

PARMAK HAREKETLERİNİ TAKİP EDEN
MEKATRONİK BİR SİSTEMİN
DİZAYNI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Sezcan YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos 2006

DESIGN AND IMPLEMENTATION
OF A MECHATRONIC SYSTEM
TRACKING HUMAN FINGER MOTIONS

Sezcan YILMAZ

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

August 2006

PARMAK HAREKETLERİNİ TAKİP EDEN
MEKATRONİK BİR SİSTEMİN
DİZAYNI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Sezcan YILMAZ

Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon-İmalat Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd.Doç.Dr.Naci ZAFER

Ağustos 2006

Sezcan YILMAZ' in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “PARMAK HAREKETLERİNİ TAKİP EDEN MEKATRONİK BİR SİSTEMİN DİZAYNI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye : Yrd.Doç.Dr.Naci ZAFER

Üye : Prof.Dr.Soner ALANYALI

Üye : Yrd.Doç.Dr.Macid NURBAŞ

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmayla operatörün parmak pozisyonunu temassız olarak takip edebilen gerçek bir mekatronik sistem tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Parmak pozisyonundaki değişimler mikrokontrolör temelli halka şeklindeki bir sensör sistemi vasıtasıyla bulunmakta ve alınan verilerle unipolar bir step motor vasıtasıyla sürülen bir serbestlik dereceli bir cihaz kontrol edilmektedir.

Toplanan deneysel verilerden tasarlanan sistemin oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Eldeki sistemin operatörün parmak hareketlerini maksimum 120 mm/s'ye kadar olan hızlarda başarılı bir şekilde takip edebildiği gösterilmiştir.

SUMMARY

This work presents the design and implementation of a genuine mechatronic system enabling contact free tracking of an operator's finger position. The variation in finger-position is detected by means of a micro-processor-based ring-shaped optical sensing system and the obtained data is then used to actuate a one DOF device driven by a unipolar stepper motor. The radius of the ring is made larger than that of the finger and collision of the finger with the ring is prevented by the controller forcing the device follow the motions of the finger.

Experimental data collected is presented to illustrate the effectiveness of the designed system. It is shown that the current system is able to track the position of the operator's finger at the maximum speed of 120mm/s.

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu çalışma sırasında bana büyük destek veren danışmanım ve tez hocam olan Sayın Y.Doç.Dr. Naci ZAFER'e teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Çalışma süresince, bana büyük destek veren Sayın Murat KASAP, Mustafa ULUTAN ve Yılmaz YÖRÜ'ye, ve tabii ki manevi destekleriyle her zaman arkamda olan aileme sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Saygılarımla...

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
1.GİRİŞ	1
2. SİSTEM YAPISI	5
2.1. Kontrol Kartı	6
2.1.1. Mikrokontrolör	8
2.1.2. A/D dönüştürücü	10
2.1.3. Güç ünitesi	11
2.1.4. LCD gösterge	11
2.1.5. Tuş takımı	12
2.1.6. Eksen limit anahtarları(switch)	12
2.2. Sensör Sistemi	13
2.2.1. Port yapısı	14
2.2.2. Kullanılan devre elemanlarının seçimi	15
2.2.3. Sensör sisteminin boyutlandırılması	17
2.2.4. Optik özellikler	18
2.3. Hareket Sistemi	19
3. YAZILIM	21
3.1. Başlangıç İşlemleri ve Tanımlamalar	21
3.2. Ana Program Blokları	23
3.2.1. Sıfırlama	23
3.2.2. Menü	24
3.2.3. Dört serbestlik derecesinde konum okuma (Mod1)	25
3.2.4. İki serbestlik derecesinde konum okuma ve hareket takibi (Mod2)	26
3.2.5. Bir serbestlik derecesinde hızlı hareket takibi (Mod3)	27
3.3. Alt Program Blokları	28
3.3.1. Hücrelerden veri okuma	29
3.3.2. Hücre verilerinden konum değerlerinin hesaplanması	31

İÇİNDEKİLER(devam)

	<u>Sayfa</u>
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	32
4.1. Sürekli Harekette Hareket Takibi	33
4.2. Ani Duruş Kalkışlı Harekette Hareket Takibi	35
4.3. Ani Yön Değişirmeli Harekette Hareket Takibi	37
4.4. Konum Hatalarının Nedeni	39
5. SONUÇ VE TARTIŞMA	40
KAYNAKLAR DİZİNİ	42

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Fiber optik algılayıcı(Yoshikawa and Nagura, 1997, 2001).....	2
Şekil 1.2: Manyetik KGB'li joystick(Salcudean and Parker, 1997).	2
Şekil 1.3: Phantom tm 1.0 cihazı (Hayward, et al., 2004).	3
Şekil 1.4: Master II cihazı (Bouzit , et al., 2002).	3
Şekil 1.5: Tasarlanan temassız takip cihazı.	4
Şekil 2.1: Başlangıçta düşünülen sensör sistemi(Kasap, et al., 2004).....	5
Şekil 2.2: Sensör sistemi.	6
Şekil 2.3: Sistemin blok diyagramı.	6
Şekil 2.4: Kontrol kartı devre şeması.	7
Şekil 2.5: Kontrol kartı.	8
Şekil 2.6: PIC16F877'nin pin diyagramı (PIC16F877'nin Datasheet'inden).....	9
Şekil 2.7: Sistemde kullanılan tuş takımı.	12
Şekil 2.8: Sensör sisteminin baskı devresi ve montaj şeması.....	13
Şekil 2.9: Bir sensör hücresi.	14
Şekil 2.10: 3mm'lik LED ve foto-transistorun boyutları.	17
Şekil 2.11: Sensör sisteminin önemli çap ölçüleri.	18
Şekil 2.12: LED'lerin gönderdiği teorik ışık huzmesi	19
Şekil 2.13: Kullanılan mekanik sistem.	19
Şekil 2.14: Unipolar step motor.	20
Şekil 2.15: Unipolar step motor temel sürücü devresi.	20
Şekil 3.1: Sıfırlama program bloğu akış şeması.....	24
Şekil 3.2: Menü program bloğu akış şeması.	25
Şekil 3.3: Mod1 akış şeması.....	25
Şekil 3.4: Mod2 akış şeması.....	26
Şekil 3.5: Mod3 akış şeması.....	27
Şekil 3.6: Parmak konum verilerinin oluşturulması program bloğu akış şeması.....	28
Şekil 3.7: Göz hücrelerinin adlandırılması.....	29
Şekil 3.8: Hücrelerden veri okuma program bloğu akış şeması.....	30
Şekil 3.9: Sensör sisteminin koordinat eksenleri.....	31

ŞEKİLLER DİZİNİ(devam)

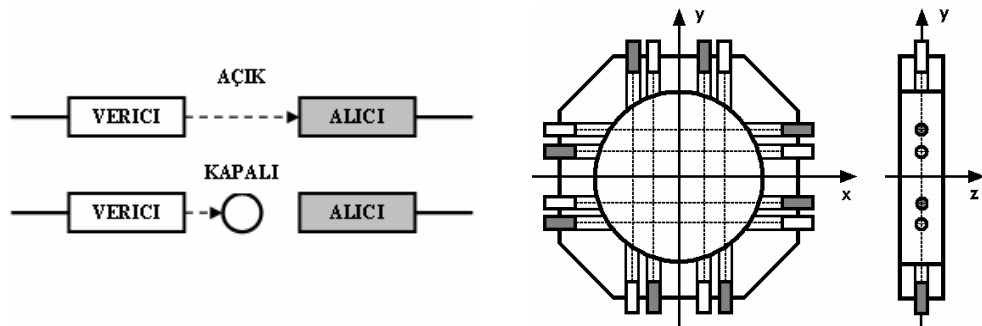
	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.1: Cihazın parmak takibi.	32
Şekil 4.2: Sürekli harekette konum'un zamana bağlı değişimi.	33
Şekil 4.3: Sürekli harekette hız'ın zamana bağlı değişimi.	34
Şekil 4.4: Sürekli harekette ivme'nin zamana bağlı değişimi.	34
Şekil 4.5: Sürekli harekette konum hatası'nın zamana bağlı değişimi.....	35
Şekil 4.6: Ani duruş kalkışlarda konum'un zamana bağlı değişimi.....	35
Şekil 4.7: Ani duruş kalkışlarda hız'ın zamana bağlı değişimi.....	36
Şekil 4.8: Ani duruş kalkışlarda ivme'nin zamana bağlı değişimi.....	36
Şekil 4.9: Ani duruş kalkışlarda konum hatası'nın zamana bağlı değişimi.	37
Şekil 4.10: Ani yön değiştirmelerde konum'un zamana bağlı değişimi.	37
Şekil 4.11: Ani yön değiştirmelerde hız'ın zamana bağlı değişimi.	38
Şekil 4.12: Ani yön değiştirmelerde ivme'nin zamana bağlı değişimi.	38
Şekil 4.13: Ani yön değiştirmelerde konum hatası'nın zamana bağlı değişimi.....	39

1.GİRİŞ

Bu çalışmada operatörün parmağının konum değişimini takip eden özgün mekatronik bir sistemin tasarımı gerçekleştirilmiş olup, sistemin inşa'sı ile de dizayn edilen sistemin uygulanabilirliği gösterilmiştir. Operatörün parmağının konumundaki değişimler bir sensör sistemi ve buna bağlı olan bir mikrokontrolör yardımıyla tespit edilerek, sistemin bağlı olduğu hareketli platformun kontrolünü sağlamıştır. Burada en önemli nokta hareket takibi esnasında parmak ve hareketli sistem arasında hiçbir fiziksel temas olmamasıdır.

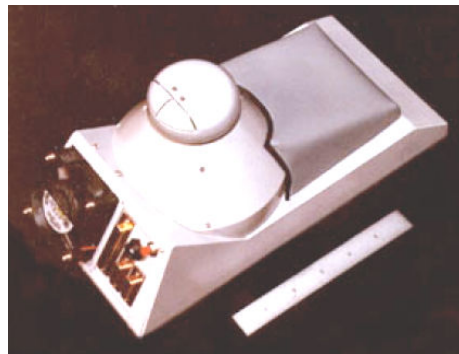
Robotik uygulamalarında benzer çalışmalar daha öncede yapılmıştır. Bu çalışmalarda birbirinden çok farklı çalışma prensibine sahip sistemlere rastlanmaktadır. Bunlardan en çok rastlananlar kuvvet sensörü kullanılanlardır. Bunların yanında kamera kullanarak çekilen görüntülerin resim işleme teknikleriyle yorumlama suretiyle yapılan sistemlerde vardır. Bazı sistemlerde ise çalışma prensibi olarak manyetik alan kuvvetinin değişiminden yararlanılmıştır. Tüm bu yöntemleri kullanılarak yapılmış cihazların belli başlı örnekleri "Haptic Interfaces and Devices" başlıklı bir çalışmada incelenmiştir (Hayward, et al., 2004).

Bu alandaki önemli çalışmalardan birini Yoshikawa and Nagura (1997, 2001) rapor etmiştir. Bu çalışmada fiber sensörler kullanılarak Şekil 1.1'de görülen sensör sistemi yapılmış ve bu sistemin bağlı olduğu hareketli platformun kontrolü sağlanmıştır. Sistemin çalışması karşılıklı olarak yerlertirilen fiber optik alıcı ve vericinin araya bir cisim girmesi ile arasındaki optik bağlantının kopması, bu cismin oradan ayrılmasıyla yeniden anahtarlamının sağlanması prensibine dayanmaktadır. Bir halka üzerine sistematik olarak yerleştirilen 8 gurup sensörden meydana gelen sensör sistemi operatörün parmağının 2 serbestlik derecesinde konum değişimini okumaktadır. Ancak bu sensör sisteminin her yönde sadece 2 anahtarlama kademesi mevcuttur. Operatörün parmağı bu iki anahtarlama kademesini de aşip halkanın sınırına dayandığında ise sistem üzerindeki kuvvet sensörlerini devreye sokarak konum takibinin yanında kuvvet sensöründen alınan verilerin işlenip geri-beslenmesiyle de kontrol sistemini yönlendirmektedir.



Şekil 1.1: Fiber optik algılayıcı(Yoshikawa and Nagura, 1997, 2001).

Bir diğer çalışma Salcudean and Parker (1997) tarafından gerçekleştirilmiş olup bu çalışmada yapılan cihaz Şekil 1.2’de görülmektedir. Bu cihaz 6 serbeslik dereceli ve manyetik kuvvet geri-besleme (KGB) sağlayabilen bir joystick olarak tasarlanmıştır. Konum okumasını LED’ler ve foto diyotlardan oluşan bir sensör sistemiyle yapmaktadır. Kuvvet geri-besleme manyetik alan kuvvetinden yararlanılarak sağlanmaktadır. Berkelman, et al. (1999) tarafından yapılan cihazda çalışma prensibi olarak bu cihazla büyük benzerliklere sahiptir.



Şekil 1.2: Manyetik KGB’li joystick(Salcudean and Parker, 1997).

Bir diğer çalışma Massie and Salisbury (1994) tarafından SensAble Technologies Inc.’te gerçekleştirilmiş olup kullandıkları sistem Şekil 1.3’te görülmektedir. Bu sistem ise ticari ismi “Phantomtm” olan tersten sürülebilir küçük bir robotik kolla gerçekleştirilmiştir (Massie and Salisbury, 1994). Bu kolda operatör parmağının robotik kolun son efektörünü fiziksel kuvvet uygulayarak hareket ettirmesi sonucunda robotik kolun son efektörünün konumu ve oryantasyonundaki değişmeye

bakılarak parmağın konum değişimi belirlenmektedir. 3 serbeslik derecesine sahip olan sistem üzerinde bulunan kuvvet sensörleri sayesinde KGB özelliğine de sahiptir.



şekil 1.3: Phantom™ 1.0 cihazı (Hayward, et al., 2004).

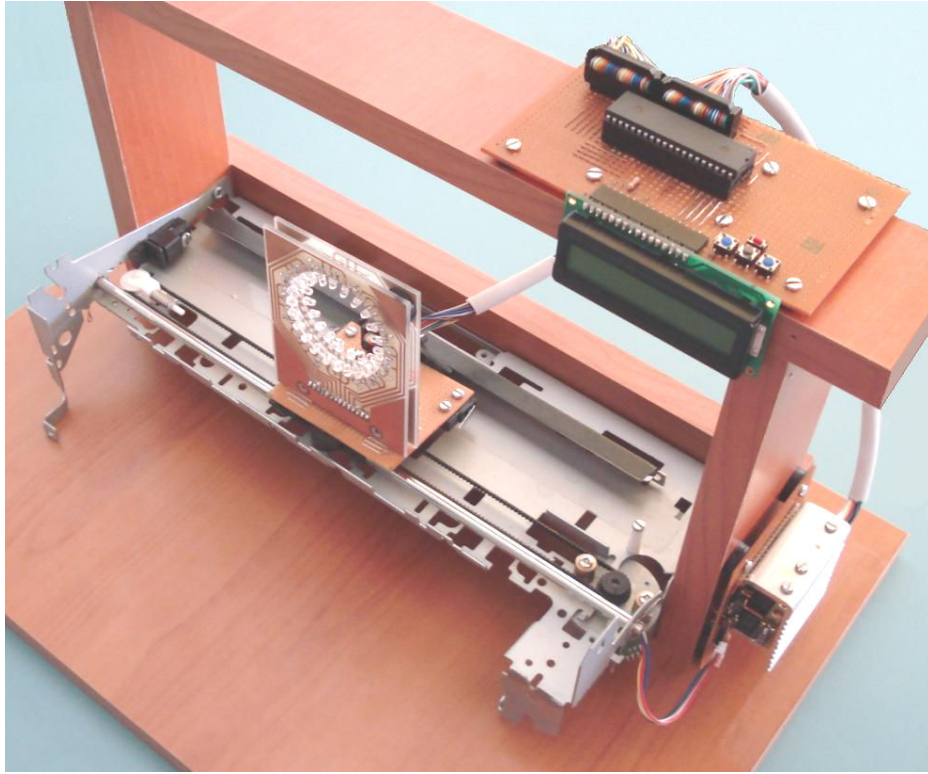
Bir diğer alışma Gomez, et al. (1995) tarafından Rutgers Üniversitesinin İnsan-Makine Arayüzü Laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup bu çalışmada tasarlanan cihaz şekil 1.4'te görölmektedir. Bu cihaz direkt olarak insan eline giydirilen ve tutma hissi veren bir cihazdır.



