

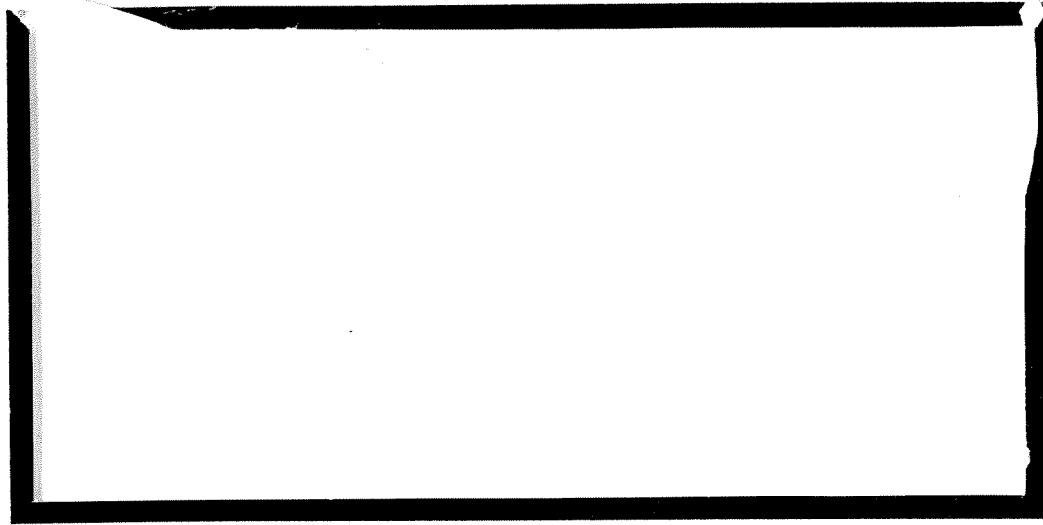
DUP

1997_160



TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY



Makina, Kimyasal Teknolojiler, Malzeme ve İmalat Sistemleri
Araştırma Grubu

Mechanical Engineering, Chemical Technologies, Material
Sciences and Manufacturing Systems Research Grant
Committee

**Bilinmeyen Değişken Ortamda Modelleyerek
İrdeleme ve Öğrenme Yöntemleriyle
Nesnelerin Değişik Algılayıcılardan Bilgi
Füzyonu Elde Edilerek Tanımlanması**

MODİSA- 2

Prof.Dr. Aydın Ersak
Y.Doç.Dr. M.Mete Bulut
Araş.Gör. Haluk Zontul
Araş.Gör. A.Serdar Yücel

1.12.1993
ANKARA

ÖNSÖZ

Rapor TÜBİTAK Misag Ünitesi tarafından desteklenmiş Modisa - 2 projesinde yer alan çalışmalarını özetlemektedir. Çalışma ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü Robotik Laboratuvarında (ROLAB) gerçekleştirilmiştir.

Proje ultrasonik duyaçlarla olabilecek ancak kamerayla elde olunmasının olanaklı olmadığı koşullarda, sözgelimi yoğun duman altında kalmış, bulanık bir suyun içinde, yada bir boya tankında gömülü nesnelerin elde olunan görüntülerinden tanımları, ve dolayısıyla yerlerinin ve konumunun (yönlendirilişinin) saptanmasını hedeflemektedir. Tanınan nesneler daha sonra işlenmek üzere bir robot kol ile buldukları yerden alınacaklardır. Bunun için de robot kolun yörünge denetimine hazırlık olacak kolun durağan ve dinamik modelleri , ve denetim algoritmaları ve yazılımları geliştirilmiştir. Bu yazılımlar nesneye yönelik bir tanımlama ve programlama yöntemiyle hazırlanmıştır. Kullanımı ve üzerine eklenecek yeni işlevsel yazılım birimlerinin bütünleştirilmesi kolay bir yazılımdır. Hem eğitime, hem araştırmaya yönelik bir biçimde hazırlanmıştır.

Proje Grubu TÜBİTAK MİSAG Ünitesine çalışma için verdiği destek, ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliğine Bölümüne de sağladığı laboratuvar olanakları nedeniyle teşekkür etmektedir.

İÇİNDEKİLER

Önsöz	ii
Şekiller ve Resimler Listesi	iv
Öz ve Abstract	v
1. Giriş	1
1.1 Problemin Tanımı	2
1.2 Hedefler	2
1.3 Alandaki Bilgi Birikimi	3
2. Tümüleşik Algılama	4
2.1 Doğrudan Tümüleşik Algılama	5
2.2 Özyinel Bir Algoritmayla Tümüleşik Algılama	5
3. Görüntü İşleme ve Nesne Tanıma	6
3.1 Alt-Düzey İşlemler	6
3.1.1 Önişlem	7
3.1.2 Orta-Düzey İşlemler	8
3.1.3 Üst-Düzey İşlemler	9
3.1.4 Uzaysal ve Geometrik Bilginin ıkartılması	9
4. Robot Kol Yörünge Planlaması	10
4.1 Robot Kol Yörünge Planlamasındaki Tümüleşik Algılama	11
5. Deneysel Araştırma alışmaları	12
5.1 Nesneye Yönelik Robot Kol Benzeşim Yazılım Paketi	13
5.2 Tümüleşik Algılama ve Görüntü Oluşturma	14
5.3 Görüntü İşleme	16
5.3.1 Eşikleme	16
5.3.2 Büzülme ve Genleşme İşlemleri	17
5.3.3 Bölge İşaretleme, Bölge Genişletme	19
5.3.4 Kenar Bulma	21
5.4 Model Oluşturma	22
5.4.1 Kenar Bilgisinin Kodlanması	23
5.4.2 Özellik Belirleme	23
5.4.3 Modelleme	24
5.4.4 Tanıma ve Yerleştirme	25
5.4.5 Tanıma Sistemi Üzerindeki Testler ve Sonuçları	28
6. Uygulama Düzeneği	32
7. Sonuç	36
EK - 1	41
EK - 2 Proje alışmaları Sürecinde Yapılan Yayınların Kopyaları	42

ŞEKİLLER VE RESİMLER LİSTESİ

Şekil 1	Doğrudan tümleşik algılama	5
Şekil 2	Özyinel bir algoritmali tümleşik algılama	6
Şekil 3	Görüntü işleme süreci	8
Şekil 4	Planlamadan eyleme geçiş sürecinde robot kolun temel birimleri arasındaki bilgi akışı	12
Şekil 5	Görüntü alıcı devrelerin blok şeması	15
Şekil 6	Sürücü devre şeması	15
Şekil 7	Alıcı devre şeması	16
Şekil 8	Görüntünün ham histogramı	17
Şekil 9	Görüntünün iyileştirilmiş histogramı	18
Şekil 10	Eşiklenmiş görüntü	18
Şekil 11	Büzülme işleminden geçmiş görüntü	20
Şekil 12	Genleşme işleminden geçmiş görüntü	20
Şekil 13	Bölge işaretleme ve bölge genişletme işlemi sonrası görüntü	22
Şekil 14	Kenar bulma işleminden sonra elde edilen görüntü	23
Şekil 15	Gitar'a ait kenar fonksiyonu	24
Şekil 16	Nesne ve modelin yerleşimi	25
Şekil 17	Modele ve nesneye ait kenar fonksiyonları	27
Şekil 18	Dönüşüm matrisinin modele uygulanmasıyla nesne üzerine yerleştirilen model	28
Şekil 19	Modelleri oluşturulan nesnelerin ultrasonik görüntüleri	29
Şekil 20	Kullanılan nesnelerin modelleri	29
Şekil 21	Nesnenin (Gitar) görüntüsü, tanınan nesnenin ve onun modelinin sınır çizgileri ve konumu	30
Şekil 22	Küp biçiminde bir çöp kovasının görüntüsü, nesnenin tanınmış biçimi	30
Şekil 23	Dört ayrı geometrik nesnenin görüntüleri, nesnelerin tanınmasından sonraki biçimleri	31
Şekil 24	Bir nesnenin görüntü eklenmiş ve düşük çözünürlükte görüntüsü, nesnenin tanınma sonrası biçimi, ve model	32
Resim 1	Uygulama düzeninde yer alan donanımın genel görünümü	33
Resim 2	8- çift ultrasonik dönüştürücü	33
Resim 3	Besleme regülatörleri ve kontrol kartına giriş/çıkış devresi	34
Resim 4	Salıngaç devresi	34
Resim 5	Ultrasonik vericileri süren analog anahtarlar	35
Resim 6	Ultrasonik alıcılardan gelen sinyal girişi ve ön yükselticiler	35
Resim 7	Şekil 7'de görülen alıcı devresi	36

ÖZ

Rapor "Bilinmeyen Değişken Ortamda Modelleyerek İrdeleme ve Öğrenme Yöntemleriyle Nesnelerin Değişik Algılayıcılardan Gelen Bilginin Birleştirimi Yoluyla Tanımlanması" konusunda yapılan çalışmaları özetlemektedir. Birden çok algılayıcıdan edinilen bilgilerdeki duyaçlardan ileri gelen belirsizlikler ve gürültü önce en aza indirgenmektedir. Burada önışlem algoritmaları kullanılmaktadır. Duyaç bilgisindeki belirsizlik ve eksilikler diğer duyaçlardan elde olunanlarla tamamlanmakta sonuçtaki görüntünün taşıdığı bilginin tama yakın olması sağlanmaktadır. Bundan sonra görüntü üzerinde nesne tanıma algoritmaları uygulanmaktadır. Nesne tanıma, kenar çizgisi belirlenmiş nesne örüntüleri üzerine inşa edilmiştir. Nesnenin kenar çizgisi, bu çizginin boyu, örüntünün ağırlık merkezi, ve birinci ve ikinci momentlerin bellekteki modelde tanımlananlarla karşılaştırılmasıyla tanıma işlemi tamamlanmaktadır. Tanınmayan yeni bir nesne örüntüsü ve ilişkili bilgiler yeni bir nesne olarak tanımlanmaktadır. Sisteme bu yöntemle öğrenebilir bir yapı kazandırılmıştır.

Gerçekleştirilen donanımsal yapıda ultrasonik duyaç dizisi bir robot kol bileğine bağlanmış tüm tarayarak alınacak görüntü kol bir tür süpürme hareketi sonucunda alınmaktadır. Kol bu işlemi takiben üzerinde işlem görülecek nesnelere tanyıp, yerlerini ve duruş biçim ve yönlerini belirledikten sonra gerekli manevralara başlayabilecektir. Bu ise kolun yörünge planlamasının yapılmasına ilişkin çalışmalara konu olmaktadır.

Çalışma ekinde çalışma sürecinde yapılmış olan yayınların (Türkçe) birer kopyası verilmektedir.

ABSTRACT

The report summarizes the approach and findings in a study on "Model Based Recognition and Learning of the Characteristics of Objects by Sensory Fusion in an Unknown Environment". As a first step ambiguities on the collected information due to the ultrasonic device uncertainties and the noise is reduced by preprocessing of the image. Information obtained from multiple sensors when fused reduces the inherited device uncertainty and noise in the final image so that information lacking in the image may be compensated by that supplied from another sensor. Following this phase algorithms related to object recognition are applied on the preprocessed image.

The object recognition is based on the pattern of outer boundary of the object whose inner surface area taken out. The outer boundary, the path length of the boundary, center of gravity of the object, and the first and the second moments of the object are compared to match with those of the model in recognition of the object. Any object characteristics not matching with those of the model is identified as a new object which is to be added into the library. The system with this feature is considered to be a system having the ability of learning.

In the hardware structure an array of 8 pairs of ultrasonic transducers are placed on the wrist of a robot arm for scanning the scene involving the objects to be recognized. The robot arm recognizes the objects, determines their positions and the orientations of the objects and then plans its trajectory, preshapes and plans its fine motion for grasping in accordance with this data.

The report includes copies of the papers to publicize the results.

1.Giriş

Projenin adı "Bilinmeyen Değişken Ortamda Modelleyerek İrdeleme ve Öğrenme Yöntemleriyle Nesnelerin Değişik Algılayıcılardan Gelen Bilginin Birleştirimi Yoluyla Tanımlanmasıdır". Konu robot bilim alanında halen yaygın bir araştırmacı kitlesinin ilgisini çeken, üzerinde yoğun olarak çalışılan bir alandır. O nedenle, sonuçları bilimsel yayın dünyasında yer alacak bir çalışmadır. Robot bilim alanında yapılan ve tüm alanı kapsayan konferansların hemen hepsinde en az iki oturum bu alanda yapılan çalışmaların sunulmasına ve değerlendirilmesine ayrılmaktadır. Öte yandan, NATO'nun özellikle bu alandaki çalışmaların sunulması için düzenlediği Advanced Study Institute ve Advanced Workshop türü birçok organizasyonun olması da konunun önemini göstermektedir.

Konu, özel olarak ultrasonik duyaçlarla olabilecek, ancak kamerayla elde olunmasının olanaklı olmadığı, koşullarda görüntü almayı hedeflemektedir. Sözgelimi, yoğun duman altında kalmış, bulanık bir suyun içinde yada bir boya tankında gömülü bulunan, yada üzerinde işlem görülürken çok sık aralıklarla değişen ışık şiddeti altında aydınlatılan nesnelerin elde olunan görüntülerinden bunların daha önceden edinilen modellerine dayanarak tanınmasının gerekli olduğu durumda böyle bir ihtiyaç vardır. Ultrasonik duyaçların taşıdığı bilginin bir kameradan edinilenlerle karşılaştırıldığında açıkça görülen belirsizliklerinin üstesinden gelinmesi için geliştirilecek tekniklerin kazanılması amaçlanmaktadır. Bu sonuçlar daha sonra yürütülecek çalışmalarda kamera gibi başka tür araçlarla edinilecek bilgilerle ultrasonik yolla edinilen bilgilerin birleştirildiği ortak bir veri tabanı üzerinde kullanılacaktır. Böylelikle, elde olunan daha sağlıklı yapıdaki veri tabanındaki bilgiler robot kolların yörünge denetiminde kullanılacaktır.

Görüldüğü gibi proje kapsamı birden çok araştırma konusuyla ilintilidir. Bu çalışmaların bazıları bitirilmiş, bazıları ise hala devam etmektedir. Bazıları ise henüz başlayacaktır. Nesne tanımaya ilişkin olan tamamlanmıştır.^[1,24] Rapor bu çalışmaları ayrıntılı olarak vermektedir. Proje kapsamında ilintili olan ancak doğrudan proje hedefleri arasında yer almayan iki ayrı çalışmada raporda ilgileri nedeniyle gereken boyutta sunulmaktadır. Bunlardan biri robot kol denetiminde ve benzeşim uygulamalarında kullanılmak üzere geliştirilen nesneye yönelik robot kol tanımlama yazılım paketidir.^[27] Bu pakette denetim için gerekli araçlar hazırlanmış hem tarafımızdan hemde bu alanda çalışan diğer uygulayıcılar ve araştırmacılar tarafından birçok kez kullanılmıştır. Böylelikle robot el denetiminde elin ön biçimlendirmesi ve kavraması problemleri de dahil olmak üzere çok farklı uygulamalar altında sınanmıştır, ve başarılı bulunmuştur. Robot kol yörünge denetimi tam olarak kamera görüntülerinin ultrasonik yolla alınanlarla birleştirilmesi için yapılacak çalışmalardan sonra çalışır olacaktır.

Atıfta bulunulan ikinci çalışma ultrasonik algılayıcılarla kendinden devinimli hareketli bir robotun engellerden kaçınarak gerçekleştireceği yol planlamasına ilişkindir.^[32,28] Ortam önceden bilinen bir ortam olarak alınmıştır. Çalışmada başarılı bir planlama yapılabilmiş, sistem deneysel olarak da sınanmıştır. Bu çalışmada da eksik olan husus yine

kamera görüntüsü bilgisinin ultrasonik olan ile birleştirilmesidir. Ancak, çalışma yörünge planlamasının gerçekleştirilmesi için gerekli ve ilişkin altyapıyı büyük ölçüde hazırlamıştır. İltintili bütün çalışmalar projenin bir yıllık süresi içinde gerçekleştirilemeyeceğinden halen süren ve başlayacak olan diğer çalışmalar projenin baştan öngörülen hedefleri arasında yer almamaktadır.

Projede kullanılan duyaçlar sıvı içinde çalışan cinsten değildir. O nedenle, çalışma hava ortamında gerçekleştirilmiştir.^[1] Bunun geliştirilen teknikler açısından önemli bir farklılık yaratması beklenmemektedir. Nesnelerin hava ortamında ultrasonik yöntemle görüntülenmesinde sesin havada hızla genlik kaybına uğraması sorunu sıvı ortam için daha yan bir sorun olarak ortaya çıktığından çalışmanın daha elverişsiz koşullara göre yürütüldüğü kabul edilmelidir. Öte yandan, sıvı içinde kullanılan duyaçlar daha yüksek frekansta çalışmakta ve o yüzden dalga boyu daha kısa olmaktadır. Yüzeysel bilgiler o nedenle daha yüksek ayrıntı taşıyabilecekken derinlik bilgisi ise kısılacaktır. Yani avantajının yanında bir dezavantajda sahiptirler. Sistemin gerçekte olması gereken elemanlarla tasarımı elbette önemli olduğundan gerçekleşen sistemin bir farklılığa sahip olduğu belirtilmelidir. Bu duyaçlar yurtdışından gerek pahalılıkları, gerek ihtiyacımız olan sayının azlığı nedeniyle getirtilememiştir.

1.1 Problemin Tanımı

Problemin ana teması nesne tanımadır. Tanıma işlemi için görüntü birden çok duyaç sağladığı bilgilerin tümünden türetilmektedir. Bundan amaçlanan daha kesin ve net görüntü elde edilmesidir. Görüntüde varolan gürültü ve duyaç çıkışındaki belirsizlikler giderilmiş olmalıdır. Nesnelerin, yapısı önceden bilinen ama giderek değişen bir ortamda (çevrede) yer aldığı varsayılmaktadır. Başlangıçta ortamın barındırdığı ve tanımaya dayanak olacak özelliklerin zamanla değiştiği, ayrıca bu ortamda nesnelere yerlerinin değiştiği varsayılmaktadır. Bu durumda hem nesnelerin modellerinin hepsinin elde varolduğu, hemde ortamdaki belirleyici özelliklerin başlangıçta bilindiği kabul edilmektedir. Nesne tanıma işlemi o nedenle nesnelerin bu modellerine dayalı olacaktır. Ancak, modelde yer almayan yeni bir nesnenin ortama girmesi durumunda sistem bunu ayırdederek tanımlanmasını operatörden isteyecektir. Yeni nesne de bunu takiben modele dahil edilecektir.

1.2 Hedefler

Projenin varmayı hedeflediği noktalar şunlardır:

- i. Elde olunan herhangi kabul edilebilir bir görüntüdeki nesnelere modelde tanımlananlarla karşılaştırarak tanıyacak bir algoritma geliştirmek,
- ii. Nesne tanıma işleminde farklı duyaç cinslerinden gelen bilginin bir çerçevede (sözgelimi, ortak bir veri tabanında) birleştirilmesi halinde de geçerli olacak yöntem geliştirmek,

iii. Her iki yazılımı bir robot kolun yörünge denetiminin

- geniş eylem planlamasında (gross motion planning)
- ve dar eylem planlamasında (fine motion planning)

içine yerleştirmek üzere hazırlamaktır.

