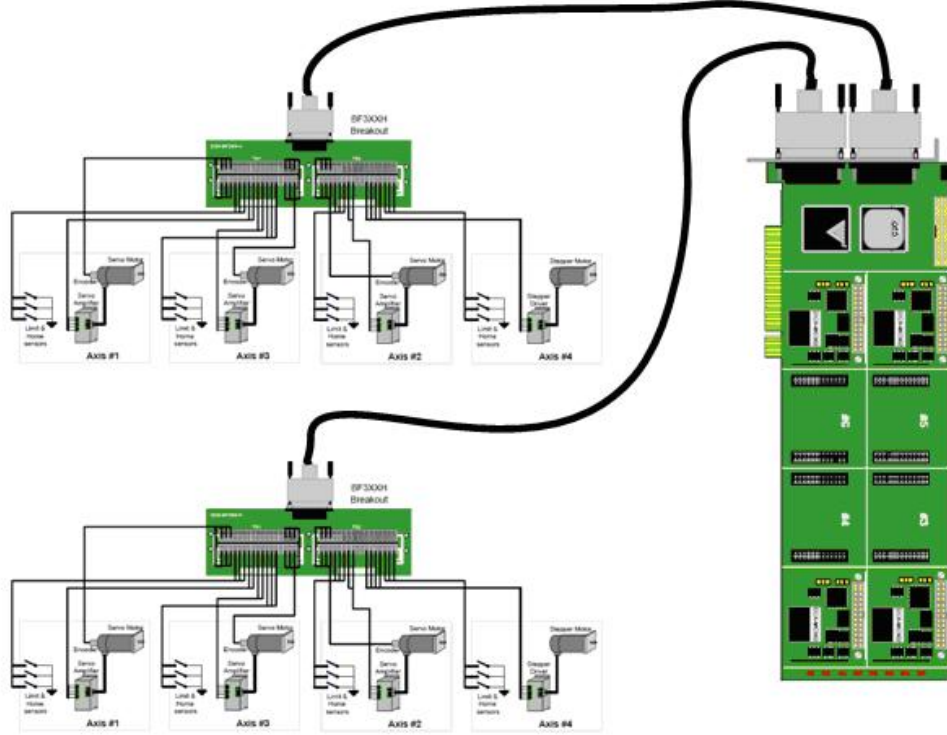
4.3.2 Hareket Kontrol Sistemi

Servo motor sürücülerden; analog kontrol sinyali, servoyu devreye alma sinyali ve enkoder sinyali ile sınır anahtarından alınan başlangıç noktası sinyalini taşıyacak kablolar, klemens kartına bağlanmaktadır. Her bir klemens grubuna 2 sürücülerden gelen kablolar bağlanmıştır. Böylece bir koldaki yönelim ve tahrik motorlarını, tek bir modüle bağlayacak sistem Şekil 4.58’de görülmektedir.



Şekil 4.58 : Bir koldaki motor ve sürücülerin hareket kontrol sistemine bağlantısı

Tüm sistem; toplamda dört adet taşıyıcı kol ve bunların üzerindeki sekiz servo motordan oluşmaktadır. Motorlar, sürücüler, klemensler, modüller ve hareket kontrol kartından oluşan, hareket kontrol sisteminin genel görünüşü Şekil 4.59'daki gibidir.



Şekil 4.59 : Hareket kontrol sisteminin genel yapısı

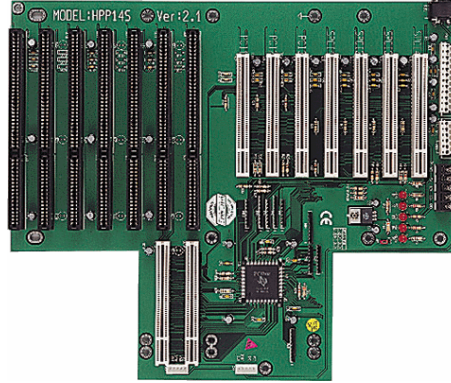
4.4 Kontrol Bilgisayar Sistemi

Mobil manipülatör sistemi; mobil robotun hareket bileşenleri, sensörler ve Mitsubishi PA-10 robot kolundan oluşmaktadır. Tüm bu bileşenlerin; mobil manipülatörün, istenen görevleri, otonom olarak yerine getirmesi için doğru ve uyum içinde çalışması gerekmektedir. İşte bu amaçla, sistemin beyni olarak, bir kontrol bilgisayar sistemi oluşturulmuştur.