şekil 1.4: Master II cihazı (Bouzit , et al., 2002).

Genel olarak bu tip bir sistemler ortamdaki fiziksel tepkileri de hissederek cihazların ya da makinelerin uzaktan kontrolünde, görsel bir ortamda gerçeklik hissi almakta, imalat tezgâhlarının kalibrasyonunda, vb. uygulamalarda kullanılabilir.

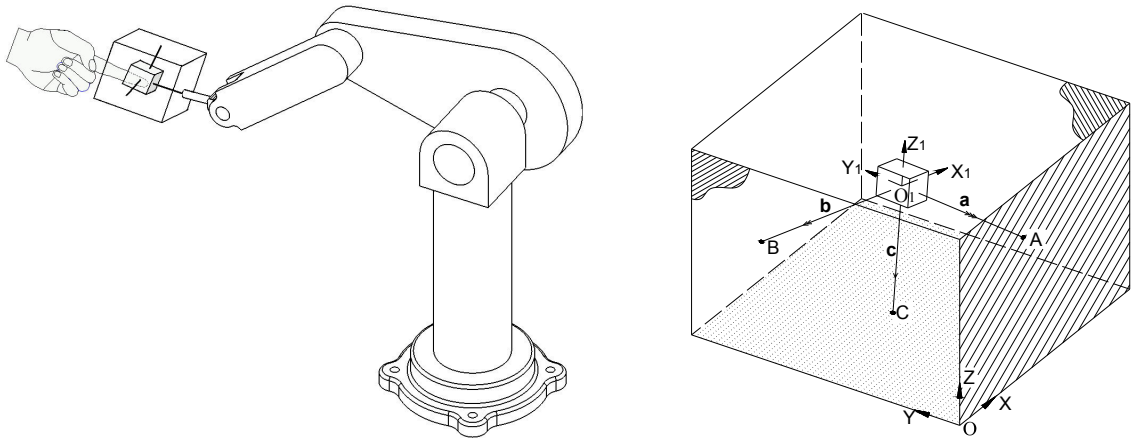
Bu tezde sunulan çalışma ile yukarıdakilerden farklı olarak temassız hareket takibini mümkün kılan Şekil 1.5'te görülen sensör sistemi tasarlanmıştır. Yoshikawa and Nagura'nın (1997) tasarladıkları sensör sisteminde 2 serbestlik derecesinde temassız hareket takibi yapabilen bir sistem ancak anahtarlama prensibi ile çalıştığından dolayı yeterince hassas hareket takibi mümkün değildir. Geliştirilen sensör sistemi ile 4 serbestlik derecesinde temassız konum algılaması mümkün kılınmış olup, örnek olarak tek eksenli hareket kontrolü ile geliştirilen sistem test edilmiştir. Her ne kadar tek eksenli olarak oluşturulan deneysel platform yetersiz ise de, sistemin genelleştirebileceğini gösterir bir uygulamadır. Bunun yanında sistemde kuvvet sensörü bulunmadığından dolayı yukarıda bahsedilen diğer örneklerde var olan KGB şu an için bu sistemde yoktur. Ancak cihaza eklenen birkaç kuvvet sensörü yardımıyla bu özelliğe kazandırılabilir durumdadır. Ayrıca sensör sisteminin sahip olduğu 4 serbestlik derecesi sensör sistemine yapılan küçük bir ilave ile 5 serbestlik derecesine çıkartılabilir durumdadır.



Şekil 1.5: Tasarlanan temassız takip cihazı.

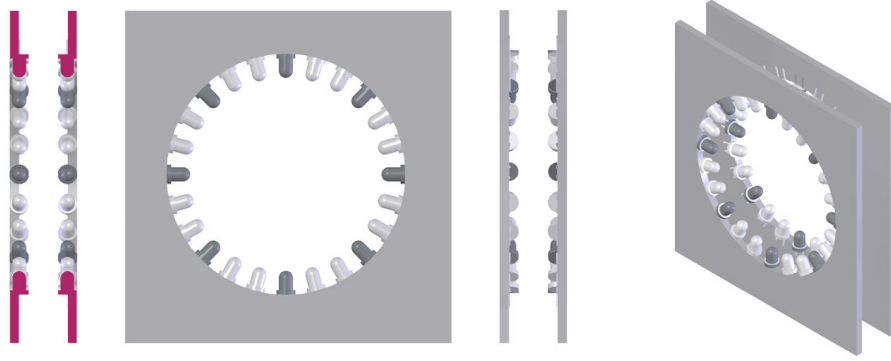
2. SİSTEM YAPISI

Dizayn aşamasının ilk safhasında kullanıcının parmağından 3 eksende ışık yayan (laser kaynaklı) foto ışık yayıcılar tasarlanmış ve her bir yönde ilerleyen ışınların konum algılayabilen birbirine dik üç eksendeki sensör yüzeylerinde karşılanması düşünülmüştür (Kasap, et al., 2004). Bu şekilde lazer ışık kaynağının konumuna bağlı olarak hem sensör yüzeyleri üzerinde farklı konumlarda voltaj elde edilmesi ve hem de parmağın yüzeye uzaklığı ile sensör yüzey üzerinde aynı konumda bile farklı değerlerde voltaj ölçülebilmesinin mümkün olacağı ön görülmüştür. Düşünülen bu sistemin prensip şekli Şekil 2.1'de görülmektedir. Ancak sensör yüzeylerinin imalatı veya bulunması imkân dâhilinde olmadığı için bu tasarım aynı objektif göz önünde bulundurularak değiştirilmiştir.



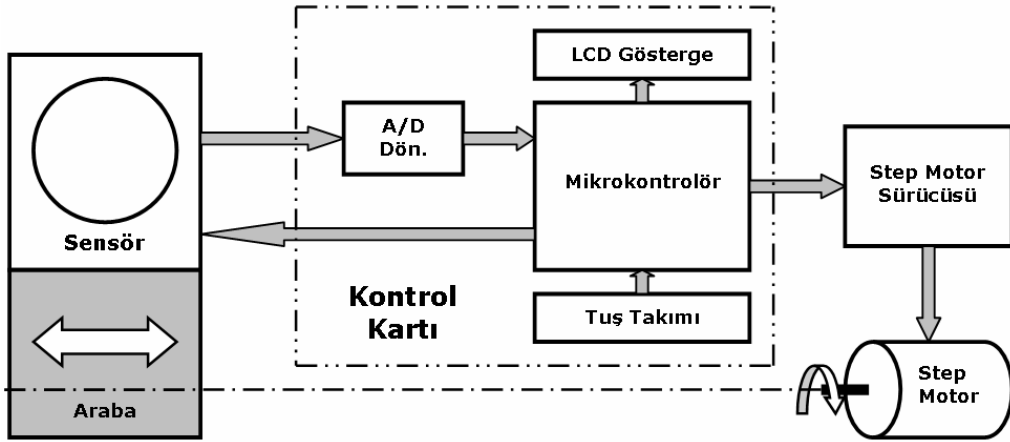
Şekil 2.1: Başlangıçta düşünülen sensör sistemi(Kasap, et al., 2004).

Gerçekleştirilen tasarım Şekil 2.2 'de görüldüğü gibi, LED ışık yayıcılar ve foto-transistörlerin belirli bir düzende yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Sistemin temel çalışma prensibi takibi yapılacak ya da konumu okunacak olan operatör parmağına LED'ler vasıtasıyla ışık göndermek sonrada parmak üzerinden yansıyan ışığın seviyesinin foto-transistörler vasıtasıyla ölçülerek elde edilen verilerin bir mikrokontrolör vasıtasıyla yorumlanması esasına dayanmaktadır.



Şekil 2.2: Sensör sistemi.

Tasarlanan sistemin prensip diyagramı Şekil 2.3'te görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi cihaz temel olarak; sensör sistemi, sistemin kontrolünü sağlayan kontrol kartı, motor sürücüsü ve motor-araba ikilisinin oluşturduğu mekanik aksamdan oluşmaktadır.



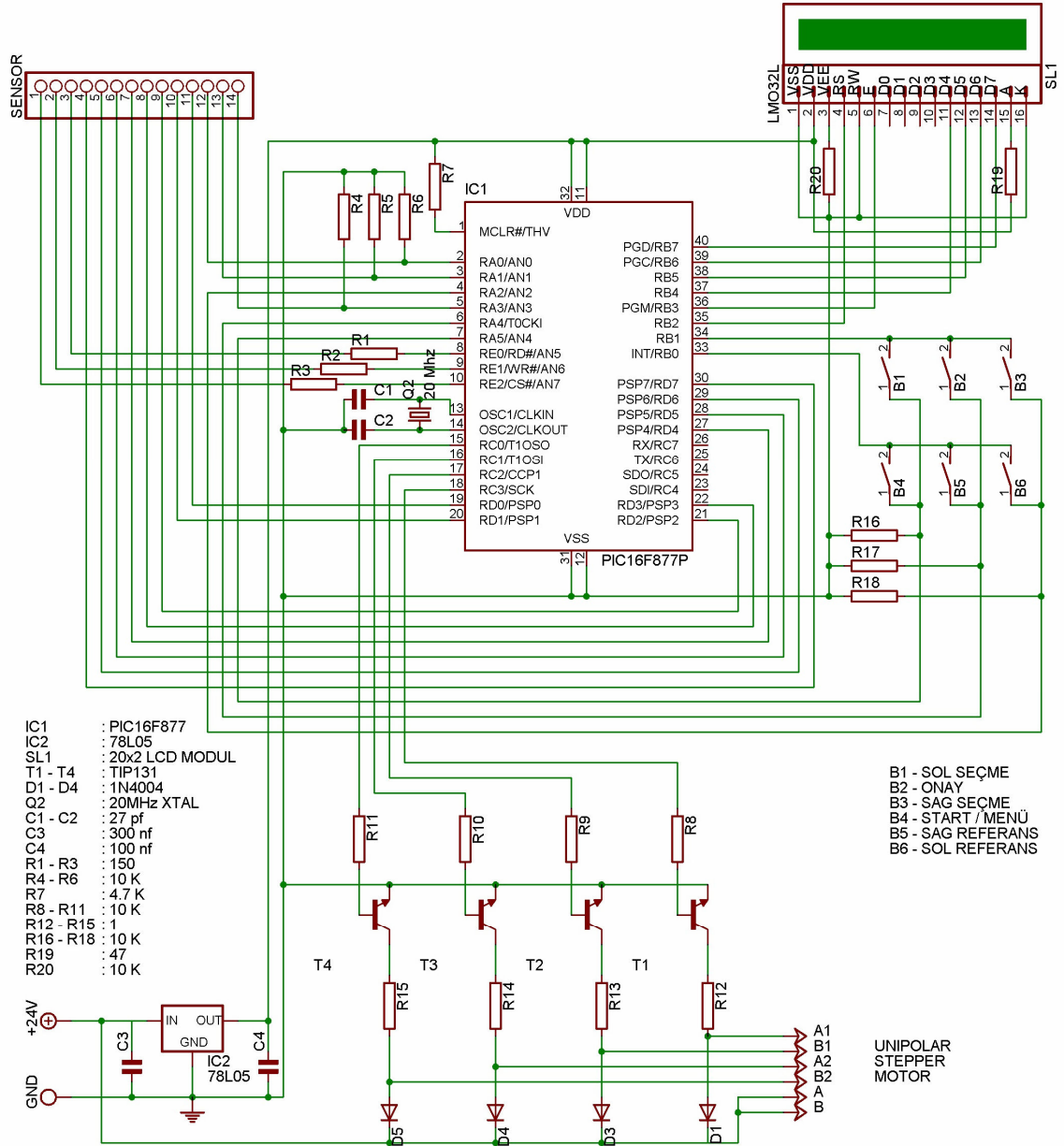
Şekil 2.3: Sistemin blok diyagramı.

Sistemi ayrıntılı olarak incelemeye Kontrol Kartından başlanılacaktır. Zira sensörle ilgili bilgi verilirken kontrol kartına değinilmesi gerekmektedir.

2.1. Kontrol Kartı

Kontrol kartı sistemi yöneten birimdir. Sensörden gelen analog verileri üzerinde bulunan mikrokontrolör için anlamlı dijital veriler haline dönüştürür. Anlamlı hale getirilen bu veriler mikrokontrolörün yazılımı vasıtasıyla yorumlanır. Yorumlama

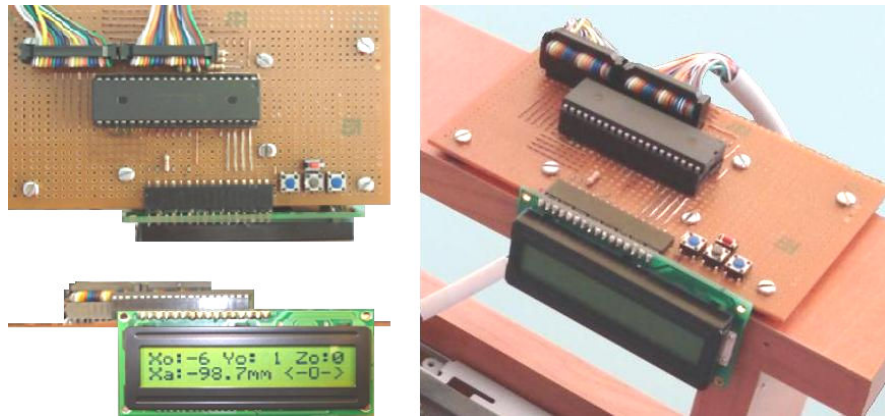
sonucunda gerekirse step motor sürücüsüne sinyaller gönderilerek step motor vasıtasıyla mekanik sisteme hareket verilir. Kontrol kartının diğer bir görevi ise eksen üzerinde bulunan limit anahtarları kontrol etmek ve mekanik eksen dışına taşan eksen hareketlerini engellemektir. Şekil 2.4'te kontrol kartının devre şeması görülmektedir.



Şekil 2.4: Kontrol kartı devre şeması.

Kontrol kartı Şekil 2.3'te de görüldüğü üzerinde birkaç birim barındırmaktadır. Bu birimler; sistemin beyni diyebileceğimiz mikrokontrolör, sensörden alınan analog verileri dijital bilgilere çeviren bir Analog/Dijital dönüştürücü, güç ünitesi, bilgi sağlayıcı bir LCD gösterge, gerektiğinde sisteme müdahale edebileceğimiz bir tuş takımı ve mekanik eksen dışına taşan eksen hareketlerini engelleyen limit anahtarlarıdır.

Şekil 2.5'te görüldüğü üzere kontrol kartı delikli bir plaka üzerine kurulmuştur. Bunun nedeni tasarım aşamasında birçok değişikliğe müsaade edebilen bir yapı olması. Böylece sistemin geliştirilmesi esnasında kontrol kartından kaynaklanan problemler kolaylıkla giderilebilmiştir.