1.3 Alandaki Bilgi Birikimi

Optik, elektriksel, yada mekanik araçların uygun olmadığı kötü çevresel koşullar altında kullanılmak üzere ultrasonik yöntemle yüzey görüntüleme çalışması daha önce gerçekleştirilmiştir.^[2,6] Ciddi boyuttaki gürültü problemleri ve uzaklıkla hızlı genlik kaybı sonucu tanımadaki zorluk nesnenin modelinin önceki taramalardan elde olunan bilgilerle yenilenmesiyle aşılabilmektedir. Yüzey görüntüleme işleminin bu çalışmada yakın uzaktan, yaklaşık 100 mm, olarak yapılması bir avantaj olmuştur.

Öte yandan, robotların yakınındaki nesnelerin ayırdedilebilmesi ve robot-nesne arasındaki etkileşimin saptanması çabaları çerçevesinde insansız robot uygulamaları için robot algılama sistemlerinin bir parçası olarak da ultrasonik uzaklık ölçme ve belirleme çalışmalarının yapıldığı rapor edilmektedir.^[3-5] Çalışmalar bir çift ultrasonik alıcı-verici kullanmakta, ölçüm alan derinliğide 20 - 2000 mm arasındadır. Çalışmalar daha çok robot kol'un ucuna takılmış olan ve işlevde bulunan araçta ortaya çıkan yıpranmanın boyutunu saptamaya yöneliktir. Deneylerde kullanılan nesnelere prizmatik yada silindirik biçimde seçilmişlerdir. Kullanılan ultrasonik algılayıcıların çalışma frekansı 40 ve 200 kHz'dir.

Ultrasonik yöntemle görüntü elde edilmesi sorunlarının dışında herhangi bir yöntemle edinilen görüntü içindeki nesnelerin çeşitli ayrıntı düzeyinde birer betimlemesinin elde edilmesinde geliştirilen teknikler ancak çeşitli kısıtlamalar altında geçerlidir. Düzlemde tanımlanmış bir nesneye ait dış sınır çizgisinin bir bölümüyle modelde buna karşı gelen çizgi bölümünün karşılaştırılması için nesneye ait uygun görüntü elde edilmesine yönelik bir çalışma Gaussian düzeltme tekniklerinin uygulanmasını, sonuçta döndürme, bir örnek ölçeklendirme ve bir noktadan diğerine hareket ettirme işlemleri altında değişmeyen bir biçimde olmasını sağlamak üzere önermektedir.^[17]

Nesnelerin tanınmasında iki temel yaklaşım vardır. Birincisinde model veri tabanındaki her nesnenin bir modeli görüntüdeki nesneye karşılaştırılır ve bir çakışma değerine sahip kılınır.^[17,18,20] Bilinmeyen nesne en yüksek çakışma değeriyle tanınır. Sözelimi, bir nesnenin sınırının alt parçalarının önemine göre değerlendirilmesi bir kistas olarak alınabilir ve bunlardan en önemli alt parçaların modeldekilerle çakışıklığı daha ağırlıklı biçimde çakışma değerinin hesaplanmasında kullanılabilir. Yöntemin sorunu model sayısı arttıkça her modele olan çakıştırma için hesaplama zamanının hızla artıyor olmasıdır. Bu yaklaşıma örnek bir çalışmada üstüste binmiş yada gölgede kalmış düzlem üzerinde duran nesnelerin tanınmasında nesne sınırlarının yine öncekine benzer biçimde yerel ve küçük boyutta betimlenmesinin çözüm için iyi bir yaklaşım olduğu

bildirilmektedir.^[17,18] Kullanılan yöntem, nesne sınır parçalarının toplamının olası modellerden hangisine uyduğunu önermeye, ve önerimin doğrulanmasına dayanmaktadır. Soyutlanmış, yada üstüste binmiş iki boyutlu nesnelerin modele dayalı olarak tanınması için Hopfield sinir-ağı tekniği kullanılarak da bir çözüm bulmaya ilişkin çalışmanın varlığı bilinmektedir.^[19] Proje kapsamında da bu tekniğin kullanılması denemesinde nesnelere betimleyen özellikler olarak bir merkez etrafında dönerken rastlanan köşelerin bu merkezle yaptıkları açılar ve köşelerin merkeze olan uzaklıkları dikkate alınmıştır. Ancak, bu özelliklerin tanımaya uygun olmadıkları benzerlik gösteren şekillerin ayırdedilemediği görülerek yöntemin kullanımından vazgeçilmiştir.

Nesnelerin konum, büyüklük ve düzlemde döndürülmelerinden bağımsız tanınması sorunu için yüksek-dereceden sinir-ağı kullanarak çözüm üretilmek üzere yapılan hesaplama-yoğun çalışmalar giderek daha ümitvar sonuçlar vermektedir.^[9,20] Yüksek-dereceli sinir-ağı şeklindeki bozulmalardan bağımsız tanıma olanağını da ağ mimarisine dahil edebilmektedir. Böyle bir sinir-ağının herbir nesnenin sadece bir görüntüsü üzerinde eğitilmesi yeterlidir. Böylece gereksiz yere bozulmuş görüntülerin öğretilmesi de gerekmemektedir.^[20]

Nesnelerin tanınmasında ikinci temel yaklaşım görüntünün her modele karşılaştırılması sürecini ortadan kaldırmaya yöneliktir.^[13,21] Burada modelin görüntüde var mı, yok mu olduğunu görmek için bir önerimin geliştirilmesinde yerel özellikler kullanılmaktadır. Önerim daha sonra modelin görüntüsüyle nokta nokta karşılaştırılarak doğrulanmaktadır. Önerimlerin geliştirilmesi için çeşitli teknikler bulunmuştur. Bir özellik indeksli önerim tekniği nesne tipleri arasındaki benzerliklerden ve farklardan yararlanmaktadır.^[21] Olası nesne kümesinde birden çok kez ortaya çıkan özellikler (sınır çizgi parçaları) çeşitli önerimler üretmek üzere listelenirler. Yanlış bir önerim bu liste yoluyla kolaylıkla ortaya çıkarılabilir.

2. Tümlleşik Algılama

Sistemin denetiminde kullanılacak belirlenmiş bilginin türetimi için sistemin ve çevrenin davranışı hakkında bilgi taşıyan çok sayıda duyaç bilgisinin sistematik biçimde işlenmesi sürecine tümlleşik algılama denilmektedir. İşlemin sistematığı üzerinde bugüne dek yaygın olarak çalışılmasına rağmen duyaç verilerinin birleştirilmesi ve yorumlanması için genel olarak uygulanabilirliği kanıtlanmış bir yöntem geliştirilememiştir. Bunun da nedeni duyaçların çok çeşitli türde olması yanında araştırmaların çoğunlukla kamera gibi araçlara yönelmiş olmasındandır.

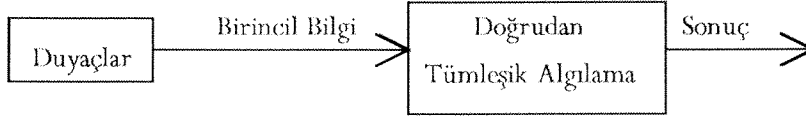
Çok sık olarak tümlleşik algılama gerektiğinden fazla duyaç verisinin kullanılmak zorunda kalındığı durumlarda öne çıkmaktadır. Yöntem, bir durum-değişkeninin gerektiğinden çok sayıda duyaçlarla izlendiği sistemlerde rastlanılan problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Sözelimi, bir nesnenin konumunun belirlenmesi için birden çok ve farklı karakteristikli duyaçlarla yapılan ölçümlerde ölçüm kesinliği, gürültü, her koşulda ölçüme hazır olup olmama v.b. özelliklerin değişken çalışma koşullarında farklı

karakteristikler gösterdiği durumlarda tümleşik-algılama kavramı kullanmak gerekmektedir. Eğer bir duyaç görevi yapamaz duruma gelmişse diğerlerinden gelen bilgilerle sistem çalışmaya devam edebilecektir.

Tümleşik algılama yönteminin kullanılmasında izlenecek iki yol vardır: Doğrudan Tümleşik Algılama, ve Özyinel bir Algoritmayla Tümleşik Algılama.

2.1. Doğrudan Tümleşik-Algılama

Duyalardan edinilen birincil bilgi (duyalardan gelen ve işaret koştullandırma işleminden geçmiş, sayısalıştırılmış ve önişlem görmüş bilgi) tümleşik bilgiyi türeten bir algoritma ile doğrudan işlem den geçirilerek kullanılır. Burada duyalaların tek tek karakteristikleri, ölçüm belirsizlikleri v.b. tür özellikleri uygun biçimde dikkate alınmalıdır. Bu yöntem için şu ana kadar hiçbir genel kavram geliştirilememiştir. Buna karşın çok sayıda öneri vardır.



Şekil 1 Doğrudan Tümleşik Algılama

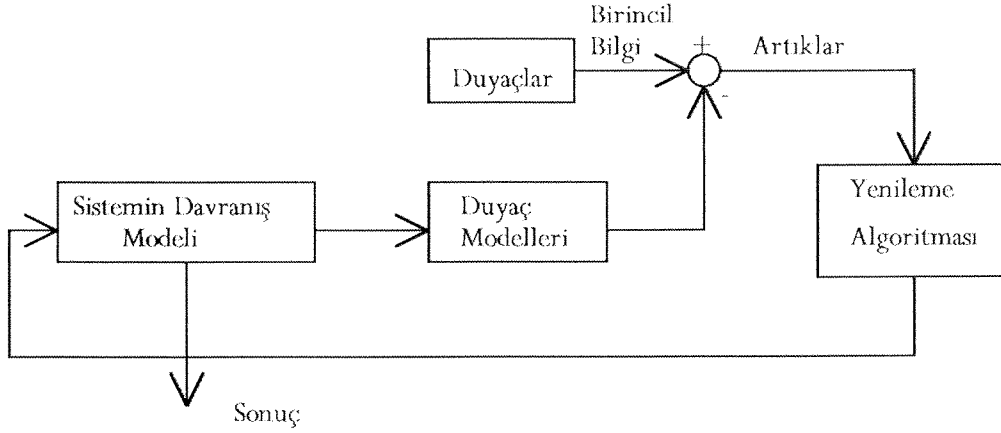
2.2. Özyinel Bir Algoritmayla Tümleşik-Algılama

Yöntem birçok pratik probleme uygulanabilir çok genel bir yaklaşımdır. İki matematiksel model ve bir yenileme algoritmasından oluşur. Modellerden biri duyalardan birincil bilginin sistemin davranışına bağlı olarak (robotun, nesnelerin, v.b. hareketleri gibi) nasıl üretileceğini betimler. Öteki model sistemin davranışını (robot kolun, nesnelerin, v.b. durumları gibi) betimler. Bu model çeşitli düzeyde karmaşık olabilir. Eğer, model 3-boyutlu uzayda (çok küçük bir nesneyi) bir noktayı betimliyorsa durum vektörü, bir konum vektörü \mathbf{p} , bir hız vektörü \mathbf{v} , ve bir ivme vektörü \mathbf{a} (hepside 3-boyutlu uzayda olmak üzere) biçiminde parçalanabilir, ve bunlar 9 değişkenli bir türevsel denklemlerle birbirlerine bağlanabilir:

$$\mathbf{p} = \mathbf{v}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{a}$$

Eğer, nesne belirli bir büyüklüğe sahipse, konumu ve yönü 6 bağımsız değişkenle betimlenir.



Şekil 2 Özyinel bir Algoritmalı Tümlleşik Algılama

Özyineli algoritmanın gerçekleştirilmesi için kuramsal taban Kalman-Filtresidir, KF. Kalman filtresi için yenileme mekanizması ya en küçük kareler, yada minimum değışinti (variance) algoritması olarak seçilebilir. Sistem modeli

- türevsel denklem biçimindeyse Kalman Filtresi sürekli zaman biçiminde,
- fakat eğer fark denklemleri cinsinden tanımlanmışsa o zaman Kalman Filtresi kesikli-zaman biçiminde

seçilir.

Yine, eğer model doğrusal ise, temel Kalman filtresi yok eğer model doğrusal değilse, Genişletilmiş Kalman Filtresi olarak seçilir.

3. Görüntü İşleme ve Nesne Tanıma

Duyuşlarla alınarak işlenen görüntü Şekil 3 de gösterildiği üzere üç düzeyde hiyerarşik biçimde sınıflandırılan bir süreçten geçmelidir. Bunlar sırasıyla alt-, orta- ve üst-düzye işlemlerdir. Nesne tanıma orta- ve üst-düzye yer alan bir işlemdir.

3.1 Alt-Düzye İşlemler

Duyuşlardan alınan (çoğunlukla analog biçimde) bilgi duyuşların karakteristiklerinin benzerleştirilmesi, bir ara devreden geçirilmesi (impedans bağdaştırımı gereği nedeniyle), süzülmesi işlemlerinden sonra ilk ham görüntü elde olunur.

3.1.1 Önişlem

Ham görüntüde çeşitli nedenlerle yeralan gürültü etkilerinin giderilmesi, ve ayrıntıların öne çıkarılması için yapılan bir işlemdir. Önişlem Uzay Tanım Kümesi yada Sıklık Tanım Kümesi olarak adlandırılan iki ayrı yöntemden biri izlenerek gerçekleştirilmektedir. Bunlar kısaca şöyle ayrıştırılmaktadır:

- Uzay Tanım Kümesi Yöntemler (Spatial Domain Methods): Uzay tanım kümesi bir görüntüyü oluşturan pixellerin tümüdür. Yöntem bu pixeller üzerinde yürütülen işlemlerin bütünüdür.

- Sıklık Tanım Kümesi Yöntemler (Frequency Domain Methods): Sıklık tanım kümesi görüntünün Fourier dönüştürümü sonucu ortaya çıkan karmaşık pixellerin tümüdür. Her ne kadar Fourier dönüştürümü nesne hareketi ve tanımlaması çözümlerinde çok önemli bir rol oynuyorsa da işlem yoğun yapısı nedeniyle bu yöntem önceki kadar yaygın değildir.

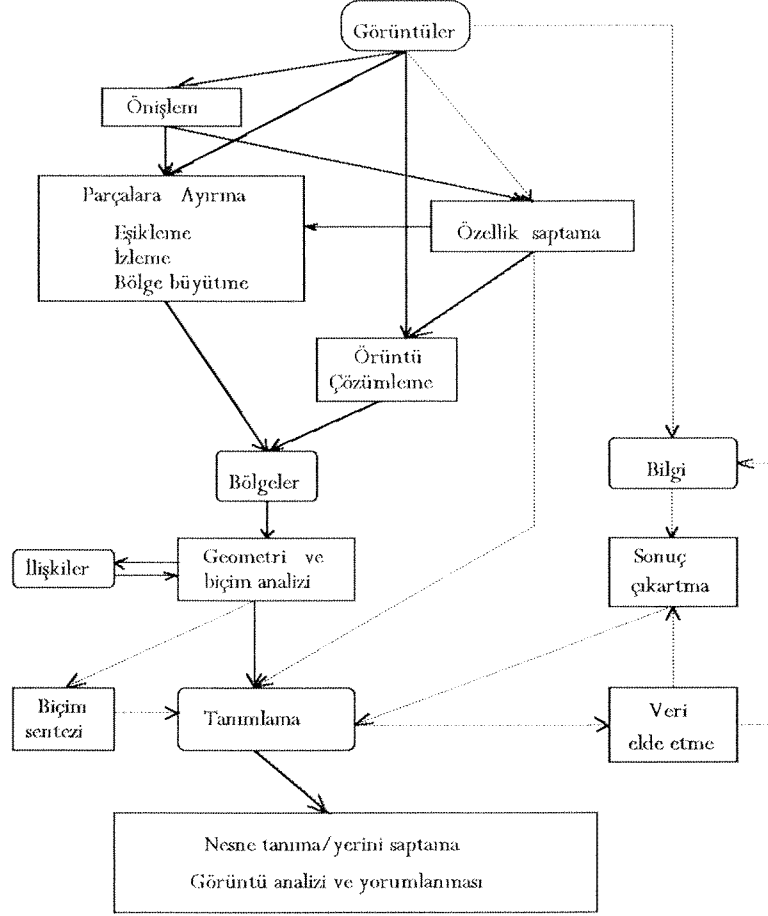
Bu iki yöntemden biri ile yapılan önişlem çerçevesinde görüntü üzerinde örnekleme, sayısallaştırma gibi işlemlerle görüntünün bilgisayara iletimi yada görüntü alma sırasında çevreden gelen gürültünün etkisi azaltılır.

Görüntüde grilik düzeyinin daha yumuşak bir değişim göstermesi için Komşu Alanların Ortalaması adıyla anılan bir uzay tanım kümesi tekniği kullanılmaktadır. Öte yandan görüntü içinde bulunan nesne görüntülerinin kenarlarında ve keskin ayrıntılarda ortaya çıkan bulanıklığı gidermek için Ortanca Süzgeç (Median Filter) kullanılmaktadır.

Aynı ortamın birden çok görüntüsünün varlığı halinde buraya kadarki işlemlere ek olarak bu görüntülerin ortalamasını alarak son görüntünün oluşturulması gerekmektedir.

Öte yandan, arkadan yada yapılandırılmış ışıklandırma kullanılarak elde olunan ikili düzeyli görüntülerdeki gürültü düzensiz sınırların, küçük deliklerin, kesilen köşelerin ve izole noktaların ortaya çıkmasına yol açar. Gürültü uzay tanım küme teknikleriyle ortadan kaldırılır.

Görüntüde gürültünün yanında yansımalar, parlak bölgeler ve gölgeler bulunabilir bunların giderilmesi, görüntünün iyileştirilmesi gerekir. Ancak eğer işlem yerel anlamda gerçekleştirilirse bu yöntem ayrıntılar için daha uygun olacaktır. Görüntünün tümü üzerindeki ışık şiddetinin dağılımına dayalı bir iyileştirme ayrıntılar için uygun değildir. Burada bu amaçla kullanılan yöntemler Histogram Eşitleme ve Histogram Tanımlama yöntemleri kullanılmaktadır. Birinci yöntemle görüntü iyileştirmelerinin bir tür histogram doğrusallaştırma işlemiyle otomatik eşitleme biçiminde olması sağlanır. İkinci yöntem önceden kararlaştırılmış belirli bir ışık şiddetinde görüntü yaratmak için kullanılır.



Şekil 3 Görüntü İşleme Süreci

Bunların dışında nesnelere ait kenarların saptanması işlevi vardır ki bunlarda temel olarak yerel türev operatörünün hesaplanmasıyla gerçekleştirilir.

Yüksek veri hacmine sahip uygulamalarda nesne tanıma işlevi yerel, yada global ve ayrıca dinamik olarak eşikleme yöntemiyle gerçekleştirilmektedir.

3.1.2 Orta-Düzyey İşlemler

Bu düzeyde gerçekleştirilen işlemler görüntü bileşenlerinin etiketlenmesi, özelliklerin belirlenmesi, ve karakteristiklerin saptanması biçiminde olmaktadır. İşlemler üç başlık altında sınıflandırılabilir:

- Ayrıştırma

İşlem görüntünün ilgililenen nesnelere ait bölgelere parçalanmasıdır. Bölgeler birkez ayrıştırılıp, tanımlanıp ve etiketlendikten (yada parametrelendirildikten)

sonra özel matematiksel modellerle sayısal analiz, sınıflandırma ve karşılaştırma için bölgelerin yapısal (yada dokusal) içeriği ve biçimsel geometrisi saptanır.

- Betimleme

Bir nesnenin diğerinden ayırtedilebilmesi için özelliklerin hesaplanması, örneğin; büyüklük ve biçim gibi işlemler bu bölümdeki işlerdir.