Endüstriyel anakart ve işlemci kartı, kontrol bilgisayarının temel bileşenlerini oluşturmaktadırlar. Servo sürücülerin kontrolü için kullanılan hareket kontrol kartı, görüntü işlemede kullanılacak görüntü yakalama kartı, haberleşme arabirimini oluşturan kablosuz ağ kartı, ve mobil manipülatör sisteminin bir parçası olan Mitsubishi PA-10 robot kolunun haberleşme arabirim kartı da anakarta bağlanmaktadır.

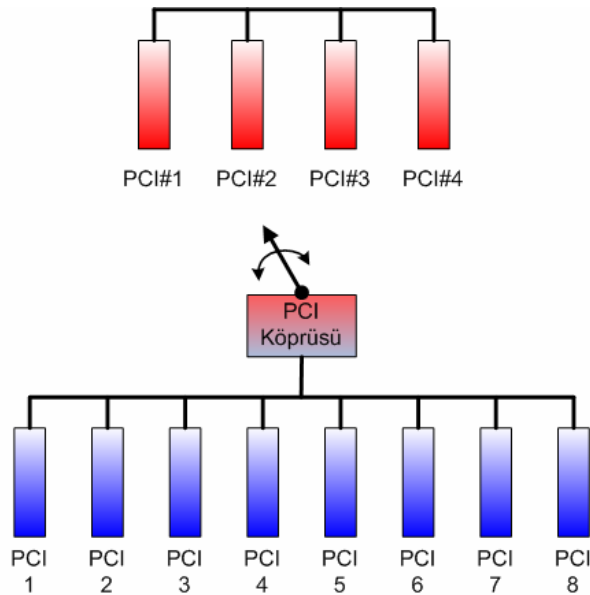
4.4.1 Endüstriyel Anakart

Endüstriyel anakart, bilgisayar sistemini bir arada tutan parçadır(Şekil 4.60). İşlemci kartı ile diğer kartların bağlantısını ve bu kartların enerjisini sağlamaktadır.



Şekil 4.60 : Endüstriyel anakart [13]

Anakart üzerinde 8 adet PCI arabirimi bulunmaktadır. İşlemci kartının, anakart üzerindeki bu arabirimleri, herhangi bir çakışma olmadan kullanabilmesi için PCI köprüsü (PCI bridge) sayesinde, anakart üzerindeki seçim pinleri yardımı ile doğru PCI kaynağı seçilebilmektedir (Şekil 4.61).



Şekil 4.61 : PCI köprü yapısı

Ayrıca kart üzerinde 7 adet ISA arabirimi mevcuttur. Bunlardan ikisi PICMG arabirimi yapısındadır. Bu iki arabirim, işlemci kartlarının kullanımına imkan vermektedir.

Anakartın beslemesi üç farklı yolla yapılabilmektedir. Standart AT ve ATX güç kaynakları için konnektörler bulunan kart, ayrıca klemensler yardımı başka bir güç kaynağı ile beslenebilmektedir. ATX güç kaynağı ile besleme durumunda sistemin açılıp, kapatılması için standart ATX anahtar bağlantısı kullanılmalıdır. Ayrıca sisteme bağlı sabitdisk ve CD okuyucu gibi çevre birimlerinin beslenebilmesi için arabirim bulunmaktadır.

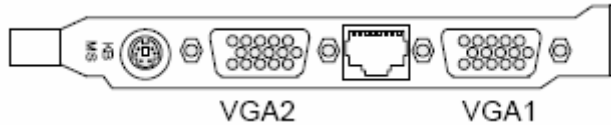
4.4.2 İşlemci Kartı

İşlemci kartı, Şekil 4.62’de görüldüğü gibi tek-kart bilgisayar yapısında olup, monitör, sabit disk, RAM, CD sürücü, disket sürücü, klavye ve fare gibi çevre birimleri bu karta bağlanmaktadır.