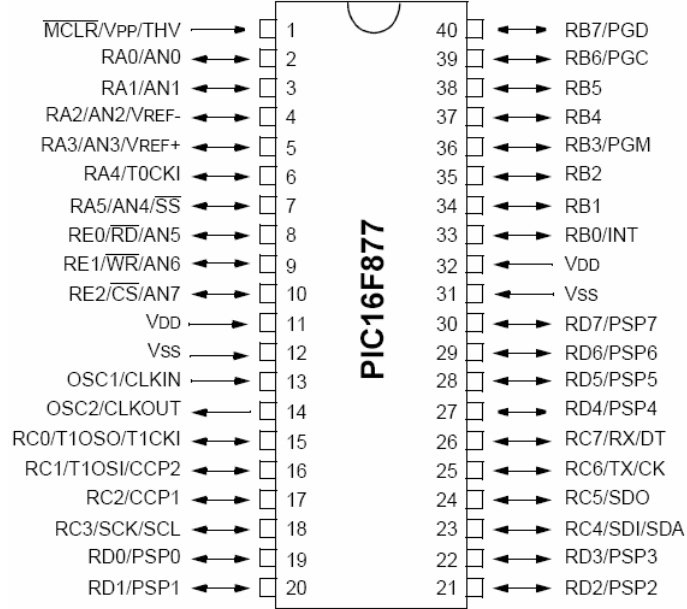
Şekil 2.5: Kontrol kartı.

2.1.1. Mikrokontrolör

Kontrol kartının yerine getirdiği tüm işlemleri kontrol eden yapı, kart üstündeki PIC16F877 mikrokontrolör ünitesidir. Bu entegre 20MHz çalışma frekansı, 8Kx14 word Flash ROM program belleği, 256 byte EEPROM Belleği, 368 x 8 byte kullanıcı RAM'ı, 8 kanal 10 bit A/D dönüştürücüsü, 33 I/O pini v.b. özellikleri ile sistemin gereksinimlerini fazlasıyla karşılamaktadır.

PIC16F877 mikrokontrolörü yaygın olarak kullanılıyor olmaları, kolayca programlanabilmeleri, sağladıkları pin sayısının fazla olması, çalışma frekansının

benzerlerine oranla yüksek olması ve piyasada bu özellikleriyle en ucuz bulunan mikrokontrolör olması sebebiyle tercih edilmiştir.



Şekil 2.6: PIC16F877'nin pin diyagramı (PIC16F877'nin Datasheet'inden).

Şekil 2.4'te kontrol kartı devre şemasında da görüldüğü üzere entegremizin neredeyse tüm pinleri kullanılmaktadır. Portların hangi amaçlarla kullanılmak üzere yapılandırıldığına bakacak olursak:

- RA0, RA1, RA3** :Analog veri okuma pini
 - RA2, RA4, RA5** : Tuş takımından Dijital veri okuma pini
 - RB0, RB1** : Tuş takımına veri gönderme pini
 - RB2** : LCD Register pini
 - RB3** : LCD Enable pini
 - RB4 – RB7** : LCD Data pinleri
 - RC0 – RC3** : Step motor kontrol devresine giden pinler
 - RD0 – RD7** : Okunacak sensör hücresi seçim pinleri
 - RE0 – RE2** : Okunacak sensör gözü seçim pinleri
- olarak yapılandırılmışlardır.

2.1.2. A/D dönüştürücü

Sistemde kullanılan A/D dönüştürücü kullanılan mikrokontrolör üzerinde bütünleşiktir. Yani sisteme ayrıca bir A/D dönüştürücü eklenmemiştir. Zaten mikrokontrolör seçiminde bu hususa özellikle dikkat edilmiştir. Mikrokontrolör üzerindeki bütünleşik A/D dönüştürücü A portunda 5 ve E portunda 3 olmak üzere toplam 8 kanaldan 10 bit çözünürlükte dönüşüm yapabilmektedir. Tasarlanan sensör sistemi 3 kanala ihtiyaç duymaktadır. Bundan dolayı mikrokontrolör yapılandırılırken analog olarak yapılandırılabilir pinlerden sadece 3 tanesini analog giriş olarak yapılandırılmış kalan 5 pin ise dijital olarak yapılandırılmıştır. RA0, RA1 ve RA3 pinleri analog giriş olarak yapılandırılan pinlerdir. Çözünürlük ise 8 bit olarak seçilmiştir. Yapılan testler sonucunda 8 bit'ten daha yüksek bir çözünürlüğün kurulu olan tek eksenli temassız parmak takibi sistemine herhangi bir hassasiyet katmadığı tespit edilmiştir. Ancak sistemin parmak takibi değil de daha hassas bir işlem olan parmak freze ucu sıfırlama gibi bir işte kullanılacak olması durumunda buradaki çözünürlüğün yüksek seçilmesi zorunlu hale gelmektedir.

PIC 16F877'nin A/D dönüştürücüsünün çalışma prensibine de kısaca değinecek olursak. PIC16F877'ye gelen analog girdi örneği bir kondansatöre yüklenir. Daha sonra bu örneklem için kondansatörde oluşan değeri (dolum süresi, seviyesi ve sıcaklık değişkenlerinden yola çıkarak) dönüştürücüsüne girdi olarak okur. A/D dönüştürücü girişte alınan örneğin seviyesine göre oldukça başarılı bir yaklaşıklıkla alınan bu analog veriyi 10 bit çözünürlükte dijital veriye dönüştürür (Gardner, 1997).

PIC 16F877'nin A/D dönüşüm işlemi yaparken analog verinin alınması esnasında örnekleme zamanı da önemlidir. Örnekleme zamanının belirlenmesinde PIC 16F877'nin kullanım kılavuzundaki A/D Dönüşüm Gereksinimleri tablosundan faydalanılmıştır. Örnekleme zamanının seçiminde önemli iki faktör vardır. A/D dönüşümünde kullanılacak osilatör tipi. İkincisi ise ne kadar hassas bir ölçüm sonucu istenildiği ile ilgilidir. Tasarlanan cihazda A/D dönüşüm osilatörü olarak RC osilatör tercih edilmiş ve ölçüm hassasiyeti olarak ta standart bir ölçüm hassasiyeti seçilmiştir. Bu durumda tablodan yaklaşık 48µs'lik bir örnekleme zamanı kullanılması gerektiği

görülmüştür. Yazılımda buna yakın bir değer olan 50 μ s'lik bir örnekleme zamanını kullanılmıştır.

2.1.3. Güç ünitesi

Kontrol kartında güç ünitesi olarak L7805 voltaj regülatörü entegreli bir devre kullanılmaktadır. Sistemde bulunan step motorun çalışma gerilimi 24V olduğu için devreye bu gerilimin uygulanması gerekmektedir. Ancak kontrol kartı üzerindeki devre 5V'lık bir gerilimle çalışmaktadır. Bu durumda 24V'luk gerilimin 5V'ta düşürülmesi gerekmektedir. Bu işlem en kolay voltaj regülatör entegreleri vasıtasıyla gerçekleştirilebilir. L7805 entegresi girişine uygulanan 8-20 V'lık gerilimi çıkışında çekilen akıma ve çalışma sıcaklığına da bağlı olarak 4.65 – 5.35 V değerleri arasındaki bir değerde sabit tutmaktadır. Maksimum 1.5A akım çekilebilen bu entegreden çekilen akımın düşük olması durumunda girişine uygulanan gerilimin artışı çalışma karakteristiklerini bozmaz. Kendi içerisinde karmaşık bir yapıya sahip olan bu entegreler çalışmak için Şekil 2.4'teki kontrol kartı devre şemasında gösterilen basit devreye ihtiyaç duymaktadır.

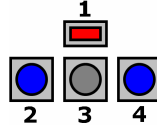
2.1.4. LCD gösterge

LCD gösterge kontrol kartından elde edilen verilerin görüntülenmesinde kullanılmaktadır. Sistemde Şekil 2.5'te gösterilen 2 satır x 16 karakter çözünürlüğe sahip olan ACM1602L serisi LCD modül kullanılmaktadır. Modül tercih edilmesinin en önemli sebebi görüntülemenin oldukça kolay olarak yapılabilmesidir. Modüle görüntülenmek üzere gönderilen veri modül tarafından alınıp muhafaza edilerek ekranda gösterilmesi sağlanır ayrıca yeni bir veri gelinceye kadar aynı veri modül tarafından görüntülemeye devam edilir.

Sistemde LCD göstergeye PIC'in B portundan veri gönderilmektedir. B portunun 2 numaralı pini LCD Register pini, 3 numaralı pini LCD Enable pini ve 4-7 numaralar arasındaki pinleri ise LCD Data pinleri olarak tanımlanmış ve devre bu şekilde monte edilmiştir.

2.1.5. Tuş takımı

Kontrol kartı üzerinde bulunan tuş takımı 4 buton (düğme)'den meydana gelmektedir. PIC'in A portunun 2, 4 ve 5. pinleri ile B portunun 0 ve 1. pinleri bu tuş takımını kontrol etmek üzere yapılandırılmış ve butonlar devreye buna göre monte edilmişlerdir. Buradaki 5 pinden A portu üzerinde olanlar giriş ve B portu üzerinde olanlar çıkış olarak yapılandırılmıştır. Buradan [3 pin giriş x 2 pin çıkış] çarpımından 6 butonun kontrol edilebileceği görülmektedir. Bu 6 butondan 4'dü tuş takımı butonu ve 2 tanesi eksen limit anahtarı olarak kullanılmıştır.



Şekil 2.7: Sistemde kullanılan tuş takımı.

Tuş takımı üzerinde yer alan tuşların işlevleri;

- **Buton 1:** Başlatma ve menü butonu olup cihazın çalışması esnasında herhangi bir anda bu butona basılmasıyla sistem durup ekranda menü çıkar ve bu menüden aktif çalışma modu değiştirilebilir.
- **Buton 2:** Sol seçim butonu olup ekranda menü aktifken çalışır. Menüde seçim yapılmasına yardımcı olur.
- **Buton 3:** Onay butonu olup buda yine menü aktifken çalışır. Menüde seçme butonları ile seçilen seçeneğin onaylanıp işleme konulmasını sağlar.
- **Buton 4:** Sağ seçim butonu olup yine sol seçim butonu ile aynı işleve sahiptir.

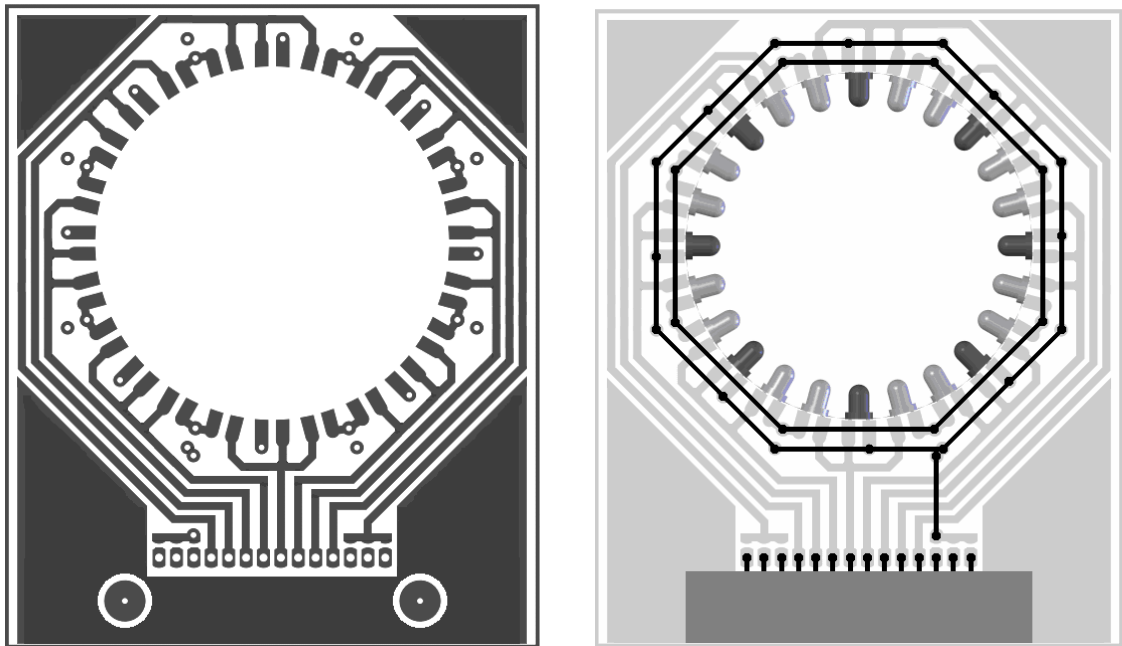
2.1.6. Eksen limit anahtarları(switch)

Eksen limit anahtarları mekanik eksen dışına taşan eksen hareketlerini engellemek amacıyla sensör sistemini üzerinde taşıyan ve step motor tarafından tahrik edilen arabanın sağ ve sol yanlarına birer tane olmak üzere uygun biçimde monte edilmiştir. Bunlar sistemin çalışması esnasında sürekli kontrol edilerek arabanın mekanik eksen sınırları içerisinde çalışması sağlanmaktadır. Aynı zamanda ilk açılışta kontrol sisteminin arabanın konumunu ve çalışma ekseninin sıfırını belirleyebilmesi için

sağ eksen sınırından referans alması gerekmektedir. Referans alma işleminde de bu anahtarlardan yararlanılmaktadır. Tuş takımı incelenirken de bahsedildiği üzere anahtarlar kontrol kartı bünyesinde tuş takımına bütünleşik bir şekilde çalışmaktadırlar. Yani aynı pinleri kullanmaktadırlar.

2.2. Sensör Sistemi

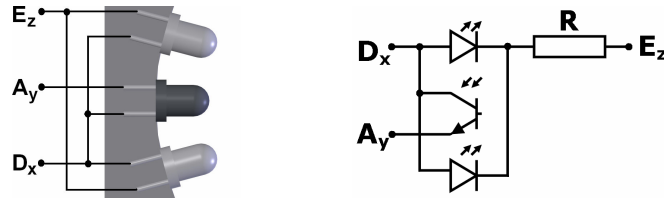
Sensör sistemi LED ışık yayıcılar ve foto-transistörlerin belirli bir düzende yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Sensör sistemine ait baskı devre ve montaj şeması Şekil 2.8’de görülmektedir. Şekilde koyu renkli elemanlar foto-transistörleri, açık renkli elemanlar ise LED’leri temsil etmektedir. Sensör sistemi bunun gibi birinden bağımsız iki gözün belirli bir mesafeyle birbirine paralel olarak arka arkaya yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur.



Şekil 2.8: Sensör sisteminin baskı devresi ve montaj şeması.

Gözlerin her biri birinden bağımsız olarak çalışan 8'er hücreden meydana gelmektedir. Şekil 2.9'da sensör sisteminin bir hücresi görülmektedir. Bu hücrenin bağımsız olarak incelenmesiyle sensör sisteminin bütünü de kolayca anlaşılabilir. Bir hücre iki LED ve bir foto-transistörden oluşmaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi

LED'ler paralel olarak bağlanmış ve foto-transistorun kollektör bacağı da LED'lerin anoduna bağlanmıştır.



Şekil 2.9: Bir sensör hücresi.

2.2.1. Port yapısı

LED'lerin anotları ve foto-transistörün kollektör bacağına bağlı ortak hat D_x olarak adlandırılmıştır. Her hücrelerin D_x ucu mikrokontrolörün D portunun farklı bir pinine bağlanmıştır. Bu adlandırmada D, hücrenin bu ucunun D portuna bağlandığını x indisi ise hücrenin D portunun hangi pinine bağlandığını göstermektedir. Mikrokontrolörün D portundan sensörün hangi hücrelerinin aktif hale getirileceği seçilmektedir. Bir hücrede bu ucun lojik 0 olması o hücrenin pasif olduğunu lojik 1 olması ise o hücrenin aktif olduğunu göstermektedir.