- Nesnelerin Tanınması

Nesneleri örneğin; civata, somun, motor bloku gibi, tanımaya yönelik işlemlerdir. Görüntünün tanımlanmasının daha ileriki aşamalarında ve analizinde ilişkili yapılardan yararlanır. Bu tanımlamada hem biçim, hem her bileşenin içeriği (yada atfedilen değerler) ve hemde bileşenler arasındaki ilişkinin türü yer almalıdır. İlişkilerin karşılaştırılması ve bunlardan sonuç çıkartılması için matematiksel ve algoritmik modellerde geliştirilmiş bulunmaktadır.[13]

3.1.3 Üst-Düzy İşlemler

Üst düzey işlemler konusunda genelliği ve geçerliliği üzerinde ortak bir kanaatin olduğu bir yöntem henüz yoktur. Bol miktarda öneriler geliştirilerek bu işlemlerin niteliği tanımlanmaya ve buna dayalı gerçekleştirme yöntemleri sunulmaktadır. Henüz gelişme halinde olan bir alandır. Ancak, kabaca bu işlem düzeyinde beklentinin tanınan nesnelerin tümünün oluşturduğu görüntünün anlamlandırılması olduğudur denilebilir.

Üç-boyutlu robot görüşünde görüntü işleme ve çözümlene süresi kısa olmak durumundadır. Görüntüler bir fabrika ortamında genellikle daha karmaşıktır. Verilerin yeterince işlenmesi, dönüştürümlerin ve çeşitli düzeyde analizin gerçekleştirilmesi görevin izin verdiğinin ötesinde zaman almaktadır. Yeni eğilim bazı ara işlemlerin Şekil 3'de noktali çizgilerle gösterildiği biçimde atlanması yönündedir. Bu ise ancak ön-işlemin atlanmasına, yada burada elimine edilecek gürültünün kalmasına izin verecek şekilde nesnelere hakkında özel bir ön bilgi varsa olanaklıdır. Gerçek dünyanın karmaşık modeline uygun olarak biçim sentezinin gerçekleştirilmesi ve nesnelerin modellenmesi, tanınması, ve yerlerinin belirlenmesi için bilgi toplamayı otomatik olarak yapmak olanaklıdır.[14]

3.1.4 Uzaysal ve Geometrik Bilginin Çıkartılması

Bunun için stereo görüş ve özel amaçlı ışıklandırma teknikleri kullanılmaktadır. Stereo görüş için stereoskopik görüntü çiftleri gerek korelasyon, ve gerek üst üste binmiş kısımların çözündürülmesi gibi tekniklerin yardımıyla çakıştırılarak üç-boyutlu geometrik bilgi oluşturulmaktadır.

Özel amaçlı ışık gibi yapay ışıklandırma özellikleri görüntü çiftlerinin bağdaştırılması sürecine yardımcı olan ek bilgi ve kısıtlar getirir. Gölgelemedeki değişim,

yada dokulu örüntüler de ayrıca görüntünün tanınmasında yüzey yön tayinini kısıtlamakta kullanılır. Laser tarama bir başka özel amaçlı ışıklandırma yöntemidir. Çoğunlukla derinlik haritası yada derinlik görüntüsü elde etme amacıyla kullanılmaktadır.

4. Robot Kol Yörünge Planlaması

Robot kolu yörünge planlaması robotun başlangıçta bulunduğu noktadan herhangi bir işlem yapılacak nesneye erişmek için kolun ve asıl önemlisi robotun son uç-elemanın izleyeceği yörüngeyi saptanması sürecidir. Robot harekete başladığında bu yolu izleyecektir. Robot kol bir hücre içinde çalışıyorsa, büyük olasılıkla, kolun bulunduğu ortam yapısı daima önceden bilinen bir cinstendir. Kolun hareketi herhangi, yabancı ve üstelik hareketli, bir nesne tarafından engellenmez. Bu durumda engelden sakınma sorunu gibi bir sorunla karşılaşmaz. Engelden sakınma problemleri daha çok kendinden devinimli hareketli robotlar için ele alınmaktadır.[28] Çalışmada söz konusu edilecek olan robot kollarla ilgilidir. Robot kollar için tasarılacak duyaç sisteminde modelleme ve planlamayla birlikte gerek kolun kendisine, gerek üzerinde çalışılan parçalara ilişkin belirsizliklerin üstesinden gelmek üzere tümleşik algılama yöntemine dayalı öğrenme ve akıl yürütmeyi içeren sistemlere sahip olmak durumundadır. Böylece duyaçsal tümleşim teknikleriyle donanmış robot kol sistemi daha gelişkin bir esnekliğe, genelliğe ve güvenilirliğe sahip olacaktır.[10,11]

Bu kapsamda bir robot kol için donanım ve yazılımlardan oluşan temel birimler ve onların alttan üste doğru hiyerarşik olarak dizilimi şöyledir:

1. Mekanik ve sürücü sistem,
- 2.. Duyaç sistemi
 - iç duyaçlar (robotun eklemlerindeki duyaçlar, v.b.)
 - dış duyaçlar
3. Planlayıcı
 - Planlayıcı
 - uzman sistem
 - bilgi tabanı
 - meta bilgi
4. Dünya koordinatlarında geliştirilmiş model
 - durağan model
 - dinamik model
5. Veri toplama ve modelin yenilenmesi
6. Bilgisayar sistemi

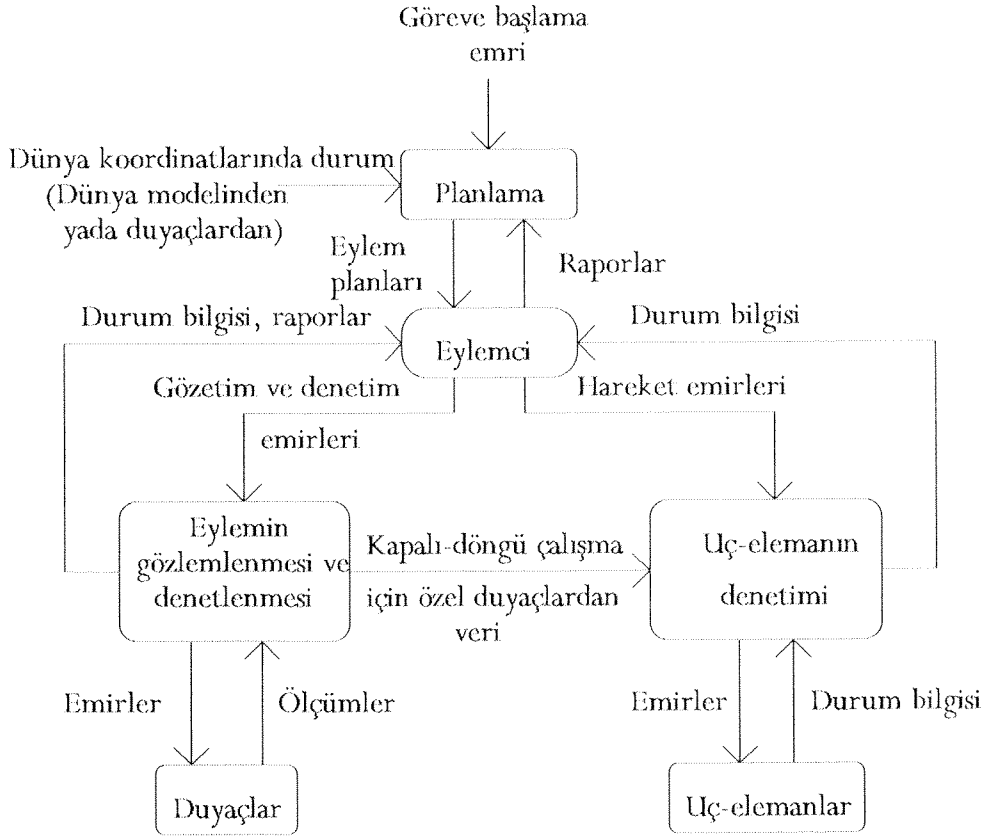
Tümleşik algılama bu birimlerden birincisi hariç diğer beşinin yapısıyla doğrudan ilintilidir.

Yukarıdaki hiyerarşi çerçevesinde eğer bir planlama varsa hareket bu plana göre başlatıldığında karmaşık bir duyaç sistemi de harekete geçerek hareketi yörünge boyunca hem gözlemler, hem yönlendirir. Bu arada bilgi işlem birimince hem çelişkiler ortaya çıkarılır, hem çözümlenir.[24,28] Planlamadan eylemin gerçekleştirilmesine kadar geçen süreçte robot kolun temel birimleri arasındaki bilgi akışı Şekil 4 de gösterilmektedir. Şekil 4'den görüldüğü gibi planlama-eylem sürecinde çok yoğun bir bilgi toplama, derleme, değerlendirme ve aktarma işlemi vardır. Önemli olan bu bilgi işlemlerinin en etkin ve ekonomik biçimde gerçekleştirilmesidir.

4.1 Robot Kol Yörünge Planlamasında Tümlleşik Algılama

Robot kol yörüngesi (planlanan yol) üzerinde hareket ederken önünde hareketini engelleyecek nesnelere bulunmayacağı varsayıldığına göre, hareketi süresince erişilecek nesnenin yakınına dek yolu izleyip izlemediğini gözlemlemekte gerekmeyecektir. Ancak, nesneye yaklaşıldığını kendi iç duyaç sisteminden, örneğin eklem açılarının izlenmesinden, bilebilecektir. Yaklaşımın gerçeklik kazanmasıyla birlikte ayrıca elde olunan kamera görüntülerinden uç-elemanın konumu ve yön bilgileri denetlece aktarılacaktır. Fakat, nesneye dokunma öncesi son hareketler artık düşük hızda ince ve duyarlı hareketler biçimine dönüşecektir. Bu aşamada optik görüntüler başka duyaç türü bilgilerle desteklenerek nesnenin tanınması, konumu ve yönü hakkında daha kesin bilgilerinin oluşturulması gerekmektedir. Algılama ne tek bir duyaça, nede aynı türden bilgi sağlayan duyaçlar dizisine dayandırılmamalıdır. Bütün duyaçların sağladıkları bilgide bazen eksiklik, bazen farklı yorumlanabilir nitelikler bulunabilir. O nedenle, edinilen bilginin ne olduğu konusunda net bir sonuca, ve yargıya varılamayabilir.[28] Örneğin, bulanık su içinde bulunan parçalar görüntülenip tanındıktan sonra üzerinde işlem görmeye yönelik bir çalışmada kullanılan ultrasonik duyaç dizisinden elde olunan görüntü bazı durumlarda çok spekülatif bir biçimde olmaktadır.[24] Bu sorunun çözümü için iki yol bulunmaktadır. Birincisi, eksiksiz ve algılanan nesneyi net olarak tanımlayan mükemmel duyaçlar yapmaktır. Bugün teknoloji böyle bir şeye olanak vermemektedir. İkincisi, çeşitli duyaçları tümlleşik olarak etkin biçimde kullanmaktır. Bu makuldür. Böylece duyaçlar tek tek birbirlerinin eksik bıraktıkları tümlleyen bilgileri sağlarlar. Bu tür tümlleşim için olağan olarak kullanılan araç dünya koordinatlarında geliştirilmiş modeldir.

Robot kol denetimi için algılama işleminde üç konu dikkate alınmalıdır. Birincisi, çeşitli geometrilerden toplanan verilerin dünya koordinatlarında geliştirilmiş bir modele nasıl dahil edilebileceğinin belirlenmesidir. İkincisi, tümlleşik algılamanın dinamik bir alanda (çevrede yeralan nesnelere durağan olmadığı bir ortamda) nasıl bir denetime olanak vereceğinin belirlenmesidir. Üçüncüsü, farklı algılama biçimleri yanında nesnelere sınıflandırılması için nasıl zekaya dayalı bir denetim kullanılacağına belirlenmesidir.



Şekil 4 Planlamadan eyleme geçiş sürecinde robot kolun temel birimleri arasındaki bilgi akışı

5. Deneysel Araştırma Çalışmaları

Raporun 2.-4. Bölümlerinde verilen kuramsal yöntemler çerçevesinde araştırma hedeflerine uygunluk göstermesi açısından opak bir sıvı ortam içine gömülmüş olarak bulunan nesnelerin görüntüsünün elde olunması, ve nesnelerin tanınması olarak öngörülmüştür. Opak sıvı ortam özellikle seçilmiştir. Böylelikle kamera kullanmak gibi açık bir çözümden kaçınılmak istenmiştir. Bu durumda görüntünün ultrasonik duyaçlarla alınması gereği doğmuştur. Ancak, sıvı içinde kullanılabilir ultrasonik duyaç temin edilemediğinden çalışma ortam olarak havada gerçekleştirilmiştir. Hava ortamı sıvı ortama göre daha elverişsizdir. Zira ses dalgalarının havada yayılırken uğradığı genlik kaybı sıvı ortamda olandan daha azdır. Çalışma sonuçları o nedenle ölçüm uzaklık sınırı açısından sıvı ortamdakinden daha kısadır. Bunun dışında her ne kadar projenin birincil çıkış noktası olan opak sıvı ortamda görüntü alma hedefinden ayrı düşülmüşse de çalışmada kullanılan teknikler açısından iki ortamın çok farklı koşullar yaratması beklenmemektedir. Kaldı ki, çalışmanın sonuçlarının hedeflediği uygulama alanlarından diğerleri de yoğun duman altında bulunan nesnelerin tanınması, yada üzerinde işlem görülen nesne üzerine düşen ışık şiddetinin çok sık aralıklarla değişken olduğu uygulamalar (kaynak yapılan parçaların

bulunduğu ortam) göz önüne alındığında hava ortamında yürütülen çalışmalarında projenin öngördüğü ortamın dışında bir ortamda olmadığı açıktır.

Çalışmada görüntü bir yada birden çok duyaçın (çalışmada 8 adet duyaçtan oluşan bir dizi kullanılmıştır) tarama yoluyla taşıdığı bilgiyle oluşturulmaktadır Yani birden çok duyaçın taşıdığı bilgideki belirsizlikler, ve uğradıkları farklı gürültü etkilerinin bilgi birleştirimi yoluyla en aza indirgenmesi sorunuyla uğraşmıştır. Halbuki kamera kullanılabilseydi bu tür sorun başka bir boyutta ve nitelikte ortaya çıkacaktı.

Burada kavramsal olarak Bölüm 4'de verilen tümleşik algılama yöntemi önceden tanımlı bir ortamda kendinden devinimli bir hareketli robotun dünya koordinatlarında yerinin belirlenmesi ve ilişkin modelindeki bilgilerin gerçek zamanda yenilenmesinde başarıyla kullanılmıştır.[28] Yörünge boyunca denetim çok sayıda ultrasonik duyaçları kullanan tümleşik algılama sistemi destekli olarak sürdürülmüştür. Görüntü elde edilmesindeki çözünürlük örnekleme yoğunluğuna doğrudan bağlı olduğundan nesne tanımada kesinlik daha çok örnekleme ve bilgisayar zamanını gerektirdiğinden yörünge boyunca hızın artırılması bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır.[24] Daha etkin yazılımlar geliştirilerek, daha hızlı analog/sayısal dönüştürücüler ve bilgisayar kullanmak olanaklı olduğundan endüstriyel uygulama açısından sonuçlar ümit vericidir.

5.1 Nesneye Yönelik Robot Kol Benzeşim Yazılım Paketi

Bölüm 4'de anlatılan tümleşik algılama sisteminin donanım ve yazılımlarını oluşturan ana maddelerden dördüncüsü dünya koordinatlarında geliştirilmiş robot kolun nesneye yönelik bir tanımlama biçiminde hem durağan hem de dinamik model olarak geliştirilmiştir. [27] Geliştirilen benzeşim yazılım paketi kolay kullanımı yanında robot kinematiği, dinamiği, ve denetim uygulamaları için uygulamaya olayları derinlemesine kavrama olanağı da vermektedir. Modeller çözülmüş eylem hız denetimi, ve melez kuvvet/konum denetimi uygulamaları için sınanmış, geçerlilikleri saptanmıştır. Bu paketin bir benzeri, çalışmamızla hemen aynı zamanlarda bir başka grup tarafından da gerçekleştirilmiş bulunmaktadır. [33] Bu paketin yaptığımızdan üstün yanları iki boyutlu gösterimde de olsa daha iyi ve kullanıcıya kolaylık sağlayan bir biçimde olmasıdır. Eksik yanı ise, bizimkinin ters kinematik çözümlere olanak vermesine karşın onun böyle bir olanağa sahip olmamasıdır. Diğer tüm yetenekler ise her iki pakette de aynıdır. Her ikisinde benzer robot benzeşim uygulamaları için geliştirilmiş bilgisayar destekli tasarım program paketlerinden daha küçük boyutlu oluşu (böylelikle kişisel bilgisayar ortamında kullanılabilen), kullanıcı için daha kolay kullanılabilir oluşu ve fiyatlarının (bizim durumumuzda maliyet) düşük oluşu gibi üstünlüklere sahiptir.

5.2 Tümleşik Algılama ve Görüntü Oluşturma

Sistemde dizideki her duyaç görüntü alanı içindeki nesnelerin bulunduğu bölgeyi ızgara biçiminde küçük bölgeciklere ayrılmış olarak taramaktadır. Ana denetleyici olarak çalışan kişisel bilgisayar ilk olarak robot kolu çalışma alanının belirli bir noktasına

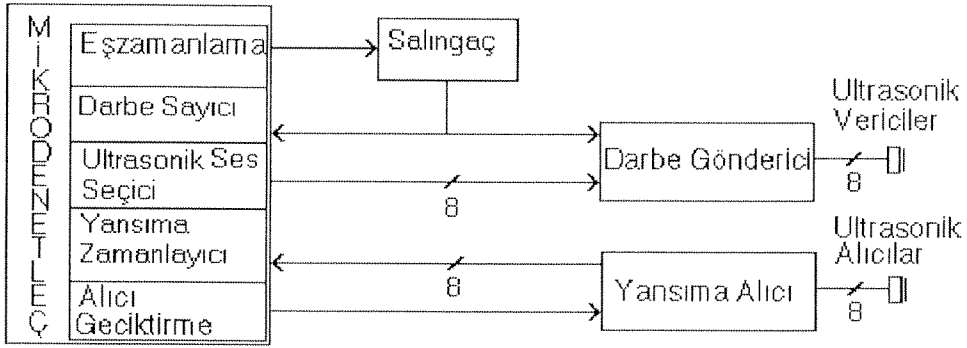
göndermekte daha sonra mikro-denetleyiciyi örnek alması için uyarmaktadır. Mikro-denetleyici ultrasonik vericileri süren elektronik devreleri harekete geçirmekte ve elektronik devreler gelen yansıma sinyalini işleyerek mikro-denetleyiciye aktarmaktadır, yansıma sinyalini alan mikro-denetleyici yansıma anını kaydederek ana bilgisayara aktarmaktadır. Böylelikle her bölgede bir duyaç tarafından bir ölçüm yapılmaktadır. Ölçüm yüzeyden aşağıya doğru gönderilen ultrasonik ses darbe paketinin yansımasından hesaplanan bir uzaklık bilgisidir. Böylelikle yüzeyin biçimine ilişkin tüm bilgi edinilmekle birlikte, nesne tanıma işleminde derinlik bilgisi kullanılmamaktadır. Bunun yerine nesnenin düzlemsel görüntüsü kullanılmaktadır.