Şekil 4.62 : İşlemci kartı

Kart üzerinde 2.4 GHz hızında Mobile Pentium P4 işlemcisi bulunmaktadır. 2 GB’a kadar RAM için iki adet bağlantı yuvası mevcuttur. Gömülü tipteki ekran kartı 16 MB değerindedir ve iki adet ekran bağlantı konnektörü bulunmaktadır (Şekil 4.63).



Şekil 4.63 : İşlemci kartının monitör, ethernet, klavye ve fare bağlantı portları

İki adet seri, bir adet paralel haberleşme arabirimi ile dört adet USB bağlantısı için konnektör bulunmaktadır. Ethernet kontrolörü kart üzerindedir ve RJ-45 konnektörü ile bağlantı yapılabilmektedir.

Sabit disk, CD sürücü bağlantıları için iki adet ATA-100 IDE arabirimi ve bir adet disket (floppy disk) sürücü arabirimi bulunmaktadır. Klavye ve fareyi, birlikte kullanmak için özel bir kablo kullanmak gerekmektedir.

Anakart üzerindeki ISA arabirimini kullanan kartlar ile bağlantı için ISA köprüsü, PCI kartlar için de PCI kontrolör bulunmaktadır. İşlemci kartının PCI kaynağı belirlendikten sonra bölüm 4.4.1’de incelenen, PCI köprüsü ayarlamaları endüstriyel anakart üzerinde yapılmalıdır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, İstanbul Teknik Üniversitesi Robotik Laboratuvarı'nda yapılması planlanan araştırmalar doğrultusunda, tasarımı yapılan ve üniversite-sanayi işbirliği çerçevesinde mekanik üretimi gerçekleştirilen, mobil manipülatör sisteminin, elektriksel donanımı incelenmiş ve sistemin çalışır duruma getirilmesi için gerekli uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

Dört tekeri bağımsız olarak yönlendirilebilen ve tahrik edilebilen ve yedi serbestlik dereceli Mitsubishi PA-10 robot kolunu taşıyabilecek yapıda tasarlanan mobil robotun mekanik yapısı, sistemin tasarım aşamasından imalatına uzanan süreç ve kullanılan malzemeler ana hatlarıyla özetlenmiştir.

Elektriksel donanım üç ana başlıkta toplanmıştır. Bunlar güç sistemi, hareket sistemi ve kontrol sistemidir. Bu sistemleri oluşturan elemanlar ve çalışma prensipleri hakkında bilgiler verilip, oluşan sistemlerin çalışması için gereken ayarlamalar anlatılmıştır. Gözlemler ve sonuçların analizleri yapılmıştır.

Çalışmaların başlangıç aşamasında, sistemlerin tam olarak belgelenmemiş olması ve bilimsel araştırmalarda kaçınılmaz olarak yapılan hatalar sonucu, bazı donanım parçaları zarar görmüştür. Bu sebepten dolayı, sistem tam olarak çalışır duruma getirilememiş olsa da, alt sistemlerin çalışma prensipleri, bağlantıları ve ayarları detaylı olarak incelendiği ve belgelendirildiği için, zarar gören parçalar yenileri ile değiştirildiğinde yaşanacak sıkıntılar, en aza indirilmeye çalışılmıştır.

Mobil robotun yönelim mekanizmaları, tasarımı itibarı ile literatürde geçen standart tekerlek yapılarından farklılıklar göstermektedir. Bu durum yeni ve özgün bir model geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bunun sonucunda mobil robot, dört kolun paralel olarak çalıştığı bir sistem şeklinde modellenmiştir.

Mobil manipülatörün temel tasarım amaçlarından biri olan Mitsubishi PA-10 robot kolunun hareket kabiliyetini artırma isteği kısmen gerçekleşebilmektedir. Robot kolun sürücülerinin, şebeke geriliminden beslenmesi ve sürücülerin boyutları sebebi ile mobil robota entegre edilememesi nedeniyle bu durum ortaya çıkmaktadır.

Gelecekte yapılacak araştırmalar çerçevesinde, sözü edilen sürücülerin boyutlarında yapılacak iyileştirmeler sonucunda, sistem baştaki tasarım amacına uygun hizmet edebilir duruma gelebilir.