Bir göz üzerindeki tüm hücrelerin A_y uçları bir birleriyle birleştirilmiştir. Bir gözden ortak bir tek A_y ucu çıkmaktadır. Bu uç ise ait olduğu gözün hücrelerinden alınan analog veriyi mikrokontrolöre gönderen uçtur. Mikrokontrolörün A portunun y indisi ile belirtilen pinine bağlanmaktadır. Hangi göz üzerindeki bir hücreden veri okunacağını belirlemede kullanılır. Hangi gözden veri okunacaksa mikrokontrolörün ilgili A/D dönüştürücü kanalı veri okumak üzere aktif hale getirilir.

A_y uçlarına benzer şekilde bir göz üzerindeki tüm E_z uçları da birleştirilmiştir. Bu uç ise ait olduğu gözün LED'lerinin çalışmasını sağlar. LED'lerin devresini tamamlayarak aynı anda sadece bir gözün bir hücreindeki LED'lerin aktif hale getirilmesi sağlar. Bir gözde bu ucun lojik 1 olması o gözün pasif olduğunu lojik 0 olması ise o gözün aktif olduğunu göstermektedir. A_y ile E_z uçları senkronize bir

şekilde çalışırlar. Sensörün veri alabilmesi için aynı anda her ikisinin de aynı gözü aktif hale getirmesi gerekmektedir.

2.2.2. Kullanılan devre elemanlarının seçimi

Daha öncede bahsedildiği gibi sensörü oluşturan iki temel devre elemanı bulunmakta. Bunlar foto-transistör ve LED'dir. Bu iki devre elemanının yanında birde LED'lerin akın sınırlama dirençleri mevcuttur.

Optik alıcı eleman seçiminde birkaç alternatif seçenek mevcuttur bunlar foto-direnç, foto-diyot ve foto-transistördür. Sensörde algılama elemanı olarak foto-transistör tercih edilmiştir. Foto-transistör transistör ve foto diyotun bileşimi olarak düşünülebilir. Foto diyot normal baz bias direncinin yerine kullanılmıştır ve ışığa bağlı sızıntı akımları bazı besler. Bu akım transistörün normal işlemiyle yükseltilir. Aygıt aydınlatıldığında akım birkaç miliamper'e kadar artar. Foto-dirençten daha hızlı olmalarına rağmen, foto-diyotlar kadar hızlı değildirler ve 100KHz'e kadar hızlarda kullanılabilirler (Brindley, 1998).

Sensörde aydınlatma elemanı olarak LED tercih edilmiştir. LED'lerde de kızılötesi ve görünür ışık veren LED'ler olmak üzere iki alternatif mevcuttur. Günümüzde üretilen görünür ışık veren LED'lerin DC akımları 10-20mA civarındadır. Kızılötesi LED'lerin ise 100mA ile 350mA arasındadır (Musayev, 2005). LED seçiminde ilk olarak kızılötesi LED'lerin kullanımı düşünülmüş ancak port pinlerinin bir tanesinden maksimum 25mA akım çekilebilen PIC ile 100-300mA gibi bir akım çeken bu elemanın PIC pininden doğrudan sürülmesinin mümkün olmadığı görülmüştür. Devrenin karmaşıklaşması ve çekilen bu yüksek akımdan dolayı kızılötesi yerine görünür ışık veren LED'lerin kullanılmasının daha uygun olacağına karar verilmiştir. LED'in mümkün oldukça küçük olması ve az yer kaplaması için 3mm'lik LED'ler kullanılmıştır.

Bir hücrede iki LED birbiriyle paralel bağlanmıştır. Sensör üzerinde fazla devre elemanı olmaması için akım belirleyici direnci kontrol kartına yerleştirilmiştir. Ayrıca

sensörden kontrol kartına minimum sayıda iletim hattı gitmesi için yapılan bazı uygulamalardan dolayı paralel olarak kullanılan LED'lere her akım koluna birer tane değil de toplu akım koluna bir adet direnç konulmak zorunda kalınmıştır. Bu durumda buraya konulan direncin değerinin kaç olması gerektiği önem kazanmıştır. Zira LED'in mümkün olduğu kadar fazla ışık vermesini ancak çektikleri akımların toplamda PIC'in maksimum pin akımını (25mA) geçmemesi ile sağlayabiliriz. Bunlar göz önünde bulundurulduğunda Şekil 2.10'daki akım belirleyici R direncinin değeri ohm kanunundan;

$$R = \frac{U_m - U_L}{I_L}$$

şeklinde bulunabilir. Burada;

R : LED'lerin akım belirleyici direnci,

U_m : Uygulanan maksimum gerilim,

U_L : LED gerilimi,

I_L : LED akımıdır.

Kontrol devresinden uygulanan maksimum gerilim pinlerden gelecek gerilime karşılık gelmektedir bu da 5V civarındadır. LED gerilimi yaklaşık olarak 2V seçilebilir. LED akımı ise pinlerden çekilebilecek maksimum akımla sınırlıdır bu da 25mA olarak seçilebilir ancak pinlerdeki herhangi bir gerilim dalgalanması sonucunda LED pinden fazla akım çekebileceği ve PIC'e zarar verebileceği göz önünde bulundurulduğunda LED akımını 20mA olarak seçilmesinin daha uygun olacağı görülmüştür. Bu seçtiğimiz kısıtlarla birlikte kullanılacak akım belirleyici direncin değeri;

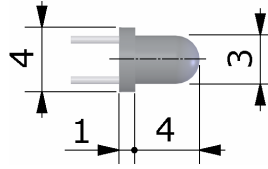
$$R = \frac{5 - 2}{0.02}$$

$$R = 150\text{ohm}$$

olarak bulunur.

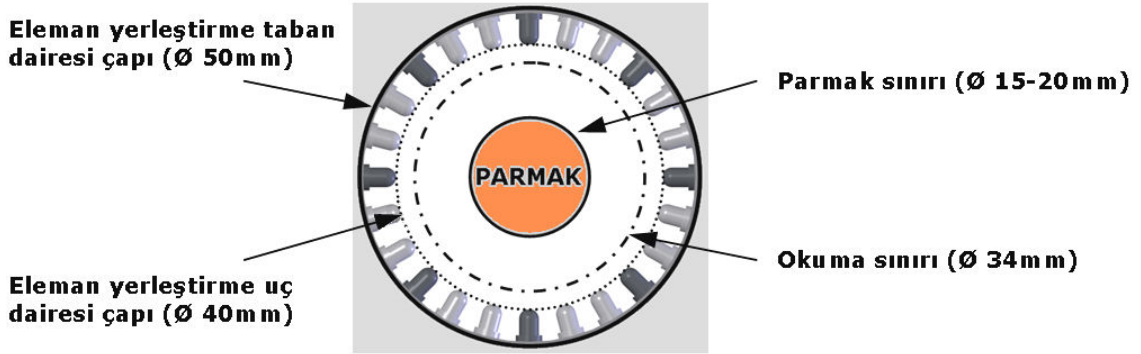
2.2.3. Sensör sisteminin boyutlandırılması

Sistem boyutlandırılırken çalışma şekline göre insan parmağının boyutları, kullanılan devre elemanlarının boyutları ve optik özellikleri göz önüne alınmıştır. Kullanılan devre elemanları boyutları Şekil 2.10'da görülen 3mm'lik kırmızı LED ve aynı boyut ve şekil özelliklerine sahip foto-transistorlardan seçilmiştir. Cihazımız genel olarak işaret parmağı takibi yaptığı ve işaret parmağının okuyucu göz içerisine belirli bir boşlukla girebilmesi gerektiği için insan işaret parmaklarının yaklaşık ortalama çapları boyutlandırmada ilk adımı teşkil etmektedir. Bu çerçevede yetişkin insan işaret parmak çaplarının genel olarak 15-20mm arasında değiştiği görülmüştür.



Şekil 2.10: 3mm'lik LED ve foto-transistorun boyutları.

Edinilen bu boyut bilgileri ışığında okuma alanında hareket değişiminin temassız olarak gözlenebilmesi için parmak çapından daha geniş bir okuma alanına ihtiyaç vardır. Yani parmak gözün tam merkezinde durduğunda okuma sınırı ile parmak arasında her yönde belirli bir mesafe boşluk kalması şarttır. Yapılan denemeler ve gözlemlerle bu mesafenin 5-10mm arasında bir mesafe olmasının uygun olacağı görülmüştür. Optik odaklama payı olarak ta denemeler sonucunda hücre elemanları ile parmak arasındaki minimum mesafenin 3mm olması uygun görülmüştür. Yani okuma sınırı ile devre elemanlarının arasında minimum 3mm mesafe olmalıdır. Bu duruma hücre elemanlarının 5mm olan boyları da eklendiğinde ve ortalama işaret parmağı boyutu olarak kabul ettiğimiz 15-20mm parmak çapı da göz önünde bulundurulduğunda elemanların yerleştirileceği çap ölçüsünün 50mm olarak seçilmesinin uygun olacağı görülmüştür. Bu bilgiler kısıtlar sonucunda sensörün son boyutları Şekil 2.11'de görülmektedir.

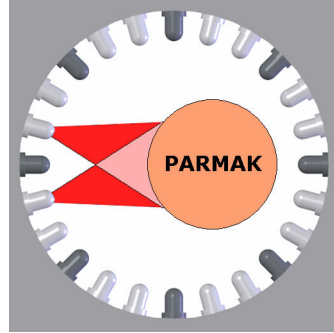


Şekil 2.11: Sensör sisteminin önemli çap ölçüleri.

2.2.4. Optik özellikler

Sensör sistemi ışığın yansımından faydalanarak algılama yaptığından dolayı sensör sisteminin optik özellikleri hücre yapısının ve bir sensör gözünün kaç hücreden meydana gelmesi gerektiğinin belirlenmesinde önemlidir.

Şekil 2.11’de fiziksel boyutları görülen sistemde kullanılan LED’lerin ışık huzmesi ışığın oluştuğu nokta merkez olmak üzere tepe açısı 35° olan koni şeklinde yayılmaktadır. Bu durumda hücreyi oluşturan iki LED’den çıkan ışık ışınlarının operatörün parmağına ulaşana kadar (LED’in ucundan itibaren maksimum 25mm boyunca) mümkün olduğunca yoğun ve doğrusal olmaları önemlidir. Bunu sağlamanın yolu hücredeki aynı hizada ve aralarında 35° açı olacak şekilde yerleştirmektir. Ancak gözler elle montajlandığından dolayı bu açığı tam olarak yakalamak mümkün değildir. Bundan dolayı bu açı bir miktar küçültülerek ışık huzmesinin hatalı montajları da tolere edebilecek şekilde yayılması sağlanabilir. Bundan dolayı LED’ler arasındaki açı 30° olarak seçilmiştir. Bu durumda gönderilen ışık huzmesi Şekil 2.12’deki gibi olur. Sensör sisteminin fiziksel boyutları göz önünde bulundurulduğunda ve sensörün çalışması esnasında hücrelerden elde edilen pozisyon verilerinin kolay yorumlanması için bir gözün 8 hücreden oluşmasının uygun olacağı görülmüştür.

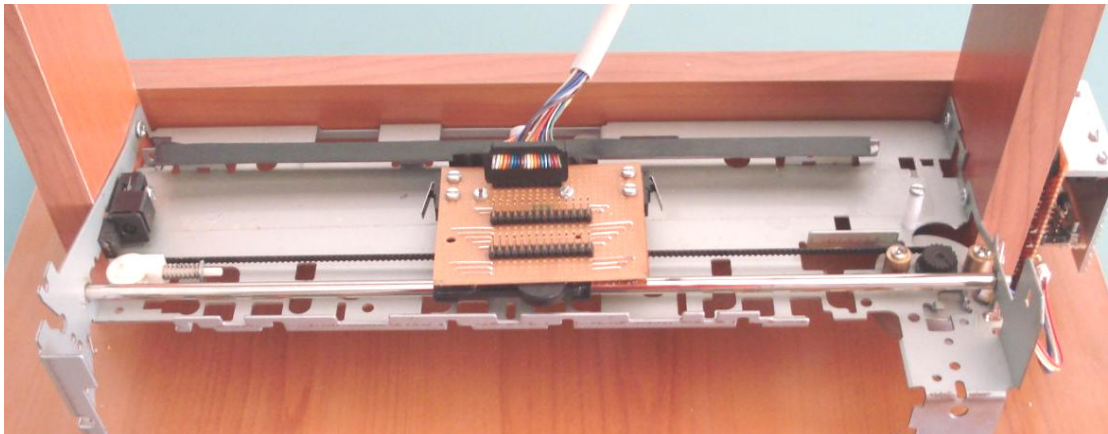


Şekil 2.12: LED'lerin gönderdiği teorik ışık huzmesi

Yansıyan ışığa bakıldığında ise teorik olarak incelenebilecek bir yapısının olmadığı görülür. Bunun ana sebebi yansıtıcı yüzey olan parmak derisinin düzgün bir yüzeye sahip olmamasından kaynaklanmaktadır. Her ne kadar teorik olarak ifade edilemese de yapılan testlerden oldukça sağlıklı yansıtma yaptığı gözlenmiştir.

2.3. Hareket Sistemi

Hareket sistemi olarak bir bilgisayar yazıcısının mekanik aksamından yararlanılmıştır. Bu mekanik aksam Şekil 2.13'te görüldüğü gibi bağlı olduğu arabaya hareket veren bir ucu kendisini tahrik eden motorun dişlisinde diğer ucu gerdirme kasnağında olan bir dişli kayış mekanizmasından ibarettir. Üzerinde bulunan motor unipolar step motor olup basit bir motor sürücüsü yardımı ile sürülmektedir.



Şekil 2.13: Kullanılan mekanik sistem.

3. YAZILIM

Cihazın kontrol kartı devresine bakıldığında devrenin son derece sade bir yapıya sahip olduğu görülür. Cihaz çalışmasını üzerinde bulunan kontrol kartı donanımından çok kontrol kartı üzerinde bulunan mikro-kontrolöre yüklenen yazılıma borçludur. Cihaz faaliyetlerini bu yazılım sayesinde gerçekleştirir.

Cihazın sahip olduğu yazılım PicBasic isimli bir programın komut setiyle yazılmış ve aynı programda derlenmiştir. Yazılım;

- Başlangıç işlemleri ve tanımlamalar
- Ana program blokları
- Alt(yardımcı) program blokları

şeklinde bölümlere ayrılarak incelenecektir.

3.1. Başlangıç İşlemleri ve Tanımlamalar

Programın en başında yer alır. Burada mikro-kontrolör donanımına bağlı olarak yapılandırılır. Henüz kontrol kartı donanımının tasarımı esnasında kullanılan mikro-kontrolörün pinlerinin hangi yeteneklere sahip olduğu iyi bilinmeli ve portlar sahip oldukları yetenekler doğrultusunda görevlendirilmelidir. Mikro-kontrolörlerin I/O pinleri birçok farklı görevi yerine getirebildiklerinden devrede yerine getirecekleri vazife doğrultusunda yazılımla tek tek görevlendirilmelidirler. Kontrol kartı donanımından bahsedilirken mikro-kontrolör pinlerinin hangi görevlerle vazifelendirildiklerinden bahsedilmiştir. Yazılımda da aynı şekilde yapılandırılırlar. Aynı zamanda burada çıkış olarak yapılandırılan pinlerin başlangıç değerleri tanımlanmalıdır.