Bölgenin ızgara deliklerine ayrıştırılmasında, seçilen hücre sayısının büyüklüğü görüntünün çözünürlüğündeki kesinliği belirlenmektedir. Modeldeki görüntülerin büyüklüğüne bağlı olarak en küçük boyutlu nesne için yeterli çözünürlüğün elde olunacağı biçimde hücre sayısı artırılmaktadır. Hücre sayısının çok büyük tutulması işlemin daha uzun zaman almasına yol açacağından, ve bir noktadan sonra artan hücre sayısının çözünürlüğe fazladan bir katkısı olmayacağından, çoğu zaman sayı ancak gereken kadar büyük tutulmaktadır.

Her bölgeye ultrasonik ses darbe paketinin yollanması dizide yer alan sekiz çift (verici ve alıcı) ultrasonik duyacı (robot kolun ucuna monte edilmiştir) bir mikro-denetleyici ile ardışık olarak etkinleştirilmesi ile yapılmaktadır. Her paket yollandıktan ve yansıması geri alındıktan sonra, bir sonraki duyaç çiftindeki verici ve alıcı gerekli zaman aralıklarıyla etkinleştirilmektedir. Duyaçlar 40 kHz'de çalışmaktadır. Bu işlemleri gerçekleştiren elektronik devreler eurocard biçiminde tasarlanmıştır. Elektronik devreler salıngaç katı, ve ultrasonik vericileri süren devreler(sürücü devresi), ultrasonik alıcılardan gelen yansıma sinyallerini işleyen devrelerden (alıcı devreleri) oluşmaktadır. Alıcı devrelerin öbek çizimi Şekil 5 'te verilmektedir.

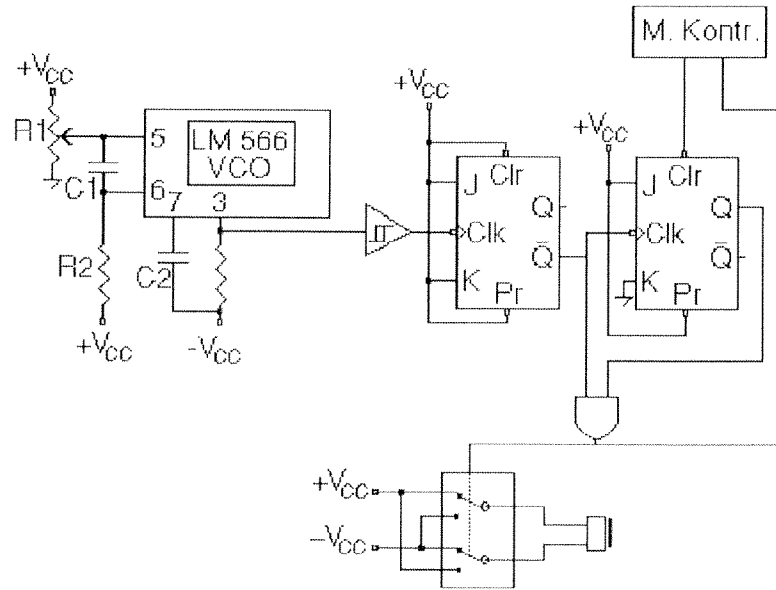
Osilatör 40 kHz'te sürekli kare-dalga sinyal üretir. Bu sinyal kontrol kartına (mikro-denetleyici) ve sürücü devresine aktarılır. Kontrol kartı gönderilen ultrasonik ses darbe paketinde bulunacak dalga sayısını belirler ve sürücü devreleri anahtarlar. Sürücü devreler tümleşik-devre analog anahtarları kullanır ve ultrasonik vericilerin bacalarına uygulanan potansiyelin yönünü salıngaç frekansında ve kontrol kartının belirlediği sayıda değiştirerek ultrasonik darbenin üretilmesini sağlar. Sürücü devre Şekil 6'da gösterilmektedir.

Duyaçlardan gelen işaretler bir işaret koşullandırma işleminden geçmektedir. Alıcı devresi ön fark yükseltici, 40 kHz'de dar-bant geçiren filtre, yükseltici, Schmitt-tetikleyici ve dört bit'lik sayıcıdan oluşur. Dar-bant geçiren filtre fark-yükselticiden gelen

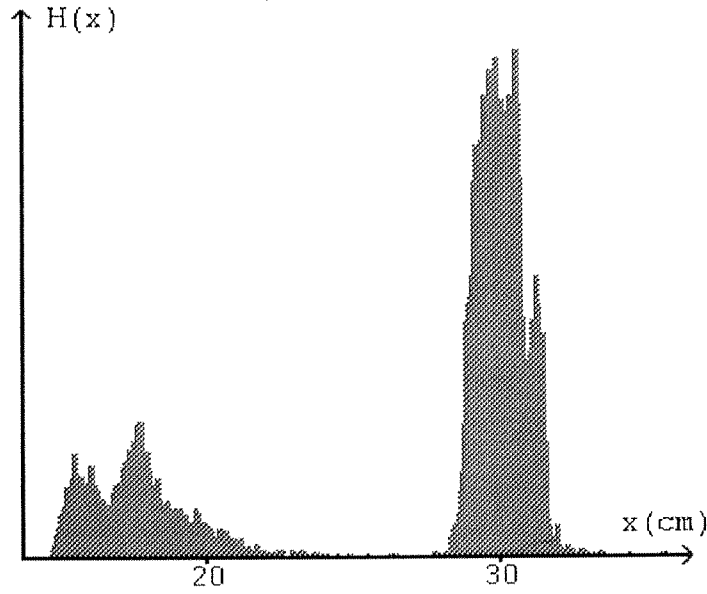


Şekil 5 Görüntü alıcı devrelerin öbek çizimi

yansıma sinyalinde bulunan 40 kHz dışındaki gürültü sinyallerinin süzülmesini sağlar. Filtreden geçen sinyaller yükseltici ile Schmitt-tetikleyicinin eşik seviyesinin üzerine çıkartılır. Schmitt-tetikleyici sinüs dalgalarından oluşan darbe katarını kare-dalgaya dönüştürür ve bu sinyal dört bit'lik sayıcıya sayma sinyali olarak girilir. Sayıcının 1,2,3 veya 4 numaralı bit'lerinden biri kontrol kartına yansıma alındı sinyalini gönderir. Böylece yansıma alındı sinyali, gelen ses darbe paketi içindeki dalga sayısı 2,4,8 veya 16 değerine ulaştığı anda gönderilerek gelen yansıma darbesinin belirli bir uzunlukta olması sağlanır. Alıcı devre Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 6 Sürücü devre şeması

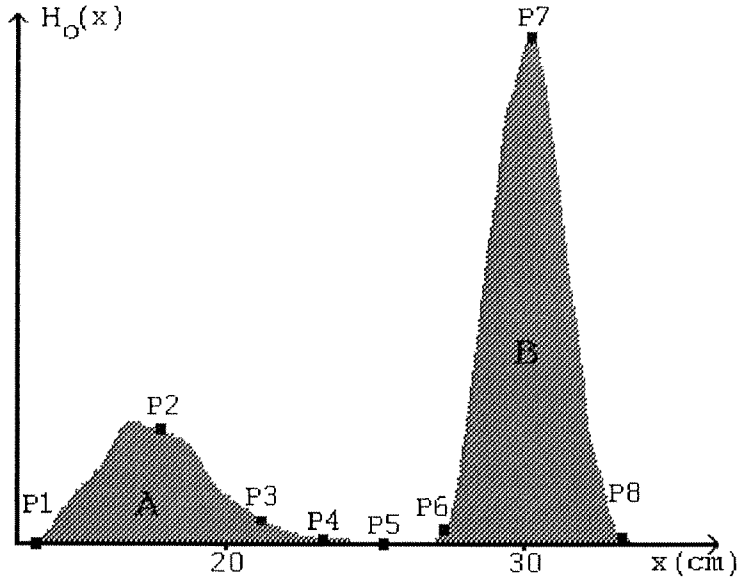


Şekil 8 Görüntünün ham histogramı

Histogram da görülen en yoğun bölge, ölçüm noktasına en uzak olan, zeminden gelen yansımalarla oluşan 'B' bölgesidir. "A" bölgesi daha yakın olan ve nesneden gerçekleşen yansımalarla oluşmuştur. Eşik değeri için en uygun yer 'A' ve 'B' bölgeri arasında yer alan ve hemen hiç bir yansımanın gerçekleşmediği boş aralıktır. $H_o[x]$ eğrisinin belirgin noktaları eğrilerin tepe noktaları ve yatay eksene yakın olan köşe noktalarıdır. Bu noktalar (P1,P2,P3,P4,P6,P7,P8) baskın nokta tespiti yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir. Bu noktalardan ilk olarak en uzaktaki tepe noktası 'P7' bulunur. Bu nokta kullanılarak daha yakında olan 'B' bölgesinin başlangıç noktasının P6x (x koordinatı) ve 'A' bölgesinin bitiş noktası P4x bulunur. Eşik değeri zemin ve nesneyi birbirinden ayıran ve P4x, P6x noktalarının ortasında bulunan P5x noktası olarak bulunur. Eşikleme işlemi, eşik değeri olan P5x noktasının altında kalan noktalara '1', üstünde kalan noktalara '0' değeri atanarak yapılır. Eşiklenmiş görüntü Şekil 10' da gösterilmektedir.

5.3.2 Büzülme ve Genleşme İşlemleri

İki seviyeli görüntüde çeşitli sebeplerle zemin ve nesne üzerinde gürültüler bulunmaktadır. Bölgesel teknikler kullanılarak görüntü üzerinde yer alan her görüntü hücresi tekrar tekrar işlenir, ve her seferinde görüntü hücresine 8' li komşularının değerine yakın bir değer atanarak nesneye ait kenarların düzgünleştirilmesi, ve zemin ve nesne üzerinde bulunan gürültülerin giderilmesi sağlanır.



Şekil 9 Görüntünün iyileştirilmiş histogramı



Şekil 10 Eşiklenmiş görüntü

Bunun için büzülme ve genişleme işlemlerinde kullanılan ve Eşit. 2'de verilen görüntü hücresi fonksiyonu $p(k,j)$ tanımlansın ;

$$p(k,j) = \left[\sum_{u=-1}^1 \sum_{v=-1}^1 I(k+u, j+v) \right] - I(k,j) \quad (2)$$

Görüldüğü gibi $p(k,j)$, $I(k,j)$ resim hücresinin etrafındaki resim hücrelerinin (8' li komşularının) sayısını vermektedir.

Büzülme: Büzülme işlemcisi nesnelere ait değeri '1' olan görüntü hücreleri üzerinde işlem yapar ve nesne kenarlarını düzgünleştirirken zemin üzerinde bulunan '1' değerli, nesnelere ilgisi olmayan küçük gürültüleri temizler. $U(\cdot)$ birim adım fonksiyonu olsun. $I(k,j)$ resim hücresi üzerindeki i ' ninci dereceden büzülme işlemi, $\text{Büzülme}(i)$, Eşit. 3'deki gibi tanımlanır :

$$\text{Büzülme}(i)I(k,j) = I(k,j) \otimes U(i-1 - \lceil 8-p(k,j) \rceil) \quad (3)$$

Böylece $I(k,j)$ görüntü hücresine i ' ninci büzülme işlemi uygulandığında eğer hücre nesneye ait ve etrafındaki sekizli komşularından i tanesi veya daha fazlası zemine ait ise işlem $I(k,j)$ resim hücresine '0' değeri atayarak zemine dahil eder. Bu işlem nesneye ait hücrelerin her birinin etrafında en fazla ' $i-1$ ' adet zemine ait hücre kalıncaya kadar bütün görüntüye tekrar tekrar uygulanır. Her seferinde görüntüdeki nesneye ait hücre sayısı bir öncekinden az olacaktır (yani nesnelere büzülecektir). Anlatılan işlemler $i=5$ değeri için yukarıdaki eşiklenmiş görüntüye uygulandığında Şekil 11'deki görüntü elde edilir.

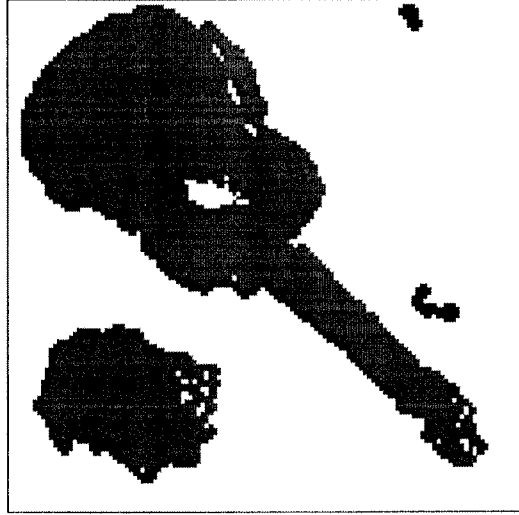
Genleşme: Genleşme işlemcisi zemine ait değeri '0' olan görüntü hücreleri üzerinde işlem yapar ve nesne kenarlarını düzgünleştirirken nesne üzerinde bulunan '0' değerli küçük zemin bölgelerini nesneye dahil eder. $I(k,j)$ resim hücresi üzerindeki i ' inci dereceden genleşme işlemi, $\text{Genleşme}(i)$, Eşit. 4'deki gibi tanımlanır :

$$\text{Genleşme}(i)I(k,j) = I(k,j) \oplus U(p(k,j) - i) \quad (4)$$

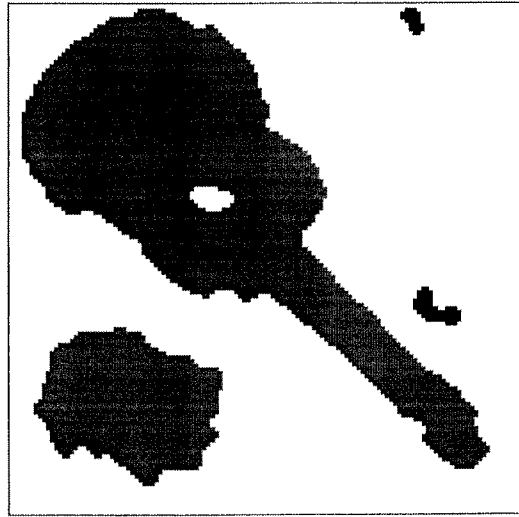
Böylece $I(k,j)$ görüntü hücresine i 'inci genleşme işlemi uygulandığında eğer hücre zemine ait ve etrafındaki sekizli komşularından i tanesi veya daha fazlası nesneye ait ise işlem $I(k,j)$ resim hücresine '1' değeri atayarak nesneye dahil eder. Bu işlem zemine ait hücrelerin her birinin etrafında en fazla ' $i-1$ ' adet nesneye ait hücre kalıncaya kadar bütün görüntüye tekrar tekrar uygulanır ve her seferinde görüntüdeki nesneye ait hücre sayısı bir öncekinden fazla olacaktır (genleşme). Anlatılan işlemler $i=5$ değeri için yukarıdaki genleşme işleminden geçirilen görüntüye uygulandığında Şekil 12'deki görüntü elde edilir.

5.3.3 Bölge İşaretleme, Bölge Genişletme:

Büzülme ve genleşme işlemlerinden sonra hala bu işlemlerin temizleyemedikleri nesne üzerinde zemine ait boşluklar ve zemin üzerinde nesne olmayan küçük adacıklar bulunabilir. Bu bölgeler bölge işaretleme ve bölge genişletme algoritmaları kullanılarak belirlenip temizlenmektedir. Buna göre $M \times N$ görüntünün boyutları olsun, ve " zn " ise '0' veya '1' değeri alarak işaretlenecek bölgenin zemine mi, nesneye mi ait olduğunu belirlesin. Eğer $A(i)$ i bölgesindeki hücre sayısını tutan diziyi gösteriyorsa;



Şekil 11 Büzülme işleminden geçmiş görüntü



Şekil 12 Genleşme işleminden geçirilmiş görüntü

Bölge işaretleme algoritması

- 1) $k=1, j=1, i=1$.
- 2) Eğer $I(k,j)=zn$ ise
 - a) $i=i+1$.
 - b) (k,j) hücrelerini başlangıç olarak ve bölge genişletme algoritmasını kullanarak i bölgesini genişlet.
- 3) $k=k+1$. Eğer $k \leq m$ ise 2 numaralı işleme git.
- 4) $k=1, j=j+1$. Eğer $j \leq n$ ise 2 numaralı işleme git.

Bölge genişletme algoritması

- 1) $I(k,j)=i$, $A(i)=1$, $push(k,j)$, $push(0,0)$.
- 2) Eğer $j < n$ ve $I(k,j+1)=zn$ ise
 - a) $I(k,j+1)=i$, $A(i)=A(i)+1$.
 - b) $push(k,j+1)$.
- 3) Eğer $k > 1$ ve $I(k-1,j)=zn$ ise
 - a) $I(k-1,j)=i$, $A(i)=A(i)+1$.
 - b) $push(k-1,j)$.
- 4) Eğer $j > 1$ ve $I(k,j-1)=zn$ ise
 - a) $I(k,j-1)=i$, $A(i)=A(i)+1$.
 - b) $push(k,j-1)$.
- 5) Eğer $k < m$ ve $I(k+1,j)=zn$ ise
 - a) $I(k+1,j)=i$, $A(i)=A(i)+1$.
 - b) $push(k+1,j)$.
- 6) $Pop(k,j)$. eğer $(k,j) \neq (0,0)$ ise 2 numaralı işleme git.
- 7) $Pop(k,j)$. İşlemi bitir.

Bölge işaretleme işlemi tamamlandıktan sonra, her bölgede bulunan hücre sayısı belli bir eşik seviyesinin altındaysa bölge, bulunduğu yere bağlı olarak nesne üzerinde ise, zemine, yok değil zemin üzerinde ise nesneye dahil edilmektedir. Anlatılan işlem büzülme ve genişleme işlemlerinden geçirilmiş görüntüye uygulandığında Şekil 13' de görülen görüntü elde edilir.

5.3.4 Kenar Bulma:

Bölge işaretleme ve bölge genişletme işlemlerinden sonra görüntüdeki nesnelere kapladıkları alanda tümüyle siyaha boyanmış ve gürültülerden temizlenmiş olarak belirlenmiş olur. Yapılacak son işlem de nesnelere kenarlarını ortaya çıkarmaktır. Bunun için görüntüye ilk olarak aşağıda verilen kenar bulma algoritması uygulanır :

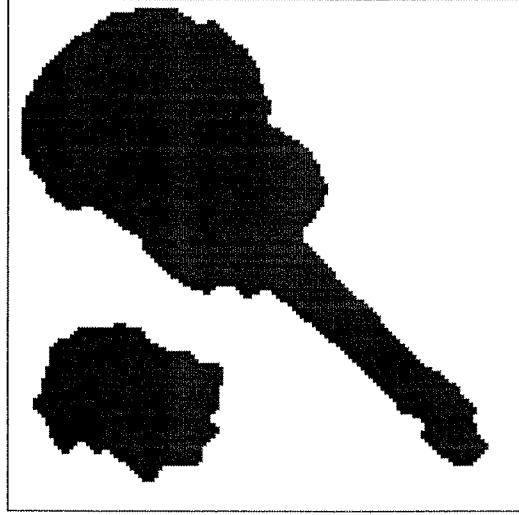
Kenar Bulma Algoritması

$I'(k,j)$ görüntüsü $I(k,j)$ görüntüsünden elde edilen, ve nesnelere kenarlarının bulunduğu görüntüdür. $p(k,j)$ büzülme ve genişleme işlemlerinde verilen görüntü hücresi fonksiyonudur.