Otonom bir sistem oluşturmak için çevrenin doğru şekilde ve çeşitli yönleri ile algılanması çok önemli bir gerekliliktir. Mobil manipülatör bu şartları sağlamak amacı ile üzerinde, çevresini ve kendi durumunu algılamasına imkan veren birçok sensör bulundurmaktadır. Literatürdeki benzer yapılardan, sensör çeşitliliği bakımından da çeşitli avantajları bulunmaktadır.

Genel olarak, özgün bir yapıda geliştirilen bu mobil manipülatör sistemi, yüksek lisans ve doktora seviyesinde birçok araştırma olanaklarını beraberinde getirmektedir. Yapılacak bu çalışmaların, robotik bilimini her defasında, daha büyük adımlarla, ilerilere taşıyacağı ve araştırmacılara yeni ufuklar sunacağı düşünölmektedir.

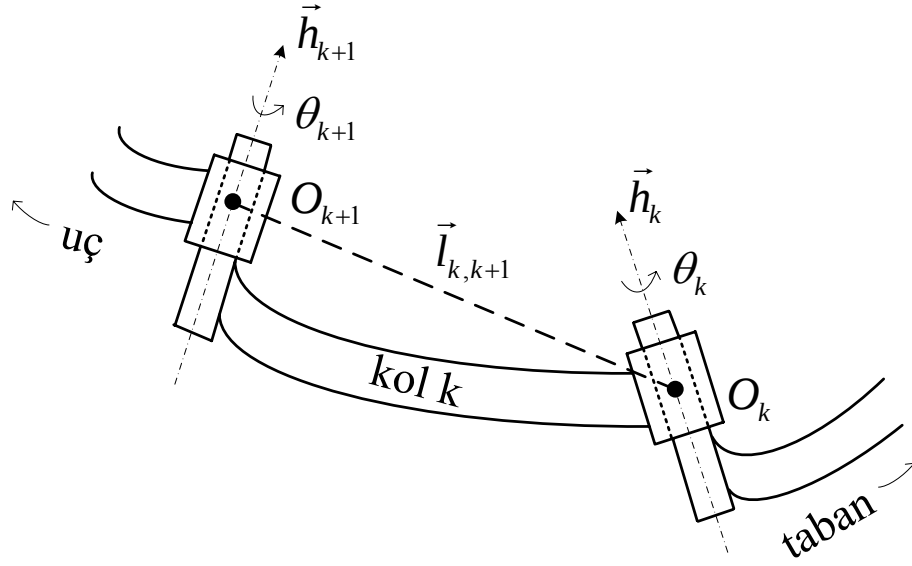
KAYNAKLAR

- [1] **Yangsheng, X and Au, S.K.-W.**, 2004. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Volume 9, Issue 2, June 2004, 407 – 419.
- [2] **Nakamura, Y., Ezaki, H., Yuegang, T and Woojin C**, 2001. Design of steering mechanism and control of nonholonomic trailer systems, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Volume 17, Issue 3, June 2001, 367 – 374.
- [3] **Makatchev, M., Lang, S. Y. T., Tso, S. K. and McPhee, J. J.**, 2000. Cross-Coupling Control for Slippage Minimization of a Four-Wheel-Steering Mobile Robot, *Proc. 31th International Symposium on Robotics*, Montreal, Canada, May 14-17, pp. 42-47.
- [4] **Makatchev, M., McPhee, J.J., Tso, S. K., and Lang, S. Y. T.**, 2000. System Design, Modelling, and Control of a Four-Wheel-Steering Mobile Robot, *Proc. 19th Chinese Control Conference*, Hong Kong, China, December 6-8, , pp. 759-763.
- [5] **Sørensen, M. J.**, 2002. Modelling and Control of Wheeled Farming Robot, *Master's thesis*, Aalborg University, Department of Control Engineering.
- [6] **Sørensen, M. J.**, 2003. Artificial Potential Field Approach to Path Tracking for a Non-Holonomic Mobile Robot, *Proc. of the 11th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED'03)*, Rhodes, Greece.
- [7] **Sørensen, M. J., Bentsen, J. D., Andersen, P. and Pedersen, T. S.**, 2004. Asymptotic Stabilization of Non-Holonomic Port-Controlled Hamiltonian Systems, *Proc. of the 5th IFAC/EURON Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV 2004)*, Lisbon, Portugal.
- [8] **Sørensen, M. J.**, 2005., Feedback Control of a Class of Nonholonomic Hamiltonian Systems, Ph.D. Thesis, Aalborg University, Institute of Electronic Systems, Denmark.
- [9] **He, B., Wang, D., Pham, M. and Yu, T.**, 2002, GPS/Encoder Based Precise Navigation for a 4WS Mobile Robot, *7th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, Singapore, 2-5 December 2002, vol 3, 1256-1261.
- [10] **Yalçın, M. K., Yeşiloğlu, S. M., Dal, M. and Temeltaş, H.**, 2006. Maneuvering Strategies for Four-Wheel Drive, Four-Wheel Steer Mobile Robots Using Curvatures Based on Weingarten-Maps, *The 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Paris, France, November 7-10.