Pinleri vazifeleri doğrultusunda yapılandırdıktan sonra devrede kullanılan osilatöre bağlı olarak çalışma frekansının tanımlanması gerekir. Devrede, kullanılan mikro-kontrolörün maksimum çalışma frekansı olan 20MHz'lik bir osilatör kullanıldığından yazılımda da kullanılan osilatörün 20MHz'lik olduğu tanımlanmıştır.


```

'BAŞLANGIÇ İŞLEMLERİ

TRISA = %11111111      'A0-A1-A3 gözün analog okuma kanalları
                        'A2-A4-A5 butonların dijital okuma kanalları
ADCON1 = %00000100    'A0-A1-A3 Analog Kanallar, A2-A4-A5 Dijital Kanallar
TRISB = %00000000     'B2-B7 LCD bitleri, B0-B1 buton satırı seçme bitleri
TRISC = %00000000     'C0-C3 stepper motor kontrol bitleri, C4-C7 boşa
TRISD = %00000000     'Göz okuma hücresi seçim bitleri
TRISE = %00000000     'Okunacak göz seçim bitleri
PORTB = %00000000     'Çıkış olarak ayarlanan portlara ilk değer atanması
PORTC = %00000000     'Çıkış olarak ayarlanan portlara ilk değer atanması
PORTD = %10000000     'Çıkış olarak ayarlanan portlara ilk değer atanması
PORTE = %00000111     'Çıkış olarak ayarlanan portlara ilk değer atanması

```

Diğer bir tanımlama mikro-kontrolör içerisinde bulunan A/D dönüştürücünün çalışma parametreleridir. Bu konu kontrol kartı donanımı bahsinde detaylı olarak inceleniştir. Kısaca özetlemek gerekirse A/D dönüştürücü 50µs örnekleme zamanı kullanarak 8 bit çözünürlüğünde dönüşüm değerleri vermek üzere yapılandırılmıştır.

Diğer bir tanımlama ise LCD göstergenin tanımlanmasıdır. Bu konudan da kontrol kartı bahsinde söz edilmişti. Kısaca özetlemek gerekirse LCD'nin 16'şar karakterlik 2 satırdan oluştuğu, LCD Register pininin, LCD Enable pininin, LCD'ye kaç kanaldan veri gönderileceğinin ve pinlerinin hangileri oldukları tanımlanmıştır.

Bu bölümde son olarak programın çalışması esnasında kullanılan değişkenlerin adları ve boyutları(word, byte veya bit olarak) tanımlanır. Kullanılan programlama dili dizi şeklinde değişken tanımına da müsaittir.

```

'TANIMLAMALAR

DEFINE OSC 20          'PICin çalışma frekansı 20 MHZ

DEFINE LCD_BITS 4      'LCD'ye kaç bitlik bir hattan bilgi transferi yapacağı
DEFINE LCD_DREG PORTB 'LCD'ye yazı bilgisini gönderileceği port
DEFINE LCD_DBIT 4      'LCD'ye bilgi göndermek için başlangıç biti
DEFINE LCD_RSREG PORTB 'LCD register(kayıt) portu
DEFINE LCD_RSBIT 2     'LCD register biti
DEFINE LCD_EREG PORTB 'LCD enable(yazılma) portu
DEFINE LCD_EBIT 3      'LCD enable biti
DEFINE LCD_LINES 2     'Kullanılan LCD'nin kaç satır olduğu

DEFINE ADC_BITS 8      'A/D çevrimin sonucu 8 bittir
DEFINE ADC_CLOCK 3     'A/D çevriminde kullanılacak osilatörün seçimi (3=rc)
DEFINE ADC_SAMPLEUS 50 'us olarak örnekleme süresi

```

3.2. Ana Program Blokları

Ana program blokları birkaç bir kaç tanedir. Bunun nedeni cihazın 3 farklı moda çalışıyor olmasından kaynaklanmaktadır. Her modun kendisine ait bir ana program bloğu mevcuttur. Bir menü sistemi yardımı ile çalışma esnasında çalışma modlarını değiştirmek mümkün olmaktadır. Bu durumda ana program blokları olarak adlandırılabilir program bloklarımız;

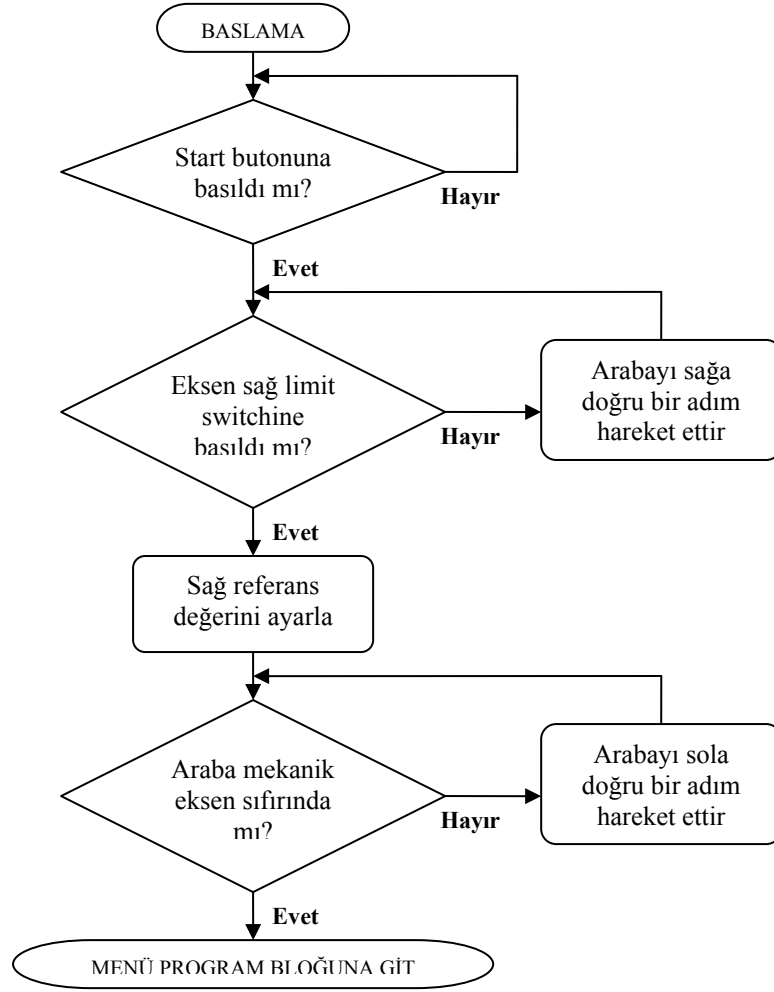
- Sıfırlama
- Menü
- 4 serbestlik derecesinde konum okuma (Mod1)
- Konum okuma ve 1 serbestlik derecesinde hareket takibi (Mod2)
- 1 serbestlik derecesinde hızlı hareket takibi (Mod3)

olmak üzere beş tanedir.

Bunlardan sıfırlama program bloğu cihaz açıldığında ilk ve bir kereye mahsus olarak devreye girer. Menü program bloğu ise sıfırlama programının ardından devreye girer. Diğer program blokları olan çalışma modlarının program bloklarına geçiş menü program bloğu üzerinden yapılabilmektedir.

3.2.1. Sıfırlama

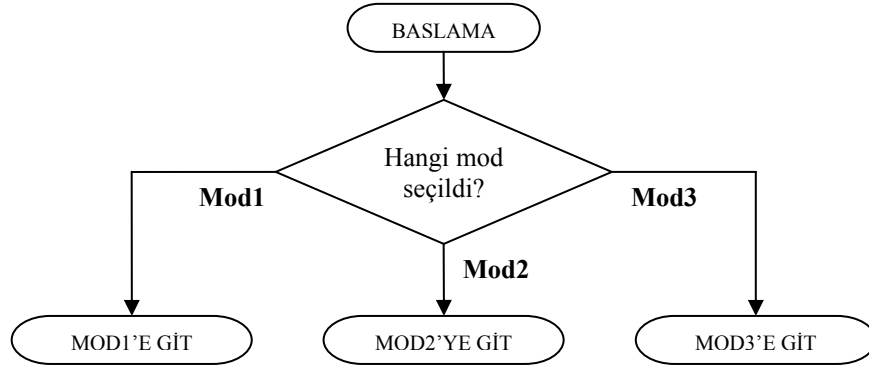
Cihaz açıldığında tanımlamalar ve başlangıç işlemlerinin ardından ilk olarak bu program bloğu devreye girer. Şekil 3.1'de akış şeması görülen bu program bloğu işe start butonuna basılıp basılmadığını kontrol ederek başlar start tuşuna basılmadığı sürece program bu döngü içinde kalır ve devamına geçmez. Eğer start butonuna basılırsa cihaz üzerinde bulunan arabaya hareket vererek sağ çalışma eksenini sınırından referans aldırır ve böylelikle arabanın mekanik sistem üzerindeki konumunu belirlemiştir olur. Referans aldıktan sonra arabayı aynı zamanda mekanik çalışma ekseninin sıfırına da olan eksenin tam orta noktasına konumlandırır. Bu işlemle birlikte bu program bloğunun işi sonlanır programı menü program bloğuna yöneltir.



Şekil 3.1: Sıfırlama program bloğu akış şeması.

3.2.2. Menü

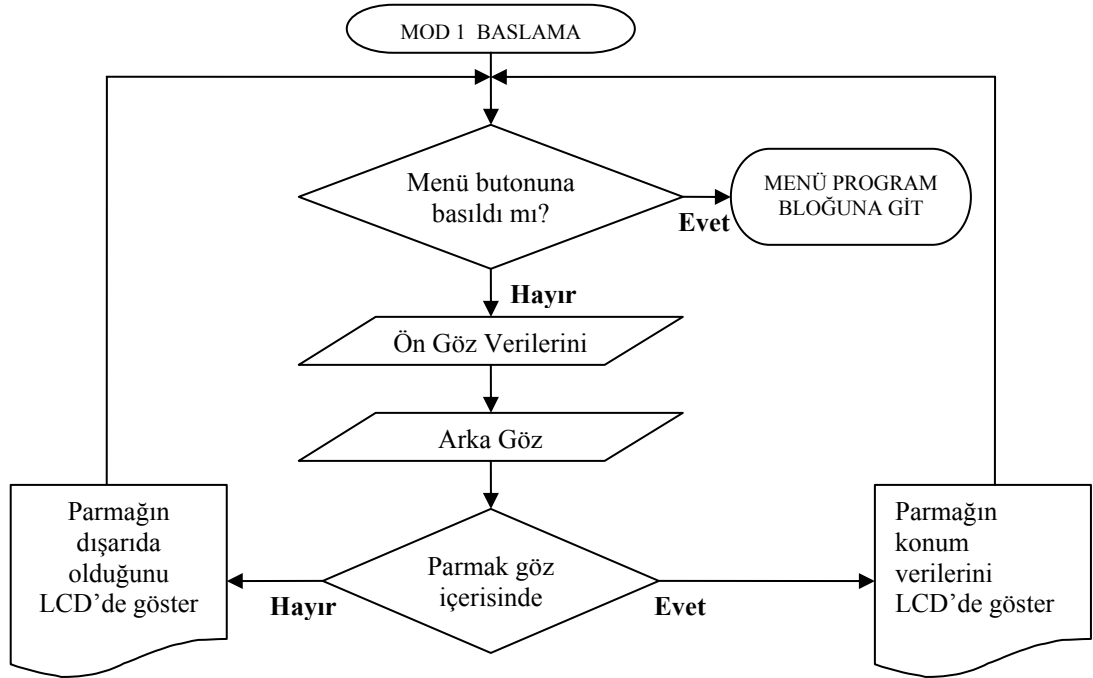
Sıfırlama program bloğunun çalışmasını tamamlamasıyla program akışı menü program bloğuna yönelir (Şekil 3.2). Bu program bloğu çalıştığı anda LCD gösterge üzerinde menü görülür. Bu menü oldukça basit olarak tasarlanmıştır. Üst satırda Mod1, Mod2 ve Mod3 olmak üzere çalışma modları sıralanmış olup alt satırda ise o anda seçili olan mod ile ilgili açıklama yer almaktadır. Bu program bloğunda sağ-sol seçme butonları yardımı ile çalışılmak istenen mod seçilir ve ortada bulunan onay butonu ile seçilen mod çalıştırılır. Bu program bloğu çalışmakta olan programı seçilen moda ait program bloğuna yöneltir. Mod program blokları çalışırken menü butonuna basmak suretiyle menü program bloğuna dönmek ve çalışma modunu değiştirmek mümkündür.



Şekil 3.2: Menü program bloğu akış şeması.

3.2.3. Dört serbestlik derecesinde konum okuma (Mod1)

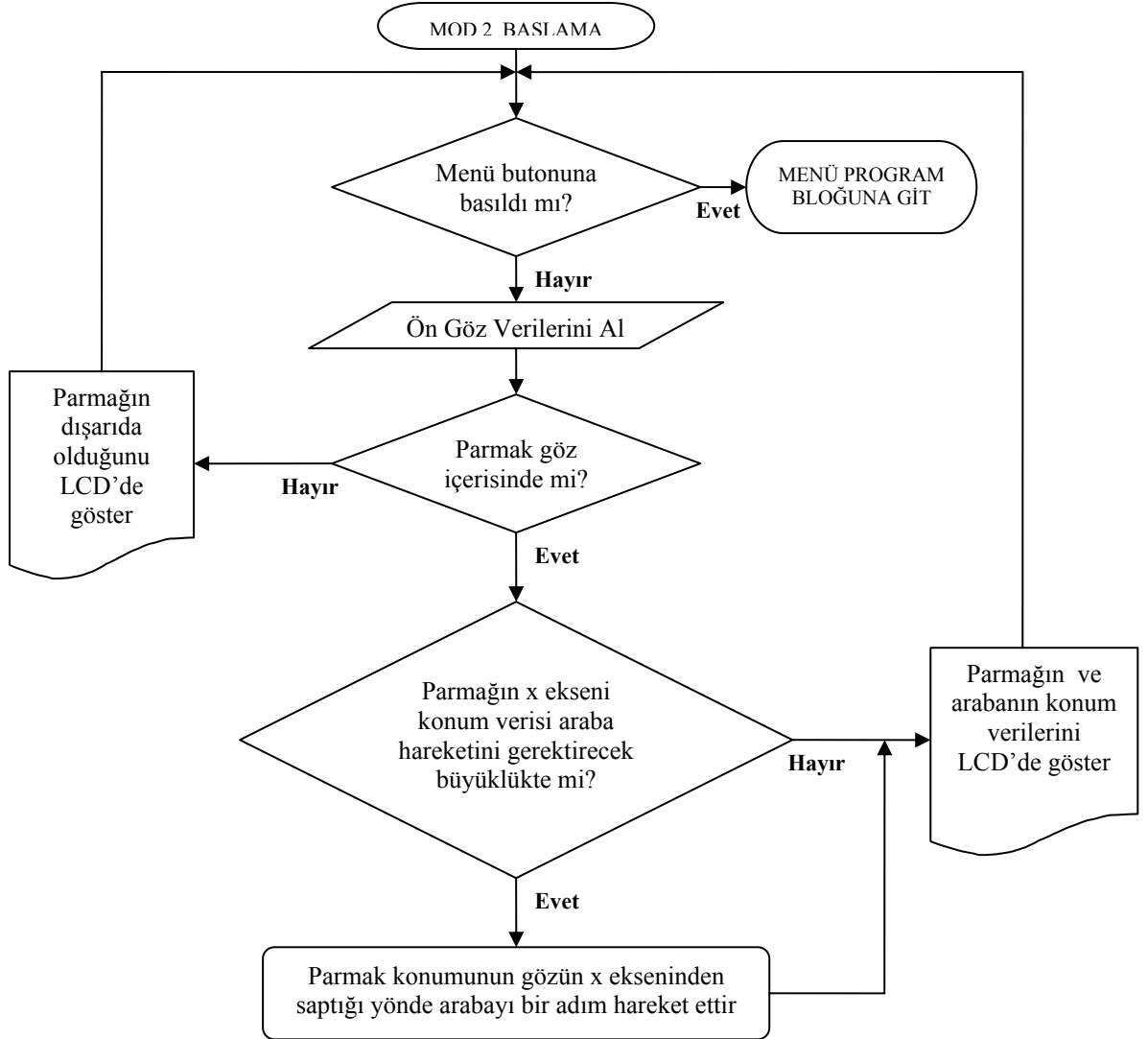
Bu program bloğunda alt programlar vasıtasıyla sensör sisteminden okuma yapılarak veriler alınır. Ardından alınan bu veriler başka bir alt program vasıtasıyla yorumlanarak sensörden alınan verilerden elde edilen operatörün parmak konumuna ait olan ve dört serbestlik derecesine sahip konum değerleri ekranda gösterilir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3: Mod1 akış şeması.