- 1) $k=1, j=1$
- 2) $I'(k,j)=I(k,j)$
- 3) $k=k+1$. Eğer $k \leq m$ ise 2 numaralı işleme git.
- 4) $k=1, j=j+1$. Eğer $j \leq n$ ise 2 numaralı işleme git.
- 5) $k=1, j=1$.
- 6) Eğer $I(k,j)=1$ ve $p(k,j)=8$ ise $I'(k,j)=0$.

7) $k=k+1$. Eğer $k \leq m$ ise 6 numaralı işleme git.

8) $k=1, j=j+1$. Eğer $j \leq n$ ise 6 numaralı işleme git.

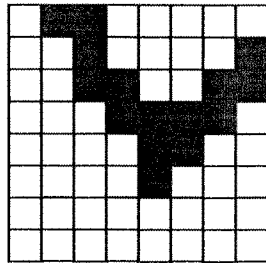


Şekil 13 Bölge işaretleme ve bölge genişletme işlemi sonrası görüntü

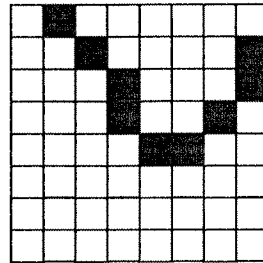
Kenar bulma algoritmasının ortaya çıkardığı kenarların kalınlığı Şekil 13.a' da görüldüğü gibi bir resim hücresinden fazladır. Bu ise kenar bilgisinin doğru olarak kodlanmasını engeller. Bu nedenle görüntüye inceltme algoritması uygulanarak kenar bilgisinin Şekil 13.b' de görüldüğü gibi bir resim hücresi kalınlığında olması sağlanır. Bu işlemlerin uygulanmasından sonra elde edilen görüntü Şekil 14'de görülmektedir.

5.4 Model Oluşturma^[1]

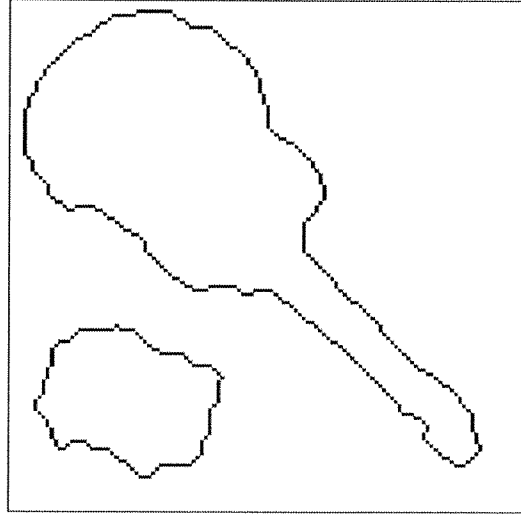
Opak sıvı ortama konulan bir nesnenin ultrasonik duyaç düzeneği ile önceden bir görüntüsü alınarak etiketlenerek bilgisayarda belleğe alınmaktadır. Model nesnenin en dış kenar çizgisine, ağırlık merkezine, birinci ve ikinci momentlerine ilişkin bilgilerden oluşmaktadır. Model nesneye ilişkin yüzey bilgisini taşımamaktadır, ve o nedenle ikili



Şekil 13.a



Şekil 13.b



Şekil 14 Kenar bulma işleminden sonra elde edilen görüntü

düzyen renk bilgisi yeterli olmaktadır. Model bu yapıyla en az bellek gereksinimine sahiptir.

5.4.1 Kenar Bilgisinin Kodlanması

Ham görüntü işlenmesinden sonra bulunan son görüntü bir resim hücresi kalınlığındaki nesne kenarlarını içermektedir. Kenar koordinatlarının nesne tanıma ve yerleştirme işlemleri için ardışık olarak kodlanması gerekmektedir. Bu amaçla görüntü taranarak kenar'a ait bir resim hücresi bulunur. Bu hücre başlangıç olarak kullanılır ve zincirleme olarak her hücreden yanındaki hücreye geçilerek tekrar başlangıç hücresine gelinene kadar kenar bilgisi hücrelerin x ve y eksenini doğrultularındaki satır ve sütun indeks değeri ile kodlanır.

5.4.2 Özellik Belirleme

Nesnenin modellenmesinde, tanıma yönelik olarak kenar noktalarının merkezi, momentleri, yerini ve konumunu bulmaya yönelik olarak nesne imzası olarak adlandırılan ve kenar noktalarının ağırlık merkezinden kenar noktalarına olan uzaklıklarıyla oluşturulan $K(i)$ fonksiyonu kullanılır.

Kenar noktalarının momentleri Eşit. 5' te, x_c ve y_c kenar noktalarının ağırlık merkezi Eşit. 6' da, merkezi momentleri Eşit. 7'de verildiği gibi hesaplanır. R kenar noktalarının satır ve sütun indekslerinden oluşan kümedir.

$$m_{kj} = \sum_{(x,y) \in R} x^k y^j \quad (5)$$

$$x_c = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \quad y_c = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (6)$$

$$\mu_{kj} = \sum_{(x,y) \in R} (x - x_c)^k (y - y_c)^j \quad (7)$$

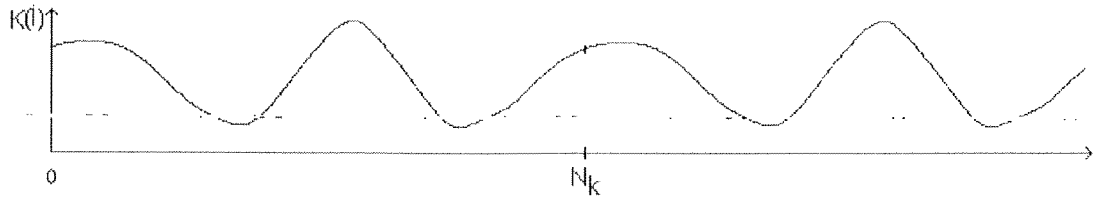
Nesnelerin tanınmasında değeri nesnenin yeri ve konumundan bağımsız olan ve nesnenin ikinci ve üçüncü momentlerinin belli kombinasyonları ile oluşturulan değerler kullanılır. Bu değerlerden kullanılan dördü M_1 , M_2 , M_3 ve M_4 Eşit. 8' de verilmiştir.

$$\begin{aligned} M_1 &= \mu_{20} + \mu_{02} \\ M_2 &= (\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2 \\ M_3 &= (\mu_{30} - 3\mu_{12})^2 + (3\mu_{21} - \mu_{03})^2 \\ M_4 &= (\mu_{30} + \mu_{12})^2 + (\mu_{21} + \mu_{03})^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Nesnelerin yer ve konumlarını belirlemede kullanılan, kenar noktalarının ağırlık merkezinden kenar noktalarına olan uzaklıklarıyla oluşturulan $K(i)$ fonksiyonu Eşit. 9' da verildiği şekilde bulunur. Bu fonksiyon doğal olarak periyodiktir, ve N_k periyodu ile kendisini tekrarlar.

$$K(i) = \sqrt{(x(i) - x_c)^2 + (y(i) - y_c)^2}, \quad 0 \leq i \leq N_k \quad (9)$$

Şekil 14'teki görüntüde bulunan gitar'a ait kenar fonksiyonu Şekil 15' te görülmektedir.



Şekil 15 Gitar'a ait kenar fonksiyonu

5.4.3 Modelleme

Modelleme, sisteme yeni bir nesnenin tanıtılması işlemidir. Nesnenin tanınmasını sağlamak için nesnenin yeri ve konumundan bağımsız yukarıda anlatılan ayırtedici değerler olan M_1 , M_2 , M_3 ve M_4 merkezi moment kombinasyonları, nesnenin yeri ve

konumunun saptanabilmesi amacıyla ileride tanımlanacak olan ağırlık merkezi x_c , y_c ve kenar fonksiyonu $K(i)$ model kütüphanesine yeni bir nesne olarak kaydedilmektedir.

Modelleme aynı zamanda sistemin öğrenmesinin temelidir. Algılanan nesne eğer bellekteki modellerden hiçbiri ile bağdaşmıyorsa bu durumda sistem operatörden bunun yeni bir nesne olduğunu ve adlandırılmasını istemektedir. Aynı bir çocuğun her yeni gördüğü şeyin kendisine tanımlanmasını istemesi gibi.

5.4.4 Tanıma ve Yerleştirme

Sisteme yeni girilen bir görüntü ilk olarak yukarıda anlatılan yöntemlerle işlenerek görüntüde bulunan nesnenin özelliklerinin bulunmasına uygun hale getirilir. Daha sonra görüntüde yer alan nesnenin kenar bilgisinden o nesneye ait ağırlık merkezi, merkezi moment kombinasyonları ve kenar fonksiyonu tespit edilir.

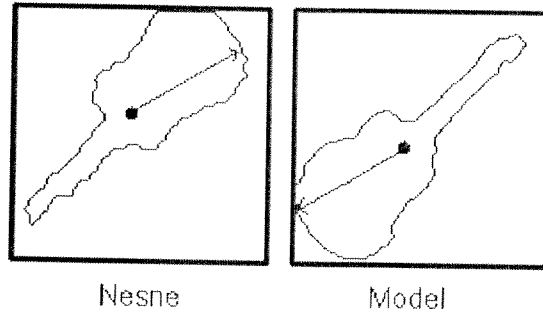
Tanım: Tanımda nesneye ait dört moment kombinasyonu, model kütüphanesinde bulunan modellerin herbirinin moment kombinasyonları ile karşılaştırılır. Nesne dört boyutlu uzayda Euclid uzaklığı kendisine en yakın olan model olarak bulunur. $M_{i,j}$ model i ' ye ait moment değerleri M_j tanınması istenen nesneye ait moment değerleri, D_i nesnenin model i 'ye olan Euclid uzaklığı, t nesnenin eşleştiği model'i, h model kütüphanesindeki model sayısı olsun. Bu durumda nesneye ait model Eşit. 10'da gösterildiği gibi bulunur.

$$D_i = \sqrt{(M_{i,1} - M_1)^2 + (M_{i,2} - M_2)^2 + (M_{i,3} - M_3)^2 + (M_{i,4} - M_4)^2}$$

$$t = j \quad , \quad D_j = \min(D_i)$$

$$\leq i \leq h \quad (10)$$

Anlatılan yöntemle tanınan bir gitar görüntüsü Şekil 16'da görülmektedir.



Şekil 16 Nesne ve modelin yerleşimi

Yerleştirme: Yerleştirme için tanınan nesnenin ve modelinin kenar fonksiyonları ve ağırlık merkezleri kullanılır. Ancak, bu ağırlık merkezi nesnenin düzlemsel görüntüsünün alana bağlı ağırlık merkezi değildir. Nesnenin sınır çizgisi biçimindeki görüntüsünün sınır çizgisi boyunca toplanan uzunluğa bağlı ağırlık merkezidir. Örneğin, nesne olarak gitarın görüntüsü bir karton parçası kesilerek de elde etmek mümkündür, ince ve yeterince yumuşak bir tele biçim verilerek de elde etmek mümkündür. Her iki biçim için ağırlık merkezleri farklı olacaktır. Burada ikinci biçimin ağırlık merkezi tanım olarak kullanılmaktadır. Yerleştirme işlemi için ilk olarak model koordinat sisteminden nesne koordinat sistemine tanımlı olan dönüşüm matrisi T_{mn} Eşit. 11'de verildiği şekilde bulunur. Burada (x_{cm}, y_{cm}) modelin ağırlık merkezi, (x_{cn}, y_{cn}) nesnenin ağırlık merkezi, Θ model ve nesne koordinatları arasındaki açı, \ddot{O} öteleme(kaydırma)-dönüşüm matrisi, ve D dönme-dönüşüm matrisidir.

$$T_{mn} = \ddot{O}(-x_{cm}, -y_{cm})D(z, \Theta)\ddot{O}(x_{cn}, y_{cn}) \quad (11)$$

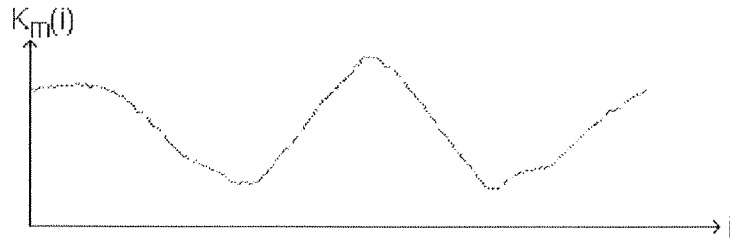
Model ve nesne koordinatları arasındaki açının bulunabilmesi amacıyla ilk olarak model ve nesne kenarlarının bir periyoda karşı gelen uzunlukları eşitlenmekte, ve sonra üzerlerindeki noktalar birebir eşlenmektedir. Bunun için nesneye ait kenar fonksiyonu yatay-eksen boyunca kaydırılmakta, ve her kaydırma noktasında iki fonksiyon arasındaki fark bulunarak bir hata fonksiyonu oluşturulmaktadır. Hata fonksiyonunun en düşük değere sahip olduğu nokta iki kenar fonksiyonunun birebir eşlendiği nokta olarak bulunur. Şekil 16'da verilen nesne ve model'e ait fonksiyonlar Şekil 17'de görülmektedir. Bu işlem K_m model kenar fonksiyonu, K_n nesne kenar fonksiyonu, H hata fonksiyonu, k birebir eşleşme için gerekli kaydırma miktarı olarak alındığında Eşit. 12'de verildiği şekilde olur.

$$H(j) = \sum_i |K_m(i) - K_n(i+j)| \quad (12)$$

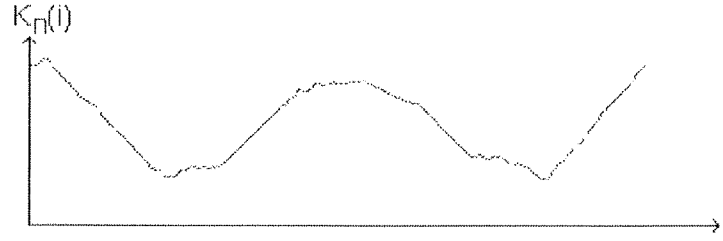
$$k = j, \quad H(j) = \min(H(i), 0 \leq i \leq N_k)$$

Model ve nesne'ye ait kenarlar birebir eşlendikten sonra nesne ve model arasındaki açı Eşit. 13'de verildiği şekilde tüm kenar noktalarının açı değerlerinin ortalaması alınarak bulunur. $\Theta_m(i)$ ve $\Theta_n(i)$ fonksiyonları model ve nesneye ait ağırlık merkezlerinden i 'inci kenar noktalarına çizilen doğrunun yatay eksenle yaptığı açı değerlerinden oluşur.

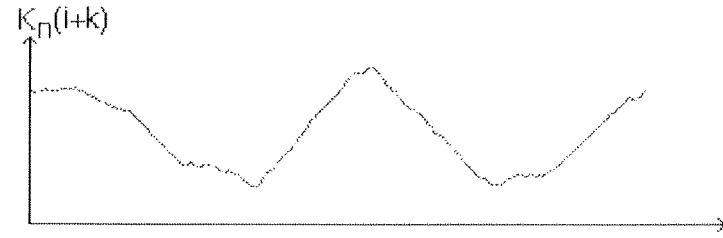
$$\Theta = \frac{1}{N_k} \sum_i (\Theta_n(i+k) - \Theta_m(i)) \quad (13)$$



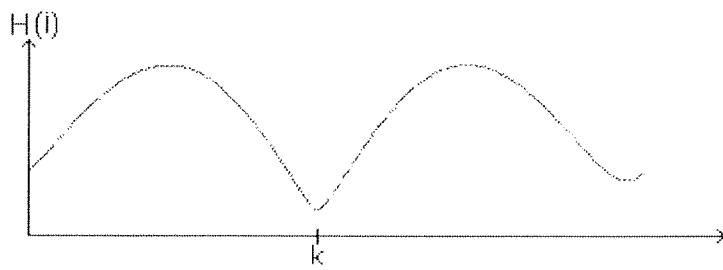
(a)



(b)



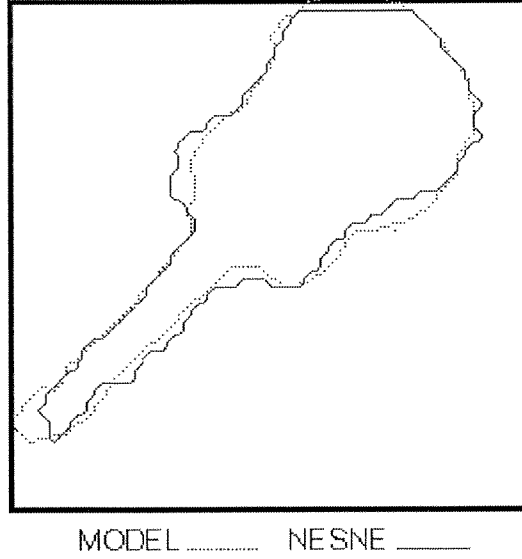
(c)



(d)

Şekil 17 a) Modele ait kenar fonksiyonu b) Nesneye ait kenar fonksiyonu c) K birim kaydırılarak model ile eşleşen kenar fonksiyonu d) I birim kaydırılan nesneye ait kenar fonksiyonu ile modele ait kenar fonksiyonun farkından oluşan hata fonksiyonu. $i=k$ için hata minimum.

Yukarıdaki işlemlerden sonra bulunan dönüşüm matrisinin model'e uygulanması ile modelin koordinat eksen sistemi nesnenin koordinat sistemine çakıştırılır. Sonuçta modelin nesneye göre yeri ve yönü belirlenmiş olur. Böylelikle, Şekil 18'de görüldüğü



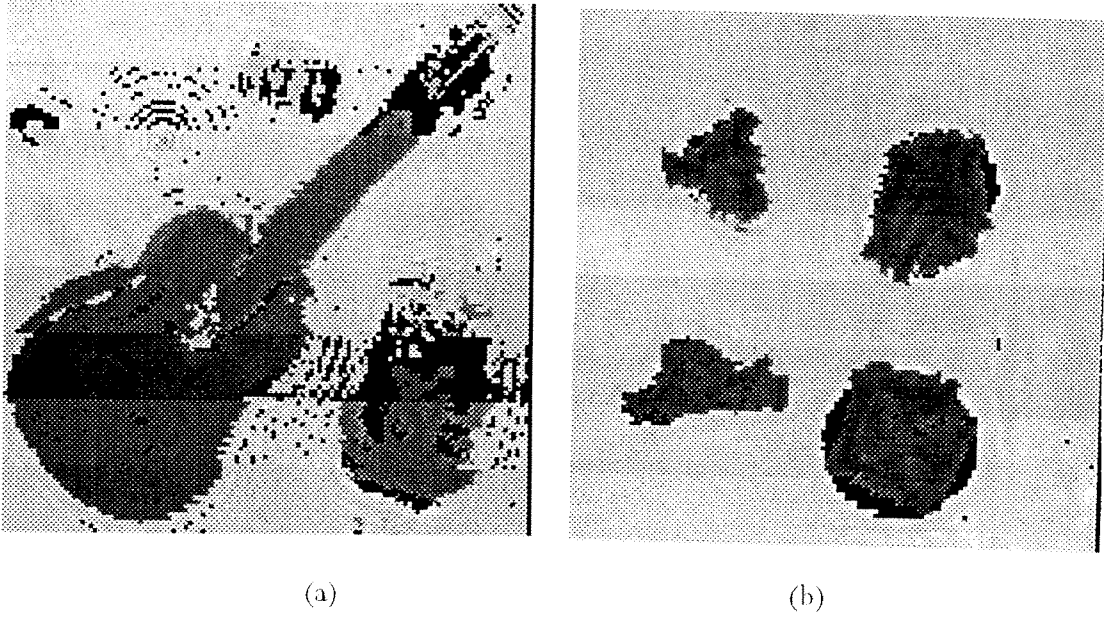
Şekil 18 Elde edilen dönüşüm matrisinin modele uygulanmasıyla nesne üzerine yerleştirilen model.

gibi yerleştirme işlemi tamamlanır. Yerleşimdeki hatanın büyüklüğü nesnenin tanınmasındaki isabetin de bir ölçüsüdür.