- [11] **Borenstein, J., Everett, H. R. and Feng, L.**, 1996. Multi degree-of-freedom vehicles, *Navigating Mobile Robots, Systems and Techniques*, pp.17, Ed. Borenstein J., A K Peters, Wellesley, Massachusetts.
- [12] www.activrobots.com/ROBOTS/Seekur.html (Aralık 2006)
- [13] **Dal, M.**, 2006. Holonomik Olmayan Kısıtlara Sahip Mobil Robot Modellemesi, Simülasyonu ve Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [14] **Yeşiloğlu, S.M.**, 2006. High Performance Dynamical Modeling of Complex Topology Systems, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] **Rodriguez, G., Kreutz-Delgado, K. and Jain, A.**, 1991. A Spatial Operator Algebra for Manipulator Modeling and Control, *The International Journal of Robotics Research*, **10**, 371-381.
- [16] **Rodriguez, G., Jain, A. and Kreutz-Delgado, K.**, 1992. Spatial Operator Algebra for Multibody System Dynamics, *The Journal of the Astronautical Sciences*, **40**, 27-50.
- [17] **Rodriguez, G. and Kreutz-Delgado, K.** 1992. Spatial operator factorization and inversion of the manipulator mass matrix, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **8**, 65-76.
- [18] **Jain, A. and Rodriguez, G.**, 1993. Linearization of manipulator dynamics using spatial operators, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, **23**, 239-248.
- [19] **Jain, A. And Rodriguez, G.**, 1993, An analysis of the kinematics and dynamics of underactuated manipulators, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **9**, 411 – 422.
- [20] **Jain, A. And Rodriguez, G.**, 2000. Computational robot dynamics using spatial operators, *Proceedings International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, USA, 24-28 April, 843 – 849.
- [21] PowerSonic PS121000 Datasheet, <http://www.powersonic.com/site/doc/prod/103.pdf> (Aralık 2006)
- [22] Applied Motion Products' BLU Series Digital Servo Drives User's Manual, <http://www.applied-motion.com/ampinfo/manuals/blu100-200.pdf> (Aralık 2006)
- [23] Applied Motion Products' Servo Motors Databook http://www.appliedmotionproducts.com/ampinfo/datasheets/Servo_Motors_Databook_B.pdf (Aralık 2006)
- [24] Precision MicroControl Corp. DCX-PCI300 Motion Controller User's Manual, <ftp://ftp.pmccorp.com/pub/pci300/pci300man.zip> (Aralık 2006)

EK A. ROBOT UYGULAMALARINDA UZAYSAL VEKTÖRLER

Robotların kinematik ve dinamik modellemesinde ve problemlerin analizi ve çözümünde, uzaysal vektörler kullanılabilir. Bu vektörlerin kullanımı, bir robot kol örnek alınarak incelenebilir.