3.2.4. İki serbestlik derecesinde konum okuma ve hareket takibi (Mod2)

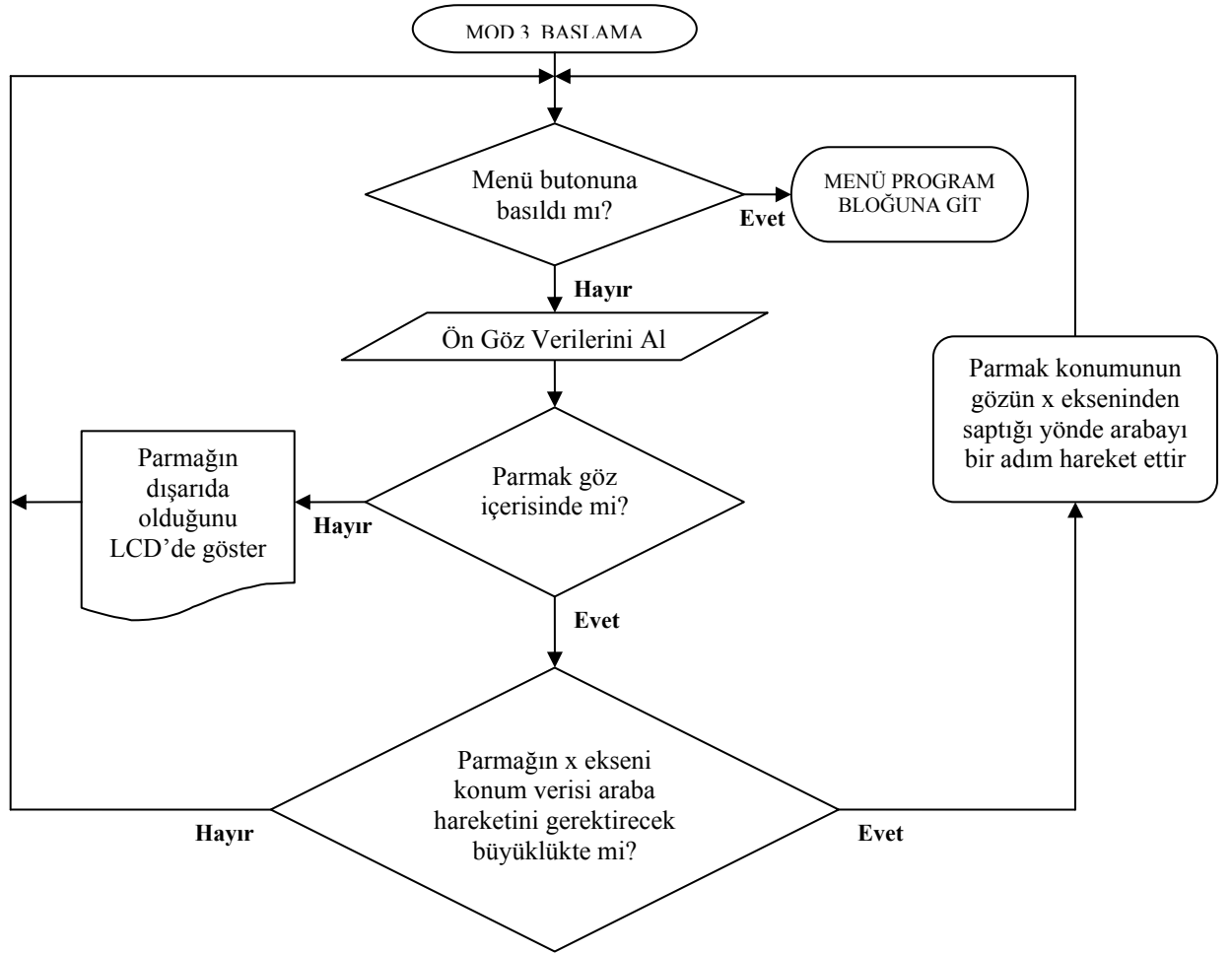
Bu program bloğunda da Mod1 de olduğu gibi alt programlar vasıtasıyla sensör sisteminden okuma yapılarak veriler alınır (Şekil 3.4). Ardından alınan bu veriler başka bir alt program vasıtasıyla yorumlanarak sensörden alınan verilerden elde edilen operatörün parmak konumuna ait olan ve 2 serbestlik derecesine sahip konum değerleri ile arabanın o anda bulunduğu konum değerleri ekranda gösterilir. Ayrıca bunun yanında parmağın konum verilerine dayanılarak arabaya x-ekseninde parmağı ortalayacak şekilde hareket verilir.



Şekil 3.4: Mod2 akış şeması.

3.2.5. Bir serbestlik derecesinde hızlı hareket takibi(Mod3)

Bu program bloğunda da yine Mod1 de olduğu gibi alt programlar vasıtasıyla sensör sisteminden okuma yapılarak veriler alınır (Şekil 3.5). Ardından alınan bu veriler başka bir alt program vasıtasıyla yorumlanarak sensörden alınan verilerden elde edilen operatörün parmak konum bilgileri vasıtasıyla arabaya x ekseninde hareket verilir. Bu program bloğunun Mod2'den farkı ekrana herhangi bir konum bilgisinin yazdırılmamasıdır. Bu modda hareket takibi esnasında ekrana herhangi bir değerin yazdırılmamasının sebebi programı ekrana veri göndermek amacıyla bölmesi sonucunda meydana gelen zaman gecikmesinin motorun hızlı hareketini engellemesini önlemektir.

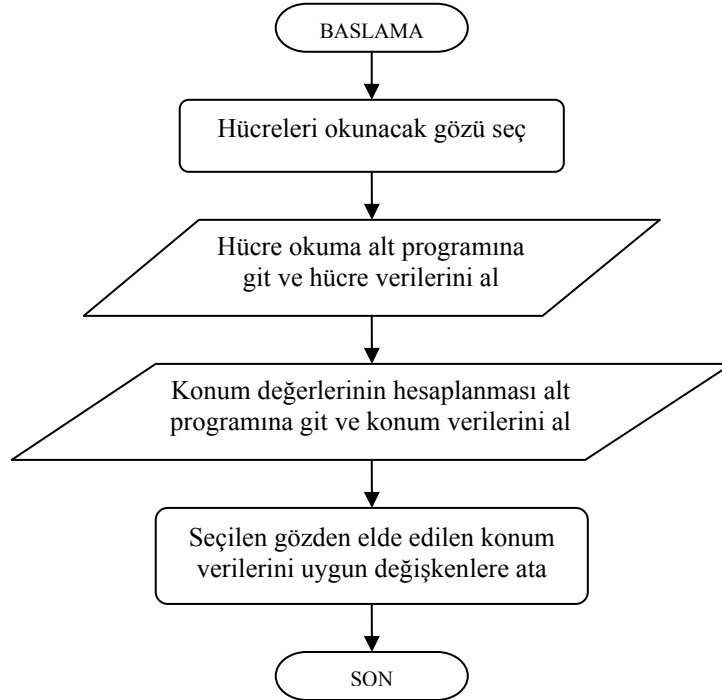


Şekil 3.5: Mod3 akış şeması.

3.3. Alt Program Blokları

Bu program blokları gerektiğinde tüm ana program blokları tarafından ortak olarak kullanılmaktadır. Ana program bloklarında program alt program bloklarına yöneltildiğinde program akışı alt program bloğuna yönelir ve buradan devam eder. Alt program çalışmasını tamamladığında program yine ana program bloğunda kaldığı yerden devam eder. Yazılımımızda sensör sistemi hücrelerinden veri okuma ve hücrelerden elde edilen veriler yardımıyla parmağın konumunun belirlenmesini sağlayan yorumlama algoritması tanımlanan biçimde çalışan alt program bloklarıdır.

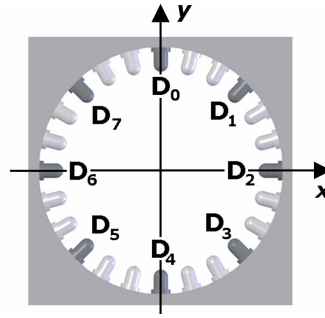
Parmak konum verilerinin oluşturulmasını sağlayan alt program bloğu cihazın tüm çalışma modlarında parmak konum verilerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu program bloğu A/D çeviriciyi kullanarak kendi altında çalışan başka bir program bloğu ile sensör sistemi hücrelerinden değer okur. Sonra başka bir alt program vasıtasıyla hücrelerden okuduğu bu ham verileri kullanarak kendi içerisindeki bir algoritma vasıtasıyla parmak konum değerlerini hesaplar. Son olarak, hesapladığı bu değerleri gerekli yerlerde kullanılmak üzere uygun değişkenlere atar.



Şekil 3.6: Parmak konum verilerinin oluşturulması program bloğu akış şeması.

3.3.1. Hücrelerden veri okuma

Hücrelerden veri okumanın yapıldığı program bloğu parmak konum verilerinin oluşturulduğu program bloğu tarafından kullanılan bir alt program bloğudur. Bir göz üzerinde bulunan hücreler Şekil 3.7’de görüldüğü şekilde adlandırılmışlardır. Bu program bloğu çalıştığında D_0 hücresinden başlamak üzere sırasıyla tüm hücrelerden ışık seviyesi ölçümü yapılmaktadır.



Şekil 3.7: Göz hücrelerinin adlandırılması.

Bir hücrede ışık seviyesi ölçümü şu şekilde yapılmaktadır. Öncelikle ölçümü yapılan hücre üzerindeki LED’ler yakılır. Bu halde parmaktan yansıyan ışık seviyesi fototransistör ve A/D dönüştürücü vasıtasıyla ölçülerek *ışıklı* isimli bir değişkene kaydedilir. Ardından LED’ler söndürülür ve ortamın doğal ışığı varken yine ışık seviyesi fototransistör ve A/D dönüştürücü vasıtasıyla ölçülerek *boşta* isimli bir değişkene kaydedilir. Bu işlemler yapıldıktan sonra LED’ler açıkken parmaktan yansıyan net ışık seviyesini belirlemek amacıyla ölçülen *ışıklı* ve *boşta* değişken değerlerinin farkı alınarak parmaktan yansıyan net ışık seviyesi değerine ulaşılır. Böylece çalışma ortamının doğal ışık seviyesinin cihazın çalışmasını etkilenmesi büyük ölçüde engellenmiş olur. Ölçülen değere matematiksel olarak bakılacak olursa;

$$D_i = [ışıklı]_i - [boşta]_i$$

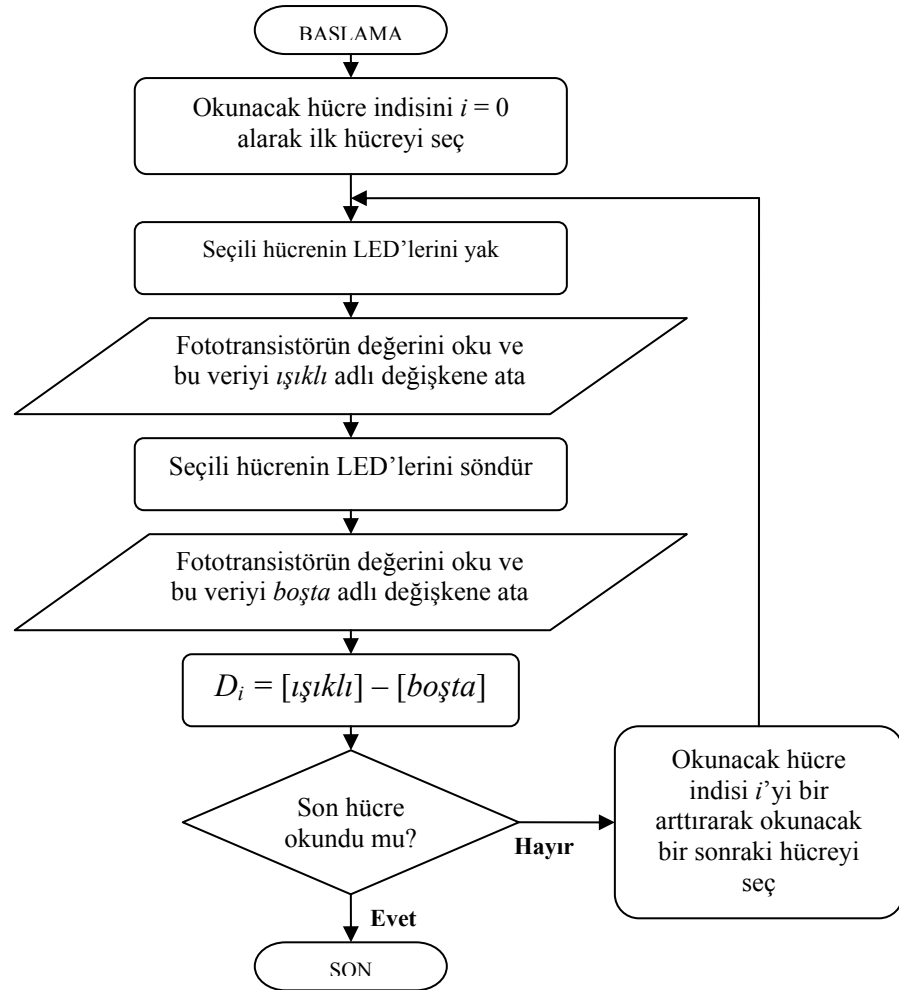
D : Parmaktan yansıyan net ışık seviyesi.

ışıklı : LED’ler açıkken yapılan ölçümün sonucu.

boşta : Ortamın doğal ışık seviyesinin ölçüm sonucu.

i : Değişkenlerin ait olduğunu hücreyi gösterir ($i = 0,1,\dots,7$ değerlerini alır).

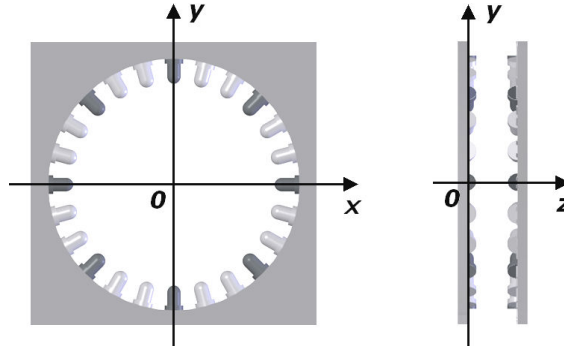
şeklinde ifade edilebilir. Teorik olarak bakıldığında D değişkeninin hiçbir zaman negatif değer almaması gerekir ancak pratikte bu gerçekleşmemektedir. Bunun nedeni *ışıklı* ve *boşta* değişken değerleri ölçülürken bu iki değişkenin aynı anda ölçülememesinden kaynaklanmaktadır. Ölçümler sırasıyla yapıldığından dolayı iki işlem arasında A/D dönüştürücünün örnekleme süresi ve *ışıklı* değişken değerinin A/D çevrim süresi kadar bir gecikme vardır. Bu sürede yaklaşık olarak $60\mu\text{s}$ gibi bir süreye tekabül etmektedir. Ölçüm esnasında aynı zamanda parmakta hareketini sürdürmektedir. Parmağın çok süratli hareketleri ve çalışma ortamının ışık seviyesinin de yüksek olduğu durumda D değerleri negatif olabilmektedir. D 'nin negatif değerleri çok küçük ve sayısal olarak ihmal edilebilir durumdadır. Bu nedenle işlemde negatif sonuç çıktığı durumlarda negatif değer ihmal edilerek D 'nin sayısal değeri sıfır alınmaktadır.