Çalışmada bu bölüm işler başlangıçta Hopfield yöntemi olarak bilinen bir yöntemin uygulanmasına yönelmiştir.[19] Ancak, kenar çizgisi boyunca aranan karakteristiklerin (baskın noktalar arası uzaklıklar ve bu noktalar arası doğru parçalarının biribiriyle yaptıkları açılar) kesinlik taşımadığı görülmüş bu yol ile nesne tanımının kesinlik yüzdesi düşük bulunarak yöntem terkedilmiştir. Hopfield yönteminin yeniden ele alınması ve tanımadaki başarı yüzdesinin yükseltilmesi başka bir çalışma konusu yapılacaktır. Ancak, bu projenin zamanlama programını izlemek zorunluluğu nedeniyle yöntem terkedilmiştir.

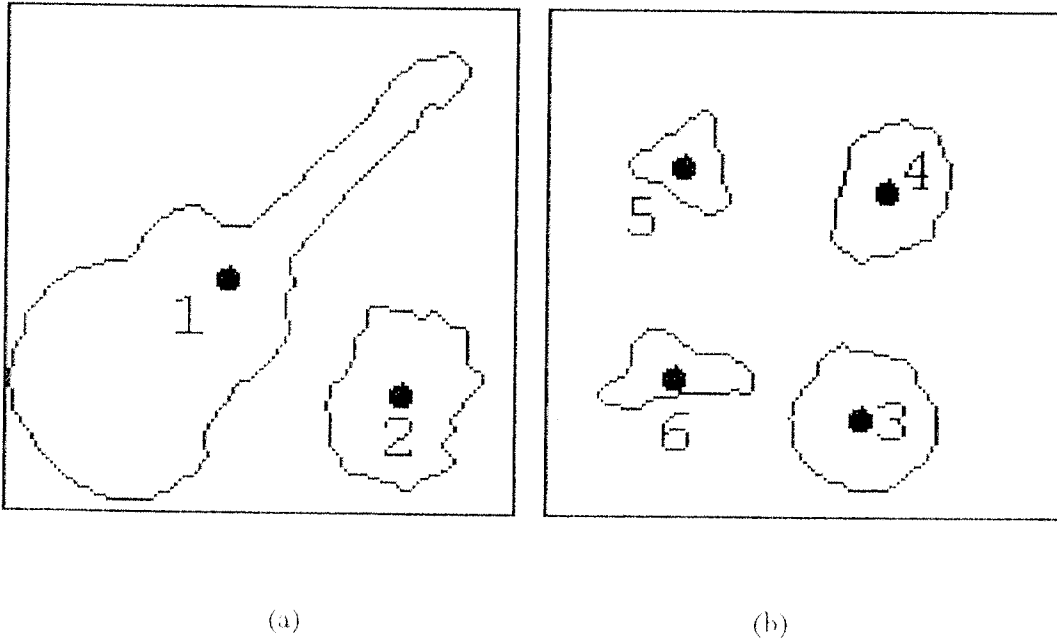
5.4.5 Tanıma Sistemi Üzerindeki Testler ve Sonuçları

Yerleştirme ve tanımda kullanılan yöntemin etkinliğinin sınanması altı ayrı nesnenin modele dayalı tanınmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu nesnelere biri yukarıda anlatılanlarda örnek olarak kullanılan gitardır. Diğerleri küp biçimindeki bir çöp kutusunun tepeden bakıldığındaki görüntüsü, bir eşkenar üçgen, bir geniş-açılı üçgen, bir elips, ve bir dairedir. Geometrik şekillerdeki kartondan yapılmış yüzey parçaları yerden 10 cm yükseklikte yerleştirilmişlerdir. Şekil 19 a ve b'de bu altı nesnenin alınan ultrasonik görüntülerinden (128x128 boyutunda) çıkartılan sınır çizgileriyle belirlenen biçimleri bu nesnelere için model olarak kabul edilmiştir. Bu yolla oluşturulan modeller Şekil 20 a ve b'de görülmektedir. Bu modellerin tanımak üzere kullanıldığı görüntüler ise daha düşük bir çözünürlük düzeyinde (64x64 boyutunda) alınmış (örneğin gitar için Şekil 21 a'daki görüntü), ve görüntüdeki nesnenin tanınan biçimi ve onunun modelle olan çakışık-

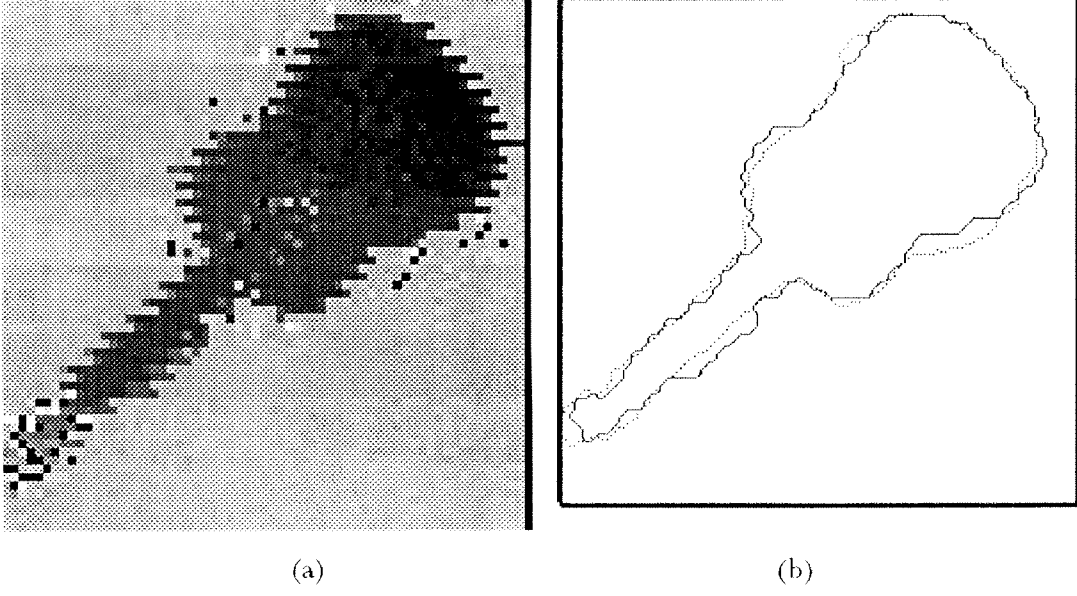


Şekil 19 Modelleri oluşturulan nesnelerin ultrasonik görüntüleri (128x128)

İlgili Şekil 21 b'de görülmektedir. Şekil 21 b'de noktalı biçimde gösterilen nesnenin, bütün çizgiyle gösterilen ise modelin sınır çizgileriyle belirlenmiş biçimleridir. Gerçek nesnelerin daha düşük çözünürlük düzeyinde elde olunan görüntülerinde daha yüksek çözünürlük düzeyinde elde edilmiş modelin görüntüsüne göre bilgi kaybı daha yüksek olduğundan

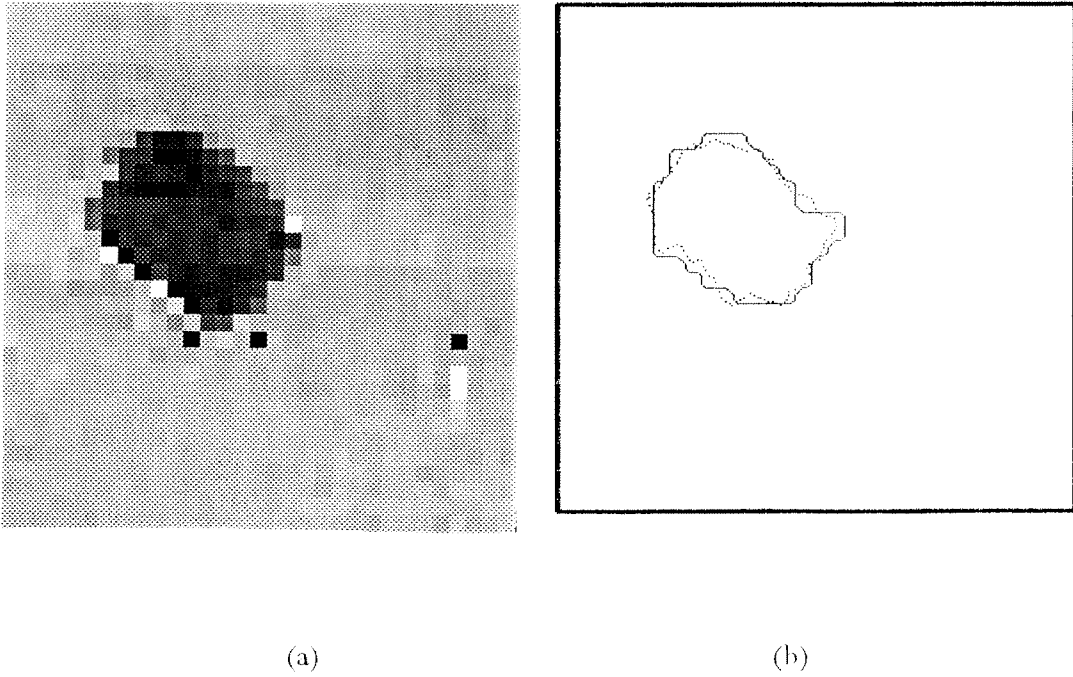


Şekil 20 Kullanılan nesnelerin modelleri

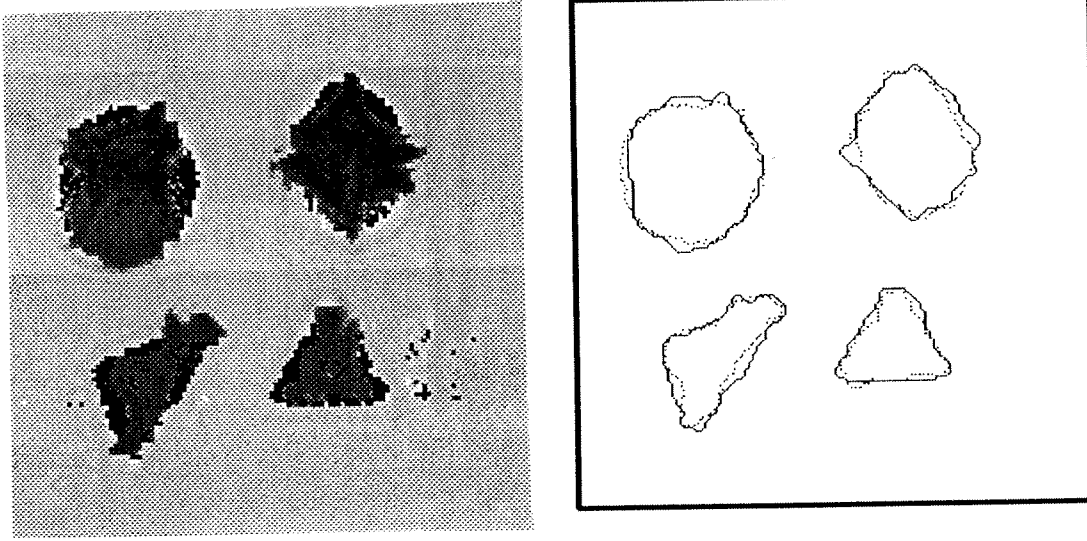


Şekil 21 (a) Nesnenin görüntüsü (64x64), (b) Tanınan nesnenin ve onun modelinin sınır çizgileri, ve konumu (düz çizgi nesnenin gerçek görüntüsüne, diğeri modele aittir.)

tanınanın böylelikle daha güçleştirildiği düşünülmüştür. Buna rağmen sonuç yeterince başarılıdır. Şekil 22 a'da çöp kovasının daha da düşük çözünürlük düzeyinde (32x32 boyutunda) elde olunmuş görüntüsünden tanınması oldukça yüksek bir olasılık değeriyle



Şekil 22 (a) Küp biçiminde bir çöp kovasının görüntüsü (32x32), (b) Nesnenin tanınmış biçimi (düz çizgi olan), ve model



(a)

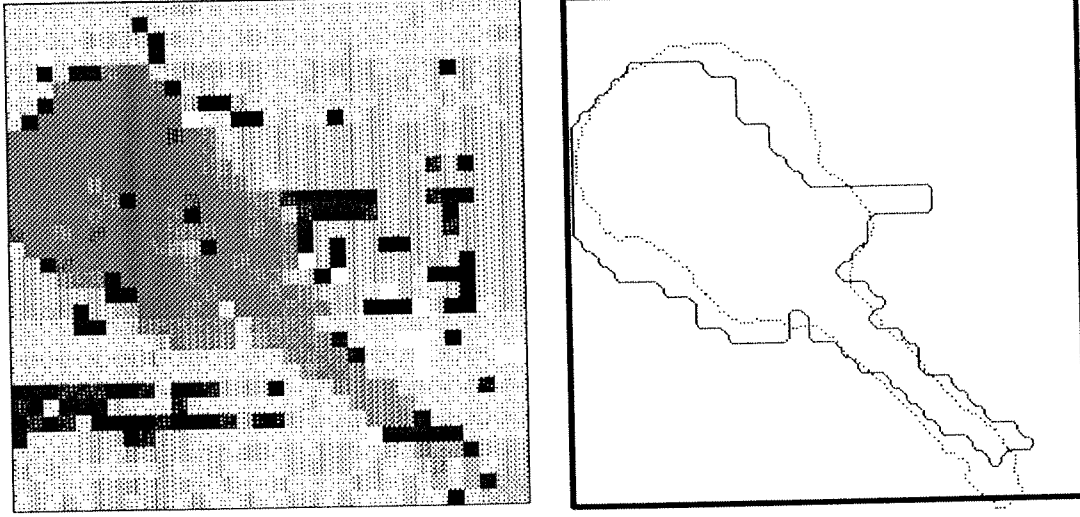
(b)

Şekil 23 (a) Dört ayrı geometrik nesnenin görüntüleri, (b) Nesnelerin tanınmasından sonraki biçimleri (düz çizgi olanlar), ve modeller (128x128)

olanaklı olabilmiş ve sonuç Şekil 22 b'de görülmektedir. Şekil 23 a'da ise bu kez modelin ki ile aynı çözünürlükte (128x128) ultrasonik görüntüleri alınmış dört geometrik nesnenin tanınmasına ve konumlarına ilişkin sonuç Şekil 23 b'de görülmektedir. Sonuçlar kullanılan yöntemin başarısını doğrulamaktadır.

Bu sınamaların dışında özellikle düşük çözünürlükte (32x32) ve gürültü eklenmiş bir görüntüye sahip nesnenin (Şekil 24 a) tanınmasında ve onun model üzerindeki yerleşiminin belirlenmesinde sonuç Şekil 24 b'deki gibi olmuştur. Yani tanıma (biraz da nesnenin karakteristik yapısından dolayı) gerçekleşmiş olmakla birlikte nesnenin ağırlık merkezinin konumu (özellikle yönün saptanması) çok farklı olmuştur. Karakteristik bir yapısı olmayan başka biçimde ki nesne (örneğin daire biçimine yakın) için tanımda bir sorun yaşanmasa bile hem ağırlık merkezlerinin çakıştırılmasında hemde yerleşim yönünün bulunmasında bir sorun yaşanabileceği açıktır. Örneğin, üzerinde küçük bir yarık açılmış bir silindirin tanınmasında (görüntüye binmiş gürültü nedeniyle) bu yarık modeldeki ile aynı yönde çakıştırılmamış olabilecektir. Ancak, bu onun yinede doğru tanınmasına engel değildir. Bu yanılgıya gerçekte insanda düşebilmektedir. O nedenle, yöntemin kullanılmasında tanınacak nesnelerin biçimleri için bir kısıtlama olmalıdır. Özellikle simetrik görüntü veren nesneler bu gruba alınmalı ve bu cins nesneler için hata payının diğerlerinde rastlanılanlardan yüksek olacağı kabul edilmelidir.

Hataya yol açabilen bir başka husus yakın büyüklükte olan aynı biçimli nesnelere dir. Birbirine yakın büyüklükteki nesneler için momentlerde yakın olacağından yine gürültünün etkisiyle nesnelerin yanlış modellerle eşleştirilmeleri olanaklı olabilmek



(a)

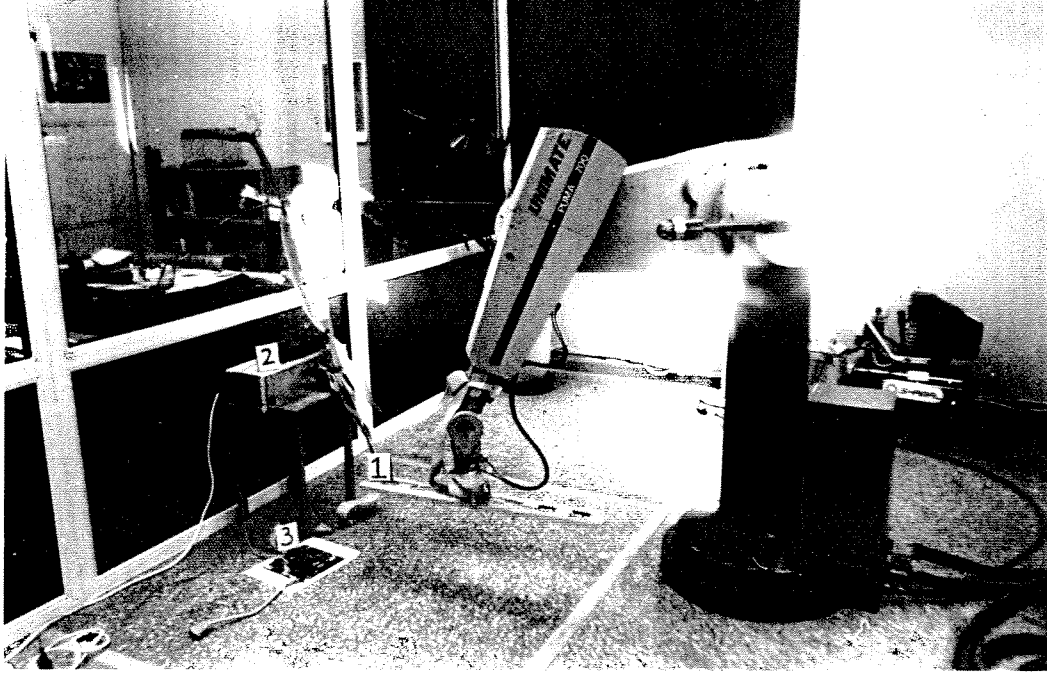
(b)

Şekil 24 (a) Bir nesnenin gürültü eklenmiş ve düşük çözünürlükte (32x32) görüntüsü, (b) Nesnenin tanıma sonrası biçimi, ve model