Şekil A.1 : Bir robot kola ait vektörel ifadeler

Her bir kol için uzaysal hız aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$V_i = \begin{bmatrix} \vec{\omega}_i \\ \vec{v}_i \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Burada $\vec{\omega}_i$ açısal hız vektörü, $\vec{v}_i$ ise çizgisel hız vektörüdür. $\vec{h}_k$, k kolu için dönme vektörünü, θ_k , k kolunun bağlı olduğu eklemün dönme açısını, $\vec{l}_{k,k+1}$ de iki dönme merkezinin orijinleri arasındaki mesafeyi gösterebilir. Bu değerler kullanılarak, her bir kolun, bir önceki kola bağlı olarak açısal ve çizgisel hız yayılımı aşağıdaki gibi olur.

$$\vec{\omega}_k = \vec{\omega}_{k-1} + \vec{h}_k \dot{\theta}_k \quad (\text{A.2})$$

$$\begin{aligned} \vec{v}_k &= \vec{v}_{k-1} + \vec{\omega}_{k-1} \times \vec{l}_{k-1,k} \\ &= \vec{v}_{k-1} - \vec{l}_{k-1,k} \times \vec{\omega}_{k-1} \\ &= \vec{v}_{k-1} - \hat{l}_{k-1,k} \vec{\omega}_{k-1} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

Bu eşitliklerin matrisel ifadesi aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \vec{\omega}_k \\ \vec{v}_k \end{bmatrix}}_{V_k} = \underbrace{\begin{bmatrix} I & 0 \\ -\hat{l}_{k-1,k} & I \end{bmatrix}}_{\Phi_{k,k-1}} \underbrace{\begin{bmatrix} \vec{\omega}_{k-1} \\ \vec{v}_{k-1} \end{bmatrix}}_{V_{k-1}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \vec{h}_k \\ 0 \end{bmatrix}}_{H_k} \dot{\theta}_k \quad (\text{A.4})$$

$\Phi_{k,k-1}$, hız ifadelerinin yayılım matrisini, H_k dönme/öteleme eksen matrisini göstermektedir. H_k matrisinin üst elemanı dönme eksenine, alt elemanı öteleme eksenine bağlı olarak yazılır. Buna göre, prizmatik eklemler için H_k matrisi

$$H_k = \begin{bmatrix} \vec{0} \\ \vec{h}_k \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

şeklinde, dönel eklemler için de

$$H_k = \begin{bmatrix} \vec{h}_k \\ \vec{0} \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

şeklinde oluşturulur.

k kolu için hız ifadesi aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$V_k = \Phi_{k,k-1} V_{k-1} + H_k \dot{\theta}_k \quad (\text{A.7})$$

(A.7), uç noktasına kadar olan bölüm için düzenlendiğinde

$$V = \Phi H \dot{\theta} \quad (\text{A.8})$$

halini alır.

Uç noktasının hızının bulunabilmesi için, uç noktası yayılım matrisi

$$\Phi_t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & \Phi_{t,n} \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

biçiminde yazılmalıdır. (A.9)'deki 0 matrislerinin sayısı eklem sayısından bir eksiktir.

Uç noktası için genel hız ifadesi

$$V_t = \underbrace{\Phi_t \Phi H}_J \dot{\theta} \quad (\text{A.10})$$

olarak yazılır. (A.10)'daki J , Jacobian matrisidir. Jacobian matrisi ile eklem uzayından (joint space), çalışma uzayına (task space) geçiş yapılmaktadır. Buna göre en genel hız ifadesi aşağıdaki şekilde yazılır.

$$V_t = J \dot{\theta} \quad (\text{A.11})$$

(A.11)'in fiziksel anlamı; eğer eklem hızları biliniyorsa Jacobian kullanılarak uç noktasının hızının hesaplanabileceğidir. Bu, düz kinematik (forward kinematics) olarak da adlandırılmaktadır.

Eğer J matrisinin tersi hesaplanabilirse, uç noktasının belirli bir hızda hareket etmesi için gereken eklem hızları hesaplanabilir. Bu ise ters kinematik (inverse kinematics) problemini tanımlamaktadır.

$$\dot{\theta} = J^{\dagger} V_t \quad (\text{A.12})$$

Jacobian matrisinin tersi 6 serbestlik dereceli sistemler için sorunsuz hesaplanabilmektedir. Altıdan farklı serbestlik dereceleri için Jacobian matrisinin tersinin alınması için ek işlemler uygulamak gereklidir. Bu sebepten, $J^{\dagger}$, Jacobian matrisinin sanal tersi olarak tanımlanabilir.

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Antalya’da doğdu. 1999-2003 yılları arasında Yıldız Teknik Üniversitesinde, Elektrik Mühendisliği eğitimi aldı. 2003 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi’nin, Mekatronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programına kabul edildi.