Şekil 3.8: Hücrelerden veri okuma program bloğu akış şeması.

3.3.2. Hücre verilerinden konum değerlerinin hesaplanması

Bu program bloğu parmak konum verilerinin oluşturulduğu program bloğu tarafından kullanılan bir alt program bloğudur. Hücrelere ait D_i verileri oluşturulduktan sonra sıra bu verilerden anlamlı bir konum değerinin elde edilmesine gelmektedir. Bu aşamada hücre verilerinden konum verilerinin hesaplandığı program bloğu devreye girer. Bu program bloğu bir akış diyagramı gerektirmemektedir. Zira trigonometrik işlemlerden ibarettir. Şöyle ki sensör sistemimiz Şekil 3.9'da görüldüğü şekilde bir koordinat sistemine sahiptir. Ön gözün tam merkezi bu koordinat sisteminin merkezidir. Okunan tüm değerler bu merkez baz alınarak ifade edilmektedir. Sensör sistemi derinlik ölçmediğinden z ekseninde herhangi bir değer hesaplanmayacaktır. Buradaki algoritma D_i verilerini kullanarak x ve y konum koordinat verilerini hesaplamaktadır. Bunu yaparken de Şekil 3.7'de de görüldüğü üzere hücrelerin koordinat sistemine göre konumları önem kazanmaktadır.



Şekil 3.9: Sensör sisteminin koordinat eksenleri.

D_i verilerini kullanarak x ve y konum koordinat verileri Şekil 3.9'dan;

$$x = D_1 \cos 45^\circ + D_2 + D_3 \cos 45^\circ - D_5 \cos 45^\circ - D_6 - D_7 \cos 45^\circ$$

$$y = D_7 \sin 45^\circ + D_0 + D_1 \sin 45^\circ - D_3 \sin 45^\circ - D_4 - D_5 \sin 45^\circ$$

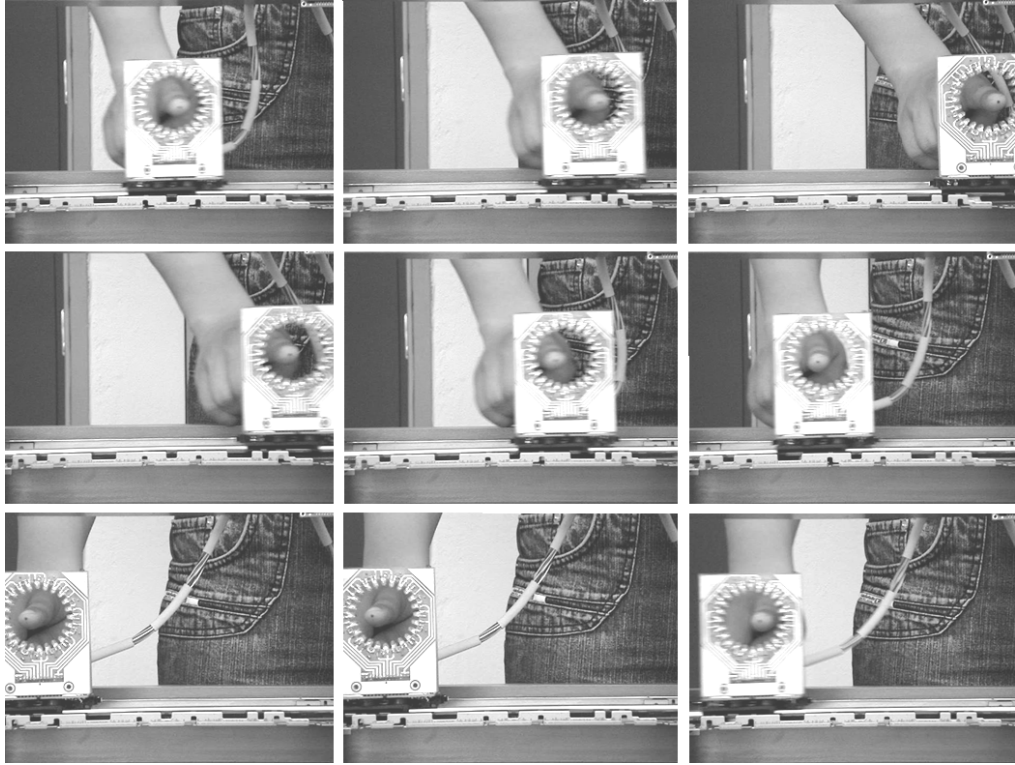
eşitlikleri kullanılarak hesaplanabilir. Bu algoritma vasıtası ile ön göz için (x_0, y_0) ve arka göz için (x_a, y_a) olmak üzere iki grup konum koordinatı verisi hesaplanır. Böylece parmağın sensör tarafından algılanabilen uzaydaki konumu iki konum ikide yönelim(oryantasyon) olmak üzere 4 serbestlik derecesinde okunarak ifade edilebilmiş olur.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Cihaz performansının belirlenmesinde farklı hareket türlerine cihazın verdiği tepkiler yapılan deneylerle tespit edilmiştir. Bu hareketler;

- Sürekli
- Ani duruş kalkışlı
- Ani yön değiştirmeli

olmak üzere üç ana başlıkta toplanabilir. Bu hareket türlerinde yapılan deneylerde operatörün parmağının ve sensör sistemi merkezlerinin x ekseni boyunca zamana bağlı konum değişimleri ölçülmüştür. Buradan elde edilen konum ve zaman verilerinden konum-zaman grafiği oluşturulmuş olup bu verilerden yola çıkılarak hız-zaman ve ivme-zaman grafikleri de çıkartılmıştır. Operatörün parmak konumu ile sensör sistemi merkezi konumu arasındaki fark konum hatası olarak belirlenmiş olup konum hatası-zaman grafikleri de oluşturulmuştur.



Şekil 4.1: Cihazın parmak takibi.

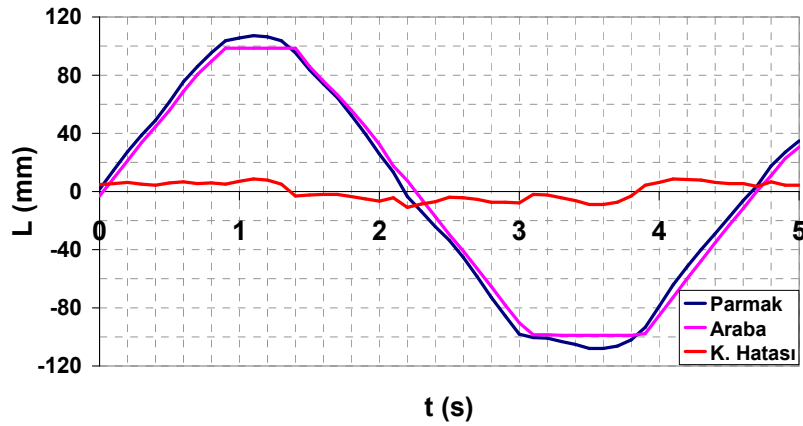
Testlerde;

- Cihaz Mod3'te çalıştırılmıştır.
- Operatörün parmağının ve sensör sistemi merkezinin x eksenindeki konumu 0.1s'de bir ölçülmüştür.
- Operatörün parmağının sensör sisteminin okuma sınırını aşmamasına dikkat edilmiştir.
- Mekanik sistemin 0'ı mekanik eksenin merkezi olmak üzere sistemin mekanik sınırları x eksenini boyunca $\pm 98,7\text{mm}$ 'dir.

4.1. Sürekli Harekette Hareket Takibi

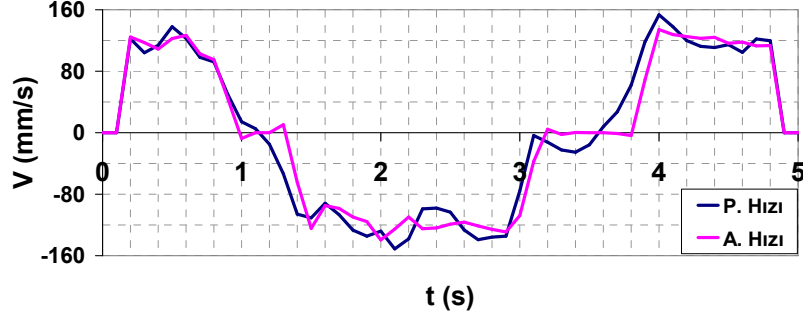
Bu testte sensör sisteminin operatörün parmağının hareketini x ekseninin sistem sınırlarına kadar hiçbir duraklama olmadan takibi esnasında sistemin davranışı incelenmiştir. Sensör sistemi bir sistem sınırından diğerine hiçbir duraklama olmadan maksimum hızda götürülmeye çalışılmıştır.

Operatörün parmağının zamana bağlı konum değişimi ve sensör sisteminin operatörün parmak hareketini takibi esnasındaki konum değişimi Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Bu grafik incelendiğinde sensör sisteminin operatörün parmağını oldukça başarılı bir şekilde izlediği görülmektedir.



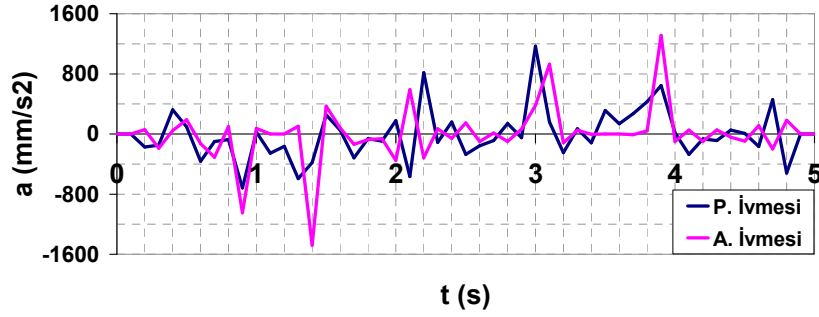
Şekil 4.2: Sürekli harekette konum'un zamana bağlı değişimi.

Şekil 4.3'e baktığımızda ise cihazın hareket takip hızının yaklaşık 120mm/s olduğu ve bu hızı yaklaşık ± 10 mm/s aralığında sabit tuttuğu görülmektedir.



Şekil 4.3: Sürekli harekette hız'ın zamana bağlı değişimi.

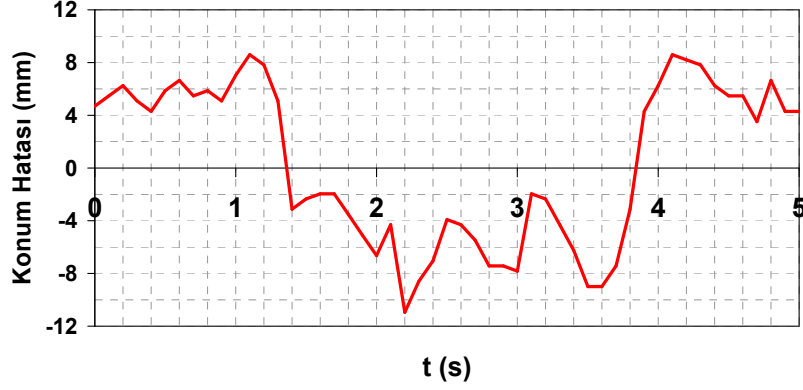
Şekil 4.4 incelendiğinde bu hareket esnasında gerçekleşen ivmenin maksimumunun yaklaşık 1500 mm/s^2 civarında ve çok değişken olduğu aynı zamanda bu harekette parmak ivmesi ile araba ivmesi arasında tam bir paralellik olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.4: Sürekli harekette ivme'nin zamana bağlı değişimi.

Şekil 4.5'ten bu harekette maksimum konum hatasının 11mm, ortalama konum hatasının ise 5.7mm ($\sigma = 2.7\text{mm}$) olarak gerçekleştiği görülmektedir. Maksimum konum hatasının gerçekleştiği 2.2'nci saniye önemli bir nokta olarak göze çarpmaktadır. Bu anda nerdeyse ortalamanın iki katı kadar konum hatasının meydana gelemsinin sebebi o andaki anlık ivmede gizlidir. 2.2'nci saniyede arabanın ve operatörün parmağının ivmelerine bakılacak olursa birisinin pozitif diğerinin negatif olduğu görülür

o anda parmak araba hareketi arasında bir dengesizlik meydana gelmiş olup bu sonuç doğmuştur.

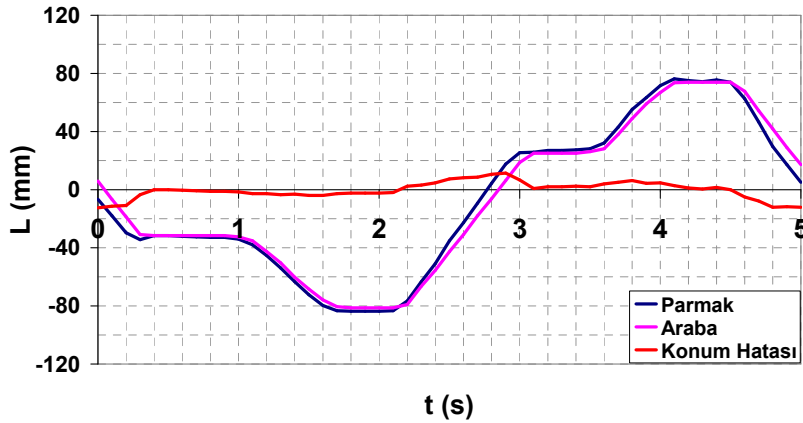


Şekil 4.5: Sürekli harekette konum hatası'nın zamana bağlı değişimi.

4.2. Ani Duruş Kalkışlı Harekette Hareket Takibi

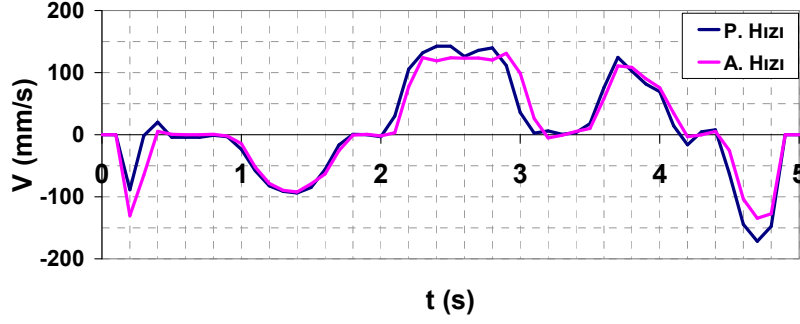
Bu testte sensör sisteminin operatörün parmağının sürekli bir hareket yaparken aniden durması ve duruştan aniden yeniden harekete başlaması hareketini takibi esnasında sistemin davranışı incelenmiştir.

Operatörün parmağının zamana bağlı konum değişimi ve sensör sisteminin operatörün parmak hareketini takibi esnasındaki konum değişimi Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



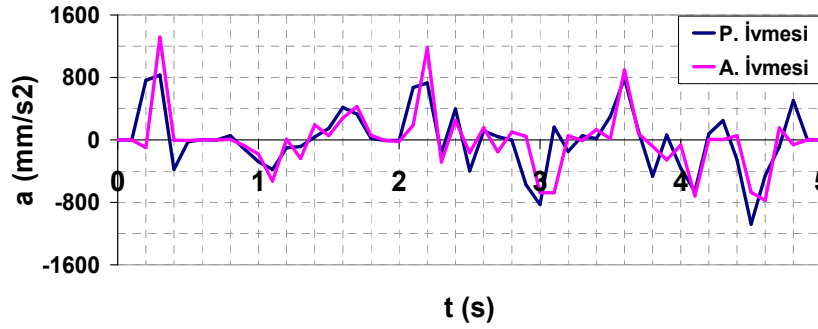
Şekil 4.6: Ani duruş kalkışlarda konum'un zamana bağlı değişimi.