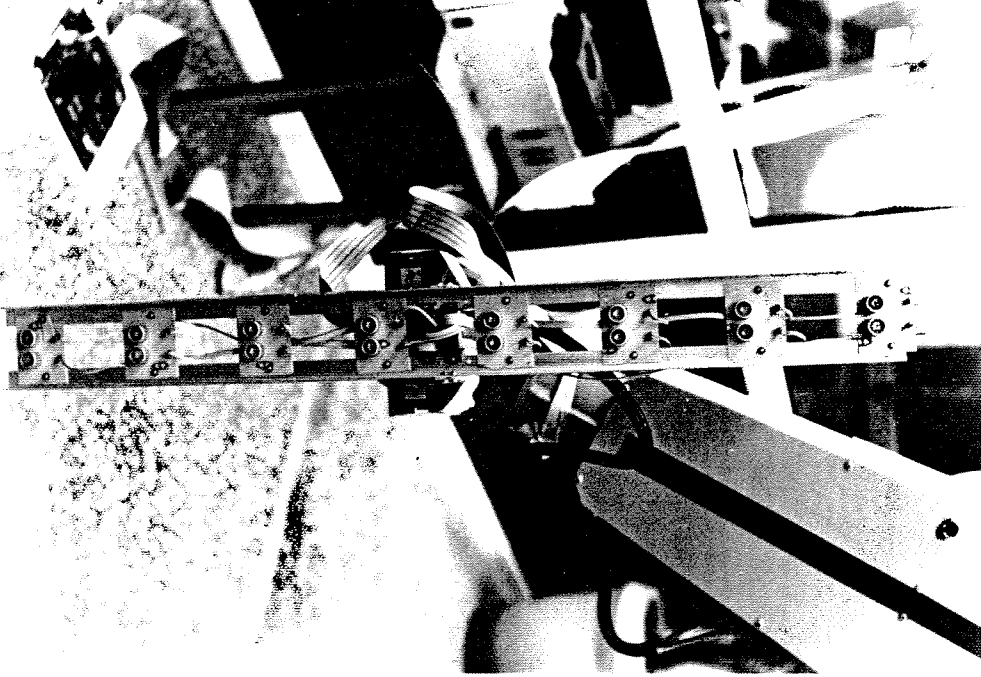
tedir. Bu açıdan da yöntemin uygulanmasında bir kısıtlama vardır. Aynı biçimdeki iki nesnenin birbirine karıştırılmaması için aralarındaki ayırdedici büyüklük oranının ne boyutta olduğu ise çalışmada saptanmamıştır. Burada elbetteki nesnenin başka açıdan alınmış görüntüsünün ilişkin modelle olan eşleştirilmesi yoluyla da doğru olanı seçme şansının mevcut olduğu dikkate alınmalıdır. O nedenle de uygulamada çıkan sorun daha az olacaktır. Benzer çalışmalarda da bu sorunlar vardır, ve tanıma oranları 100 % düzeylerine çıkmamaktadır.[18,20]

6. Uygulama Düzenegi

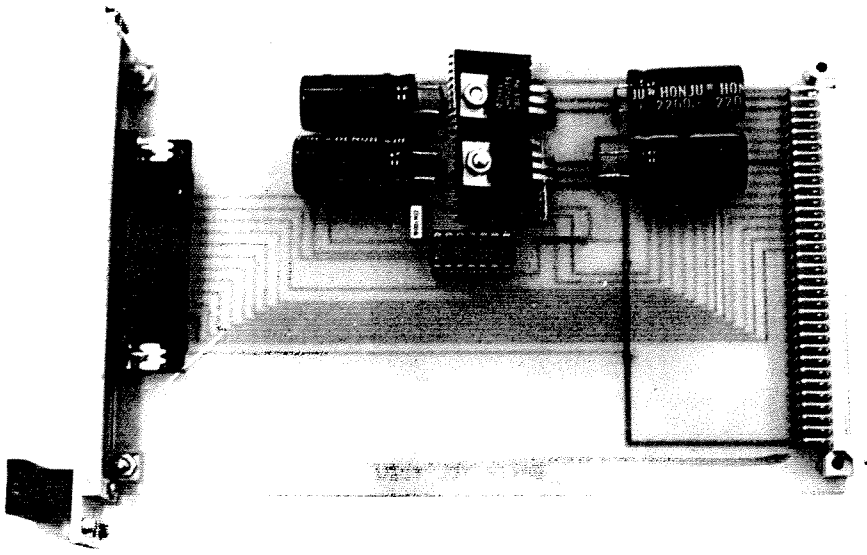
Resim 1'de uygulamanın gerçekleştirildiği donanım bir bütün olarak görülmektedir. Resmin ortasında PUMA 760 bir robot kol ve arka planda da kol son uç eleman hava basıncı ile çalıştığından bunun için basınçlı hava kaynağı kompresör görülmektedir. Resimde '1' ile gösterilen robot kolun ucuna monte edilmiş dizi üzerinde sekiz çift ultrasonik dönüştürücü bulunur. '2' ile gösterilen alüminyum kutu eurocard standardında tasarlanmış ultrasonik duyaç alıcı-vericilerine ilişkin elektronik devrelerini barındırmaktadır. '3' numaralı parça Intel Ev80C196KR mikrodenetleyici kartıdır. Resim 2'de robot kol'a bağlı sekiz adet ultrasonik duyaç çiftinin bulunduğu yapı daha yakından bir görüntüsünü vermektedir. Resim 3 güç kaynağı olarak tasarlanmış kart'ı. Resim 4 ise ultrasonik duyaçlar için tasarlanmış salıngaç (oscillator) devresini göstermektedir. Resim 5 önceki bölümde anlatılan ve Şekil 6' da görülen sürücü devrelerini göstermektedir. Resim 6 önyükseltici devresinin bir görüntüsüdür. Resim 7 ise duyaçlardan gelen bilginin (işaretin) koşullandırıldığı devrenin bir görüntüsünü vermektedir.



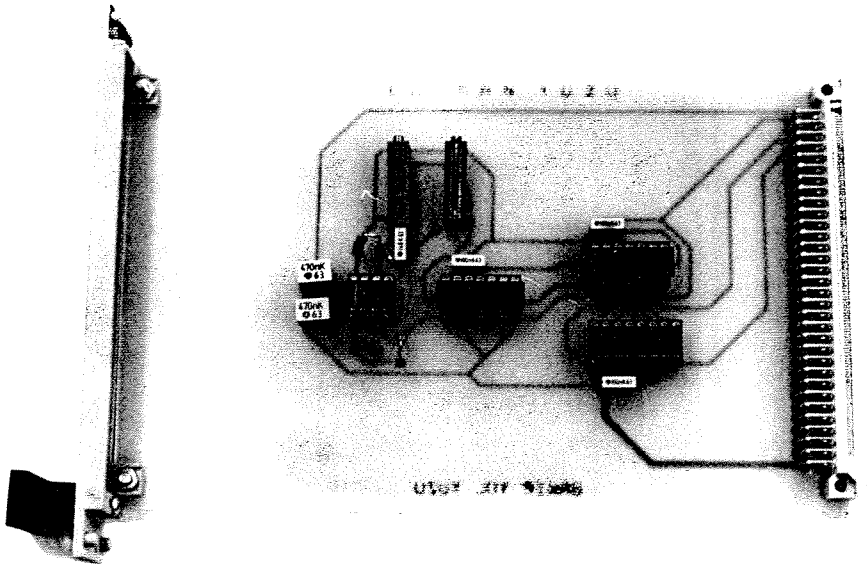
Resim 1 Uygulama düzeninde yer alan donanımın genel görünümü



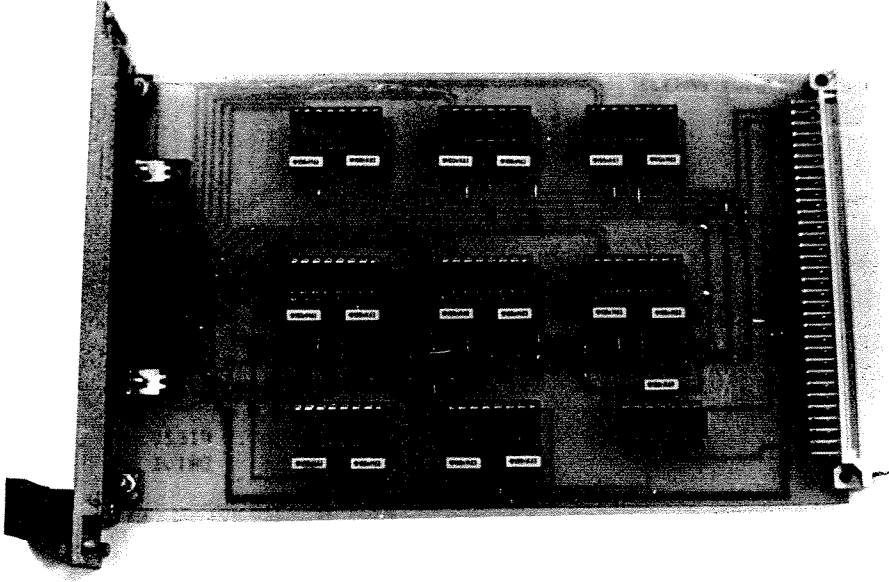
Resim 2 8 ifti ultrasonik dönüştürücü



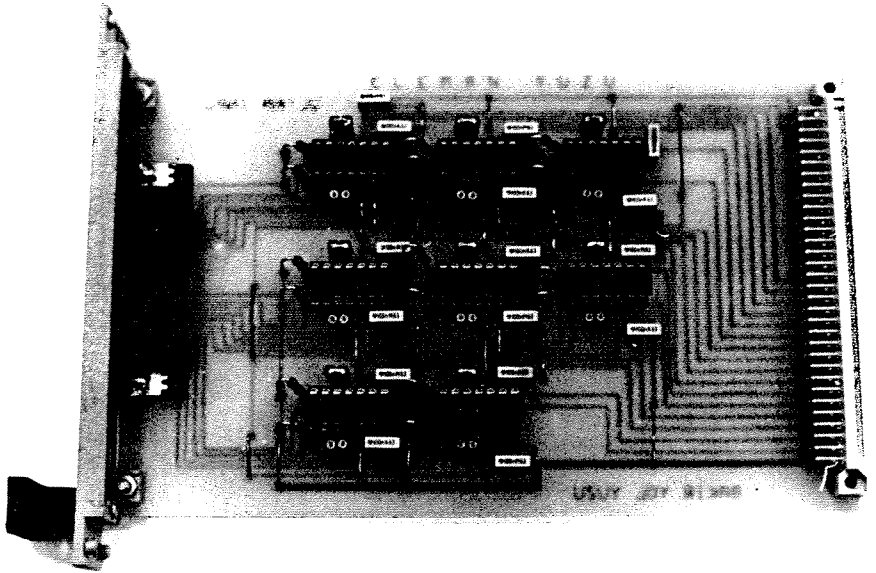
Resim 3 Besleme regülatörleri ve kontrol kartına giriş çıkış devresi



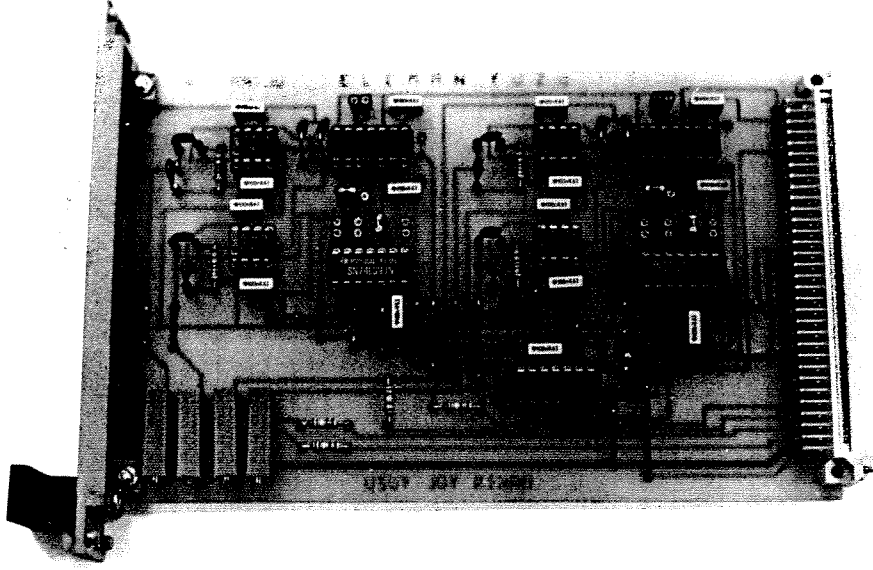
Resim 4 Salıngaç devresi



Resim 5 Ultrasonik vericileri süren analog anahtarlar



Resim 6 Ultrasonik alıcılardan gelen sinyal girişi ve n yükselticiler



Resim 7 Şekil 7' de görülen alıcı devresi

7.Sonuç

Proje bir robot kol'un yörünge planlamasında ve denetiminde kullanılmak üzere modele dayalı nesne tanıma ve tanıman nesnelerin konumlarının saptanması için bir yöntem geliştirme amacına büyük lde ulaşmıştır. Nesne tanımda ana ağırlık nesnelere ait kenar fonksiyonları, bunların uzunluğu, ve birinci ve ikinci momentlerden oluşan imzanın modelde tanımlananla uyulmasına dayandırılmıştır. Tanıma nesnenin görüntü yüzeyi boyunca kaydırılması ve görüntü yüzeyine normal eksen etrafında döndürülmesi gibi dnştrmler altında olanaklıdır. Bunun için nesnelerin eğer momentleri eşleştirilebiliyorsa, kenar fonksiyonlarının uzunlukları eşitlendikten sonra model ve nesne kenar fonksiyonları (periyodik olan yapılarından da yararlanarak) kaydırılarak anılan dnştrmlerin etkileri ortadan kaldırılmaktadır. Burada ortaya çıkan bir kısıtlama nesnenin bakılan yöndeki düzlemsel kesitinin simetrik bir biçimde olmamasının tercih ediliyor olmasıdır.

Tümleşik algılama önceden tanımlı bir ortamda kendinden devinimli bir hareketli robotun dünya koordinatlarında yerinin belirlenmesi ve onun ilişkin modelindeki bilgilerin gerçek zamanda yenilenmesinde başarıyla kullanılmıştır.[28,32] Yörünge boyunca denetim bu çalışmada çok sayıda ultrasonik duyaçları kullanan tümleşik algılama sistemi destekli olarak srdrlmştir. Görüntü elde edilmesindeki oznrlk rneklemeye yoğunluğuna doğrudan bağlı olduğundan, ve nesne tanımda kesinlik daha çok örneklemeyi ve bilgisayar zamanını gerektirdiğinden yörünge boyunca hız artırılması

bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır.[32] Daha etkin yazılımlar geliştirerek, daha hızlı analog/sayısal dönüştürücüler yanında daha yüksek hesaplama yapma yeteneğinde bilgisayarlar kullanmak giderek daha olanaklı olduğundan endüstriyel uygulama açısından sonuçlar ümit vericidir.

Çalışmada elde edilen bilgiler bildiri olarak yayınlanarak rapor edilmiştir. [24,27,28] Sonuçlar konferanslarda bildiri olarak sunulduğunda daha kısa zamanda bilimsel yayın dünyasında yerini aldığından dergi yayın biçimi daha sonraya ertelenmiştir.

Proje çalışmalarının bir başka dolaylı sonucu proje grubunun ABD'de Purdue Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümünden iki Öğretim Üyesiyle birlikte NATO'dan Ortak Araştırma Desteği (Collaborative Research Grant) almaları olmuştur. Desteğin madenlerde robot kullanımının koşullarının araştırılmasına yönelik bir projedir. Kömür çıkarılırken damarın cidara olan sınırında 2 cm kalınlığında maden tabakasının bırakılması gerekmektedir. Bu kalınlığın saptanmasında da projede geliştirilen görüntü oluşturma ve görüntü temizleme teknikleri kullanılmaktadır. Bu kez duyaç olarak Ground Penetrating Radar (GPR) yer almakta ve radar taraması sonucu elde olunan görüntü amaç için kullanılmaktadır. Öte yandan, bu projedeki ilginç bir sonuç olarak bir kepçe (backhoe) robot kol olarak modellenmekte ve sistemin dinamik simülasyonu yapılmaktadır. Bu çalışmanın ilk sonuçları sunulmuştur. [31] Tarafımızdan yapılan araştırmalara göre yayın kapsamı itibariyle orijinaldir. Yukarıda değinilen GPR'da kepçe üzerine yerleştirilecektir. Uygulama alanı madenler yanında yeraltı inşaatlarıdır (underground construction).

Kaynaklar:

1/H.Kırağı, "Object Recognition and Localization with Ultrasonic Imaging in Robotics Applications", M.S.Tezi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, Ankara, Şubat 1994

2/Bryant,R.C. Bogner,R.E., "Ultrasonic Surface Imaging in Adverse Environments", IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics, Vol.SU-31, No.4, 373-390, July 1984

3/Martin,J.M., Ceres,R., No,J., Calderon,L., "Adaptative Ultrasonic Range-Finder for Robotics", NATO ASI Series, Vol.F-52, Sensor Devices and Systems for Robotics, 143-156, Springer-Verlag, 1989

4/Martin,J.F., Marsh,K., Richardson,J.M., Rivera,G., "Acoustic Imaging in Three Dimensions", NATO ASI Series, Vol.F-43, Sensors and Sensory Systems for Advanced Robotics, 341-359, Springer-Verlag, 1988

5/Schoenwald,J.S., "Acoustic Range Sensing for Robotic Control", NATO ASI Series, Vol.F-52, Sensor Devices and Systems for Robotics, Springer-Verlag, 1989

6/Barshan,B., Kuc,R., "Differentiating Sonar Reflections from Corners and Planes by Employing an Intelligent Sensor", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-12, No.6, 560, Jan. 1990

7/Knoll,A.C., "Ultrasonic Holography Techniques for Localizing and Imaging Solid Objects", IEEE Trans. on Robotics and Automation, RA-7, No.4, 449, 1991

8/Elfes,A. "Sonar Based Real World Mapping and Navigation", IEEE Trans. on Robotics and Automation, RA-3, No.3, 249, 1987

9/ Watanabe,S., Yoneyama,M. "Ultrasonic Robot Eyes Using Neural Networks", IEEE Trans. on Ultr. Fer. and Freq. Cont., Vol.37, No.2, 141, 1990

10/ Mowforth,P.H., Grant,E., "Three-Examples of Sensing for Intelligent Control", Proc. 1988 IEEE 3rd Intl. Symposium on Intelligent Control, 24-26 August 1988, Arlington,VA, USA

11/ Grant,E., "Uncertainty in Robot Sensing, Sensor-Based Robots: Algorithms and Architectures", NATO ASI Series, Vol.66, 1991

12/ Rafaat,H., Wong,A.K.C., "A Texture Information Directed Region Growing Algorithm for Image Segmentation and Region Classification", Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol.43, 1-21, 1988

13/ Wong, A.K.C., Lu, S.W., Rioux, M., "Recognition of 3-D Objects in Range Images by Attributed Hypergraph Monomorphism and Synthesis", Proc. of 1st IFAC Symposium on Robot Control, pp.389-394, Barcelona, Spain, Nov.1985

14/ Wong,A.K.C., Lu,S.W., "Recognition and Knowledge Synthesis of 3-D Objects Based on Attributed Hypergraphs", IEEE Trans. on PAMI, 1989

15/ Wong,A.K.C., "Robotic Vision Knowledge System", NATO ASI Series, Vol.F.66, Sensor-Based Robots: Algorithms and Architectures, 61-92, 1991

16/Jarvis,R.A., "A Perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-5, No.2, 122, Jan. 1983

17/Mokhtarian,F., Mackworth,A. "Scale-Based Description and Recognition of Planar Curves and Two-Dimensional Shapes", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-8, No.1, 34-43, Jan.1986

18/Ayache,N., Faugeras,O.D. "HYPER:A New Approach for the Recognition and Positioning of Two-Dimensional Objects", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-8, No.1, 44-54, Jan. 1986