Şekil 4.7'ye baktığımızda ise cihazın hareket takip hızının yine yaklaşık 120mm/s olduğu görülmektedir. Ancak bu sefer hareket sürekli ve sabit olmadığından dolayı grafikten de görüleceği gibi oldukça değişken hızlar mevcuttur.



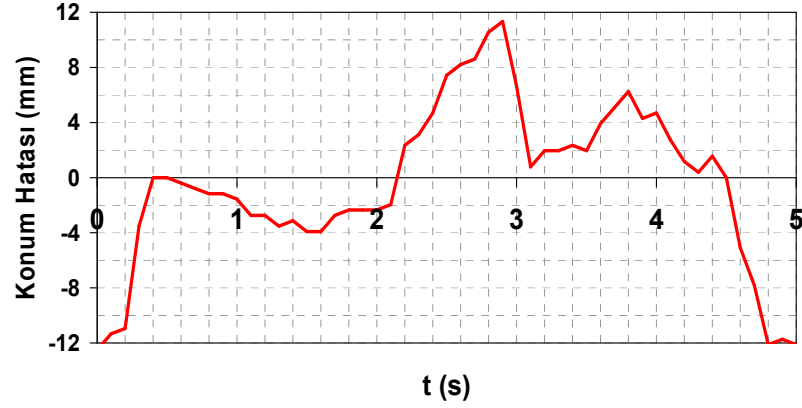
Şekil 4.7: Ani duruş kalkışlarda hız'ın zamana bağlı değişimi.

Şekil 4.8 incelendiğinde bu hareket esnasında gerçekleşen ivmenin maksimumunun yaklaşık 1300mm/s^2 civarında olduğu ve bu sefer parmak ivmesi ile araba ivmesi arasında yaklaşık bir paralellik olduğu görülmektedir.



Şekil 4.8: Ani duruş kalkışlarda ivme'nin zamana bağlı değişimi.

Şekil 4.9'dan bu harekette maksimum konum hatasının 11mm, ortalama konum hatasının ise 4.4mm ($\sigma = 3.7\text{mm}$) olarak gerçekleştiği görülmektedir. Maksimum konum hatasının gerçekleştiği 0.2, 2.9 ve 4.8'inci saniyelerin hepsinin ortak özellikleri ani duruşların başlangıç anları olmasıdır. Bu da ani duruşların başlangıç anlarında cihazın bu duruşa yeterince hızlı cevap veremediğini göstermektedir.

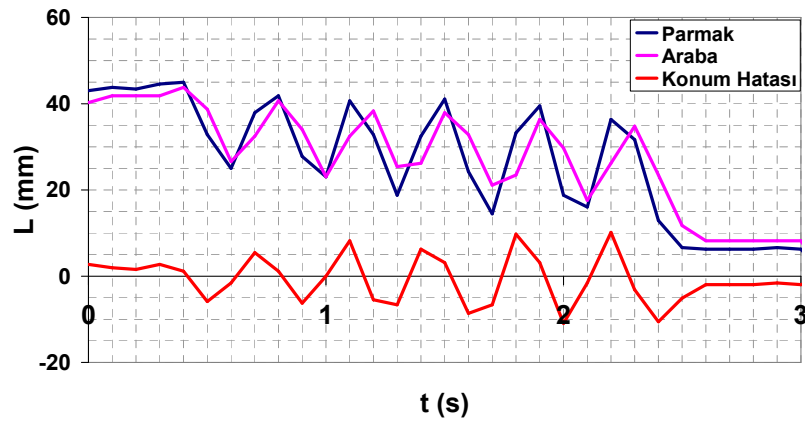


Şekil 4.9: Ani duruş kalkışlarda konum hatası'nın zamana bağlı değişimi.

4.3. Ani Yön Değiştirmeli Harekette Hareket Takibi

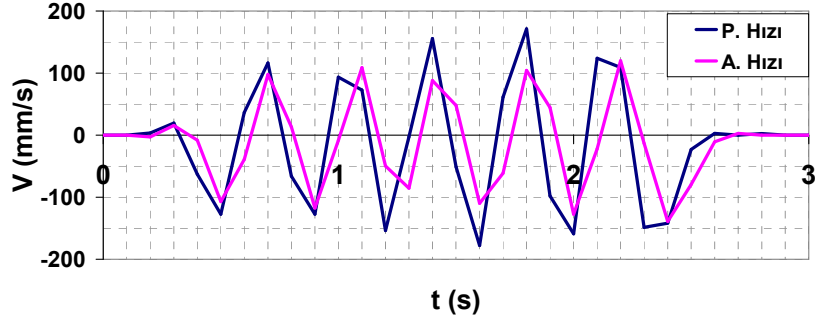
Bu testte sensör sisteminin operatörün parmağının sürekli olarak ani yön değişimleri yapması hareketini takibi esnasında sistemin davranışı incelenmiştir.

Operatörün parmağının zamana bağlı konum değişimi ve sensör sisteminin operatörün parmak hareketini takibi esnasındaki konum değişimi Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



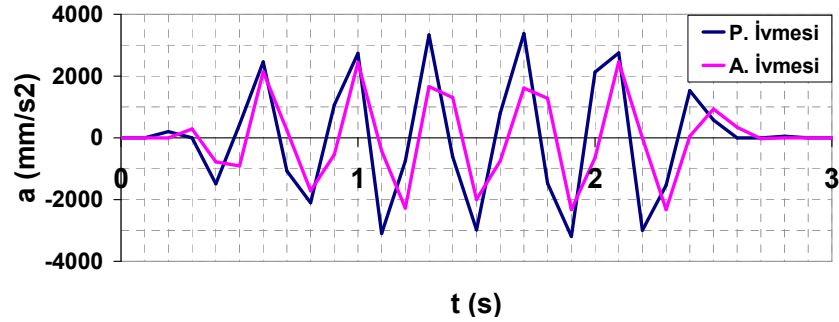
Şekil 4.10: Ani yön değiştirmelerde konum'un zamana bağlı değişimi.

Şekil 4.11'e baktığımızda ise cihazın hareket takip hızının oldukça değişken olduğu görülmektedir. Bunun başlıca sebebi araba maksimum hıza ulaşana kadar parmağın yön değiştirmesidir.



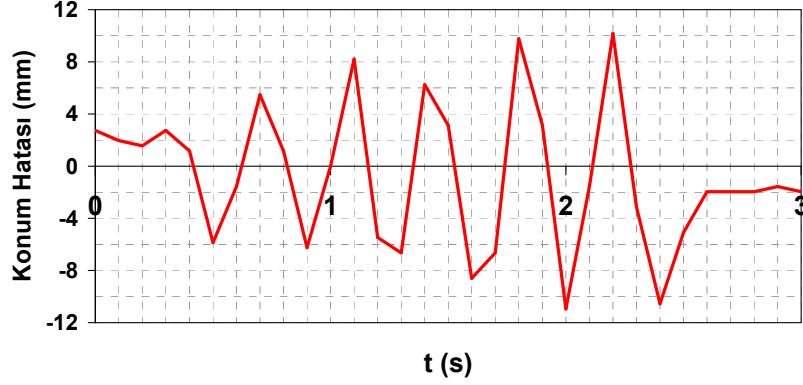
Şekil 4.11: Ani yön değiştirmelerde hız'ın zamana bağlı değişimi.

Şekil 4.12 incelendiğinde bu hareket esnasında gerçekleşen ivmenin maksimumunun yaklaşık 2700mm/s^2 civarında olduğu ve en yüksek ivmenin bu hareket tipinde meydana geldiği görülmektedir. Parmak ivmesi ile araba ivmesi arasında oldukça yüksek bir paralellik olduğu görülmektedir.



Şekil 4.12: Ani yön değiştirmelerde ivme'nin zamana bağlı değişimi.

Şekil 4.13'ten bu harekette maksimum konum hatasının 11mm, ortalama konum hatasının ise 5mm ($\sigma = 3.7\text{mm}$) olarak gerçekleştiği görülmektedir. Maksimum konum hatalarının gerçekleştikleri noktaların ortak özellikleri hepsinin de yön değişimlerinin meydana geldiği anlarda gerçekleşmiş olmalarıdır. Buradan ani yön değiştirmelerde konum hatasının ortalama konum hatasının yaklaşık iki katına kadar çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.13: Ani yön değiştirmelerde konum hatası'nın zamana bağlı değişimi.

4.4. Konum Hatalarının Nedeni

Kurulan sistem üzerindeki mekanik aksam bu iş için tasarlanmadığından dolayı çok ta sağlıklı çalışmamaktadır. Örneğin parmak takibi sırasında parmağın ani yön değişimlerinde step motor buna hemen tepki vermesine rağmen mekanik aksam kayışın gergi kasnağının yayının esnemesinden dolayı motorun ani tepkisini sensörü üzerinde taşıyan hareketli arabaya zamanında iletememektedir. Buda sistemin kararsız bir çalışma sergilemesine neden olmaktadır. Aynı zamanda sensör ve araba tam anlamıyla sabitlenmediğinden dolayı ki bununda sensör sisteminin kendisi için tasarlanmamış olan plastik bir arabaya sökölüp takılabilir bir şekilde monte edilebilmesinden kaynaklanan nedenlerle parmak hareketi bitirip sabit konumda durdurulduğunda sistemin kararsızlığını sönmülemesi zaman almaktadır. Ancak bunlar sensör sisteminden yada yazılımdan kaynaklanan problemler değildir. Bu problemlerin temel kaynağı, bilgisayar yazıcısına uygun olarak tasarlanan bir mekanik sistem üzerinde kendi sistemimizi üzerine monte edecek şekilde değişiklikler yapmamız ve bu düzeltmeler esnasında bazı mekanik aksamların sistemden çıkartılmasından kaynaklanmaktadır

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Operatörün parmak hareketini temassız olarak takip edebilecek ve görsel gerçeklik ortamlarında operatöre boşlukta hareket etme hissini verebilen bir mekatronik sistem tasarımı amaçlanmış ve yapılan çalışma ile bu gerçekleştirilmiştir.

Mekanik sistemdeki araba üzerine sensör sistemi monte edilmeden önce yapılan denemelerde arabanın doğrusal hareket hızı yaklaşık 200mm/s olarak ölçülmüş ancak sistem tam anlamıyla monte edilip operatörün parmağının hareketi takip ettirildiğinde araba hızı yaklaşık 120mm/s olarak gerçekleşmiştir. Bu hız insanın parmağının hareket ettirebileceği maksimum hız göz önünde bulundurulduğunda oldukça düşük kalmaktadır. İnsan eli 1000mm/s'nin üzerindeki hızlarda hareket edebilmektedir. İyi bir hareket takibi için mekanik sisteminde bu hızlara ulaşması gerekir. Hareket takibinin yaklaşık 4.9mm ($\sigma = 3.55\text{mm}$) ortalama konum hatası ile gerçekleşiyor olmasının nedenlerinden biride mekanik sistemin yeterince hızlı olmamasıdır. Ancak hızın tek başına artırılması problemi çözmeyecektir aynı zamanda sistemin hareket hassasiyetinin de olabildiğince iyi olması şarttır. Kullanılan mekanik sistemin hareket hassasiyeti yaklaşık olarak 0.5mm'dir ve bu hassasiyet operatör parmak takibi olayı için yeterlidir.

Kurulan sistem sadece tek eksenle hareket takibi yapmasına rağmen dört serbestlik derecesinde konum okuması yapabilmektedir. Bu da gösteriyor ki kurulan sistemle dört serbestlik dereceli bir mekanik sistem de rahatlıkla kontrol edilebilir. Ayrıca sensör sistemine eklenecek bir karşı gözle sensör sistemi beş serbestlik derecesinde konum okuyor hale getirilebilir. Bu şekilde oluşturulan sensör sistemi ile okunamayan tek serbestlik derecesi operatörün parmağının kendi eksenine etrafındaki dönmesidir.

Sisteme ilave edilecek güç sensörleri yardımı ile sisteme KGB özelliği kazandırılabilir. Sistem şu anki haliyle operatöre sadece görsel ortamlarda temassız hareket hissi verilebiliyorken sisteme bir güç sensörü ilavesiyle operatörün farklı malzeme ve elastisitedeki yüzeyleri virtüel olarak hissetmesini de sağlanabilecektir.

Tüm bu sorunlara rağmen deneysel kısımda incelenen test sonuçlarından da anlaşıldığı üzere kurulan mekatronik sistemle genel itibariyle amaçlanan sonuca ulaşılmıştır. Sistem operatörün parmağını temassız olarak oldukça başarılı bir şekilde takip etmiştir.

Bu sonuçlardan yola çıkarak sistemin endüstriyel, tıbbi ve eğitime yönelik alanlarda rahatlıkla uygulanabileceği görülmektedir. Daha spesifik örnekler vermek gerekirse bu sistem görsel gerçeklik ortamlarından gerçeklik hissi almakta, ortamdan gelen fiziksel tepkileri de hissederek cihazların ya da makinelerin uzaktan kontrolünde, imalat tezgâhlarının kalibrasyonunda ve bunlara benzer daha birçok uygulamada kullanılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Berkelman, P.J., Hollis, R.L. and Baraff, D., 1999, Interaction with a realtime dynamic environment simulation using a magnetic levitation haptic interface device, Int. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3261-3266.

Bouzit, M., Burdea, G., Popescu, G. and Boian, R., 2002, The Rutgers Master II - New design force-feedback glove, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 7, no. 2, 256-263.

Brindley, K., Çevirenler: Dinçer, G. ve Bodur, A., 1998, Elektronik Mühendisi El Kitabı, Era Bilgi Sistemleri, 298 s.

Hayward, V., Astley, O.R., Cruz-Hernandez, M., Grant, D. and Robles-De-La-Torre, G., Haptic interfaces and devices, Sensor Review, 24(1), 16-29.

Gardner, N., Çeviren: Yalçın, C., 1998, PIC Programlama El Kitabı, Era Bilgi Sistemleri ve Yayıncılık Ltd., 122..

Gomez, D., Burdea, G. and Langrana, N., 1995, Integration of the Rutgers Master II in a virtual reality simulation, Virtual Reality Annual International Symposium, 198 – 202.

Kasap, M., Zafer, N. and Yilmaz, S., 2004, A robotic exoskeleton tracking human hand motions, Proceedings of the First Cappadocia International Mechanical Engineering Symposium(CMES¹-04), Vol. 3, 764-766.

Massie, T.H. and Salisbury, J.K., 1994, The PHANToM haptic interface: A device for probing virtual objects, Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, ASME Winter Annual Meeting Symp, vol. DSC-55-1, 295–300.

KAYNAKLAR DİZİNİ(devam)

Musayev, E., 2005, Yarıiletken ışın vericilerin bağlantı şekilleri ve besleme çeşitleri, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 10, Sayı 2, 63-78.

Salcudean, S.E. and Parker, N.R., 1997, 6-DOF desk-top voice-coil joystick, Proc. 6th Annual Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperation Systems, ASME Winter Annual Meeting, DSC, vol. 61, 131-138.

Yoshikawa, T. and Nagura, A., 1997, A touch and force display system for haptic interface, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 3018-3024.

Yoshikawa, T. and Nagura, A., 2001, A touch and force display system for haptic interface, Presence, vol.10, no.2, 225-235.