- 19/ Nasrabadi, N.M., Li, W. "Object Recognition by a Hopfield Neural Network", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.21, No.6, 1523-1535, Nov./Dec. 1991
- 20/ Špirkovska, L., Reid, M.B. "Robust Position, Scale, and Rotation Invariant Object Recognition Using Higher-Order Neural Networks", Pattern Recognition, Vol.25, No.9, 975-985, 1992
- 21/ Knoll, T.F., Jain, R.C. "Recognizing Partially Visible Objects Using Feature Indexed Hypotheses", IEEE J. Robotics and Automation, Vol.RA-2, 1, 3-13, 1986
- 22/ Pei, S., Lin, C. "The Detection of Dominant Points on Digital Curves by Scale-Space Filtering", Pattern Recognition, Vol.25, No.11, 1307-1314, 1992
- 23/ Ansari, N., Delp, E.J. "On Detecting Dominant Points", Pattern Recognition, Vol.24, No.5, 441-451, 1991
- 24/ Kırığ, H., Ersak, A. "Object Recognition and Localization with Ultrasonic Scanning" Proceedings of IEEE Melecon'94, Vol. 3, 1185-1188, Antalya, Turkey, 12-14 April 1994
- 25/ Jarvis, R.A. "A Laser Time-of-Flight Range Scanner for Robot Vision", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-5, No.5, 122, Jan. 1983
- 26/ Rackowsky, J., Rembold, U., "The Multisensory System of the KAMRO Robot", NATO Workshop on Highly Redundant Sensors in Robotics, May 16-20, 1988, Il Chicco, Italy
- 27/ Zontul, H., Ersak, A., "Object-Oriented Representation of a Robot Manipulator", Proceedings of IEEE Melecon'94, Vol. 1, 363-366, Antalya, Turkey, 12-14 April 1994
- 28/ Yenilmez, L., "Mobile Robot Self-Localization by Establishing 2D Absolute Orientation with Ultrasonic Sensors", Proceedings of ESDA Second Biennial European Joint Conference on Engineering Systems Design and Analysis, London, UK, 4-7 July 1994
- 29/ J.Borenstein, Y.Koren, "Histogramic In-Motion Mapping for Mobile Robot Obstacle Avoidance", IEEE Trans. on Robotics and Automation, RA-7, No.4, 535, 1991
- 30/ Kırığ, H., Ersak, A. "Ultrasonik Görüntüleme ve Görüntü İşleme", Elektrik Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi, Vol.1, 183-188, Trabzon, Eylül 1993

31/ Bodur,M., Zontul,H., Ersak,A., Koivo,A., et al., "Dynamic Cognitive Force-Control for an Automatic Land Excavation Robot", Proceedings of IEEE Melecon'94, Vol. 2, 703-706, Antalya, Turkey, 12-14 April 1994

32/ Yenilmez,L., "Obstacle Avoidance for Mobile Robots", M.S.Tezi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, Ankara, Haziran 1993

33/Nethery,J., Spong,M., "ROBOTICA: A Mathematica Package for Robot Analysis", IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol.1, No 1, 13-20, March 1994

34/ Brady,M., "Artificial Intelligence and Robotics", Artificial Intelligence, 26(1), 1985, pp.79-121

EK 1

Proje ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, EEMB tarafından da desteklenmiştir. ODTÜ EEMB'nin desteği aynı bir katkı olmuştur. Laboratuvar alanları ayırmak, ölçü donanımı sağlamak bilgisayar desteği sağlamak, teknisyen tahsis etmek v.b. tür destekler EEMB'den alınanların arasındadır. Bunların dışında ODTÜ Araştırma Fonu Projeleri destekleme kapsamında 2300.- ABD Doları değerinde bazı malzemeyi de başka projelerle kullanımda paylaşmak üzere temin etmiştir.

Proje sonuçları başka uygulayıcı kurumların kullanımına açmak elbette yararlı olacaktır. Proje grubu böyle bir çalışmada yer almakta arzudur. Sonuçlar endüstrinin yanında, Türk Silahlı Kuvvetlerinin Araştırma ve Geliştirme Birimlerinin de çeşitli uygulama projelerine konu edilebilir. Her iki halde de projede geliştirilen tekniklerin ve yazılımların uygulama araç ve gereçlerine adaptasyonu aşamasından geçilmesi gerektiği belirtilmelidir. Böyle bir uygulama şansının elde edilmesi durumunda TÜBİTAK projenin oluşturulması ve yürütülmesinde yer almalı, ve hatta bazı ek destekler vererek uygulamanın gerçekleştirilmesinde tüm yükün ilgilenen kuruluşa mal edilmemesi sağlanabilir. Bilindiği üzere ülkemizde üniversite dış kuruluşların araştırma ve geliştirmeye ayırdıkları kaynaklar çoğunlukla az olduğundan araştırma sonuçlarının uygulama şansı pek az olmaktadır. İlgilenen dış kuruluşlar için sistemin bir görsel tanıtımı yapılabilir. Zaten bu kapsamda Arçelik Araştırma Bölüm başkanı ve beraberindeki büyükçe bir gruba çalışma sonuçları laboratuvarda tümüyle gösterilmiştir. Bunun dışında 15.11.1993 tarihinden itibaren 1 hafta süreyle ODTÜ'de TÜBİTAK MİSAG Ünitesi tarafından gerçekleştirilen bir alışma Toplantısında sistem tüm katılanlara da ayrıca gösterilmiştir.

Çalışma sonuçları boya tankına daldırılan nesnelerin bulunup çıkartılması, bulanık sualtına gömülü nesnelerin yerinin saptanarak çıkartılması v.b. uygulamalarda kullanılabilir.

EK-2

Proje alışmaları Sürecinde Yapılan Yayınların Kopyaları

Object Recognition and Localization with Ultrasonic Scanning

Hasan KIRAGI, Student Member, IEEE , Aydin ERSAK, Member, IEEE

Dept. of Electrical and Electronics Eng., ROLAB
Middle East Technical University
Ankara, TR-06531, TURKEY

Abstract — In this paper an object recognition and localization system based on ultrasonic range imaging to be used in optically opaque environments is introduced. The system is especially designed for robotics applications. Ultrasonic image is acquired by scanning ultrasonic transducers in two dimensions above the area where objects are located. The features that are used for recognition and localization processes are extracted from the outermost boundaries of the objects present in the input scene. Experimental results concerning the applications are presented.

INTRODUCTION

The object recognition and localization is an important problem in robotics applications to endow robots with a greater degree of intelligence and to interact with its environment in a flexible manner. Robotics vision systems are implemented to overcome these problems. In these systems major source of image input comes from optical sensors as gray tone or color images from CCD cameras, and the range images acquired in a variety of methods such as structured lighting, stereo vision, or direct range measurements from laser range finder[1,2,3]. The acoustical imaging which finds widespread use in biomedical applications, non-destructive testing and under-water imaging is another common source of gathering image.

Optical imaging systems are superior to ultrasonic imaging systems from the point of view of resolution and data acquisition time. Furthermore, specular reflection effect of the sound waves limits the application of the ultrasonic sensing systems. Meanwhile, acoustics have the advantage of obtaining images in optically opaque mediums. In acoustical imaging an ultrasonic transmitter generates sound waves propagating away from the sensor. This wave is reflected by solid objects. Image reconstruction is performed by observing some properties of the reflected echo signal. These properties are the propagation speed of sound waves, and variations in phase and amplitude of the sound wave in one or two dimensional space.

A variety of complex imaging systems are found in the literature[4,5]. In this application imaging is based on ultrasonic pulse-echo distance measurements[6]. The goal of the imaging is to determine the area enclosed by the objects. It is assumed that imaging is performed in a known environment, and objects to be imaged are placed on a flat background. The acoustical axis of the ultrasonic sensors are aligned perpendicular to the flat background. In this way objects exhibiting specular effects are distinguished from the background.

ULTRASONIC SCANNING

The ultrasonic imaging presented here is intended for recognition of objects located in opaque environments, where optical imaging techniques are not feasible. Image capturing is made by ultrasonic scanning of the predefined area in a grid like structure. At each cell of the grid a range measurement is carried out, and this is based on ultrasonic pulse-echo mode of operation[6]. An ultrasonic transmitter generates a short sound impulse causing a longitudinal wave to propagate away from the sensor. This wave is reflected by solid objects and travels back to the sensor waiting for the return echo. Upon the reception of the echo, the time of flight is determined. The multiplication of this time period by the sound velocity yields the distance between the sensor and the reflecting object.

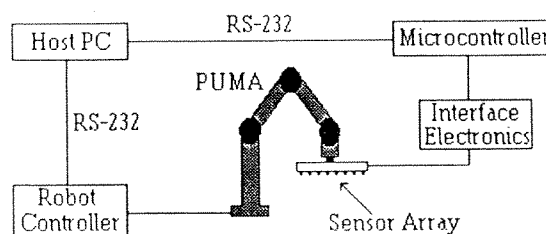


Figure 1 Block diagram of the system

The system consists of a personnel computer acting as a host controller, a microcontroller performing the range measurements, a PUMA 760 robot arm used in scanning the area of interest, and the sensor interface circuitry. The sensors used for distance measurements are the piezoelectric transducers operating at 40 kHz. In order to lower the sampling time a sensor array consisting of 8 piezoelectric transmitting and receiving transducer pairs is used. The sensor array is fixed to the end effector of the robot arm. The acoustical axis of the sensors are aligned perpendicular to the flat surface where objects are located. The structure of the system is shown in Fig. 1.

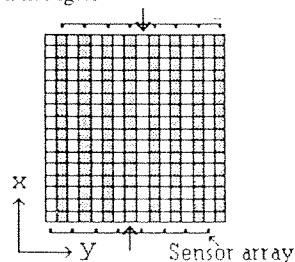


Figure 2 Scanning of the work space

Table 1 Sampling intervals corresponding to 3 imaging size.

M	32	64	128
S mm	27.5	13.75	6.875

The imaging size, M, can be set to 32, 64, or 128. At each size although the same amount of area is scanned, sampling point intervals, S, differ in millimeters as given in Table 1. To describe the scanning procedure consider the work space divided into a 16x16 grid structure as shown in Fig.2. Scanning of this area is completed in two passes. In the first pass, the distance of each white cell in x direction, corresponding to the ultrasonic receiver in the array, is measured. In the second pass, this time each black cell distance is measured. Cells, at which a specular reflection occur, are marked as no-return-echo. The scenes obtained by ultrasonic scanning are shown in Figs.6a, 6b, 7a, 8a, and 9a.

IMAGE PROCESSING

The raw image is processed to put it into a suitable form for extraction of features. The goal is to obtain the outermost boundary of the objects present in the scene after smoothing the object boundaries and eliminating noise.

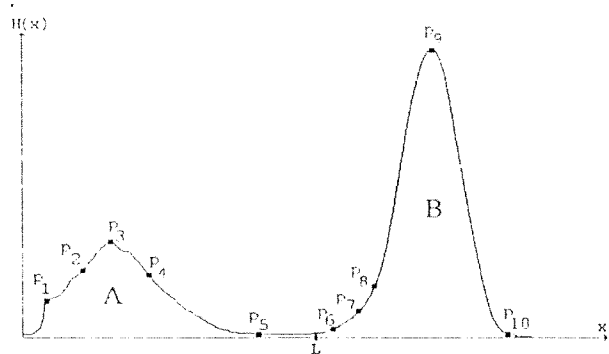


Figure 3 Smoothed histogram of a range image with characteristic points.

For this purpose, firstly the image is thresholded and converted into binary form. In thresholding the histogram of the image is used. Smoothed histogram of an image is shown in Fig.3. In the histogram, region A is created by the object pixels, and therefore they are closer to sensors. The region B is created by the background pixels. A threshold level, L, is found between these regions by detecting the characteristic points, P5 and P8, using dominant point detection algorithm[7] which finds out the high curvature points of a curve. The threshold level, L is found to be the middle of the characteristic points. Pixels having a value less than L are marked as object pixel, and pixels having a value greater than L are marked as background pixel. Pixels corresponding to cells which are marked as no-return-echo are also marked as object pixel, since the background points are perpendicular to the acoustical axis of the sensors it is not expected to observe specular reflections at those points.

Shrink and swell operators[8], both of order 5, are applied to the thresholded binary image. They smooth out rough edges and remove some of the noise. After application of them still some small foreground regions appear at the background

which do not belong to the object, and some cavities as holes on the object appear inside the object fields. These regions are determined by using region growing and region labeling techniques[8] and then removed from the binary image.

Finally by applying the edge detection technique to the binary image the boundary of the object is obtained. The result of applying the above techniques to the image of Figs.6a and 6b is shown in Figs.6c and 6d respectively.

RECOGNITION

In recognition, the objects present on a scene are assumed to be isolated. A model library is constructed based on the global features of the objects. These features are then compared with the features of an unknown object present in the scene. Each unknown object is recognized by relating it with a model object which has a greatest match value in comparison of the features.

In recognition, some combinations of second-order and third-order central moments are used. They are invariant under translation and rotation. As a first step object, boundaries are coded as a function of path length variable ℓ , $B(\ell)=[x(\ell),y(\ell)]$, which represents a boundary curve as a set of successive point coordinates. Then the centroid of the curve is calculated using the zeroth-order and the first-order moments of the boundary points as given in (1), where n is the number of points on the boundary, and (x_c, y_c) is the centroid of the boundary.

$$m_{kj} = \sum_{\ell=0}^{n-1} x(\ell)^k y(\ell)^j \quad (1.a)$$

$$x_c = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \quad y_c = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (1.b)$$

Then the central moments at order (k+j) are calculated as given in (2).

$$\mu_{kj} = \sum_{\ell=0}^{n-1} (x(\ell) - x_c)^k (y(\ell) - y_c)^j \quad (2)$$

Four different central moment combinations are used as features of the objects in recognition phase[8]. These moment combinations are given in (3):

$$\varphi_1 = \mu_{20} + \mu_{02} \quad (3.a)$$

$$\varphi_2 = (\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2 \quad (3.b)$$

$$\varphi_3 = (\mu_{30} - 3\mu_{12})^2 + (3\mu_{21} - \mu_{03})^2 \quad (3.c)$$

$$\varphi_4 = (\mu_{30} + \mu_{12})^2 + (\mu_{21} + \mu_{03})^2 \quad (3.d)$$

Recognition depends on finding the minimum Euclidean distance between the feature values of the unknown object and the feature values of the models in the library. Since the feature values are in exponential form their natural logarithms are used in calculations. Related equations are given in (4), where $\varphi_o(j)$ belong to the object, $\varphi_{m_i}(j)$ belong to model i, q

is the number of models in the model library, Γ_i is the distance between the unknown object and model i , and κ is the index of the model matched to the object.

$$\Gamma_i = \sqrt{\sum_{j=1}^4 \left(\text{Ln}(\varphi_o(j)) - \text{Ln}(\varphi_{m,i}(j)) \right)^2}, 1 \leq i \leq q \quad (4.a)$$

$$\kappa = \{j | j = \text{Min}(\Gamma_i), 1 \leq i \leq q\} \quad (4.b)$$

LOCALIZATION

The localization process is to transform model points to the corresponding points of the recognized object. T_{mo} is the transformation matrix from the model coordinate frame to object coordinate frame, and can be defined as given in (5), where (x_{co}, y_{co}) is the centroid of recognized object, (x_{cm}, y_{cm}) is the centroid of model, θ is the rotation angle between the coordinate frames of the model and the object,

$$T_{mo} = T(x_{co}, y_{co})R(z, \theta)T(-x_{cm}, -y_{cm}) \quad (5)$$

The centroids of the model and the object are calculated from (1). To find the rotation angle, firstly the matching points of the model and the object are determined. This matching is done by finding the correlation between the boundary signature functions of the model and the object. The boundary signature function, $r(\ell)$, can be defined as a one-dimensional functional representation of the boundary curve. It is constructed by calculating the distance from the centroid of the boundary curve to the boundary point at a path length ℓ as in (6) where n is the number of point on the boundary.

$$r(\ell) = \sqrt{(x(\ell) - x_c)^2 + (y(\ell) - y_c)^2}, 0 \leq \ell \leq n-1 \quad (6)$$

The signature function is a periodic function repeating itself at a period of n . The correlation between the signature functions of the object and the model is calculated as given in (7), where $r_o(\ell)$ is the signature function of the object, $r_m(\ell)$ is the signature function of the model.

$$C(\ell) = \sum_{j=0}^{n-1} r_m(j)r_o(j+\ell), 0 \leq \ell \leq n-1 \quad (7)$$

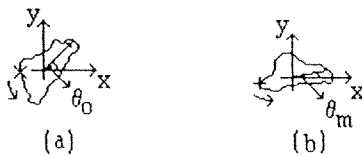


Figure 4 Orientations of, a) Recognized object b) Model.

The highest correlation between signature functions is found at ξ where $C(\ell)$ is maximum. Matching points on the boundaries of the object and the model are found by shifting the object boundary curve left by ξ . As an example, consider orientations of a recognized object and its corresponding

model shown in Fig.4, boundaries are coded starting at the marked point and in the arrow direction. Corresponding signature functions and the correlation between these boundaries are shown in Fig.5.

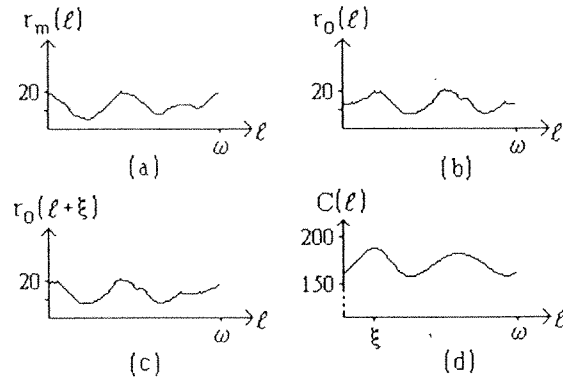


Figure 5 Signature functions of, a) the model b) the object c) the object after shifting, and d) the correlation function.

After finding the compatible points on the two boundary curves (referring to Fig.6), the angles formed by the line drawn from the centroid to the boundaries and the x -axis are calculated as in (8), where $\theta_m(\ell)$ and $\theta_o(\ell)$ stand for these angles formed in the model and in the recognized object, respectively.

$$\theta_m(\ell) = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{y_m(\ell) - y_{mc}}{x_m(\ell) - x_{mc}} \right) \quad (8.a)$$

$$\theta_o(\ell) = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{y_o(\ell + \xi) - y_{oc}}{x_o(\ell + \xi) - x_{oc}} \right) \quad (8.b)$$

Finally, the angle θ is found as the average of the difference between the corresponding angles of the model and the recognized object, as given in (9).

$$\theta = \frac{1}{n} \sum_{\ell=0}^{n-1} (\theta_m(\ell) - \theta_o(\ell)) \quad (9)$$

TEST RESULTS

The system has been tested for six different objects. The scenes related to the objects are obtained by ultrasonic scanning from which the models are derived are shown in Fig.6a and 6b. The ultrasonic sensors are located 30 cm above the floor. The boundaries of the model objects, obtained after processing of images shown in Figs.6a and 6b, are shown in Figs.6c and 6d, respectively.

Examples for the recognition and the localization of each object shown in Figs.7a, 8a, and 9a are shown in Figs.7b, 8b, and 9b, respectively. The continuous curves represent the object boundaries and the dashed curves represent the model boundaries. The original position and orientation of the models are as shown in Figs.6c and 6d. The corresponding dimension of the workspace is 88x88 centimeters.

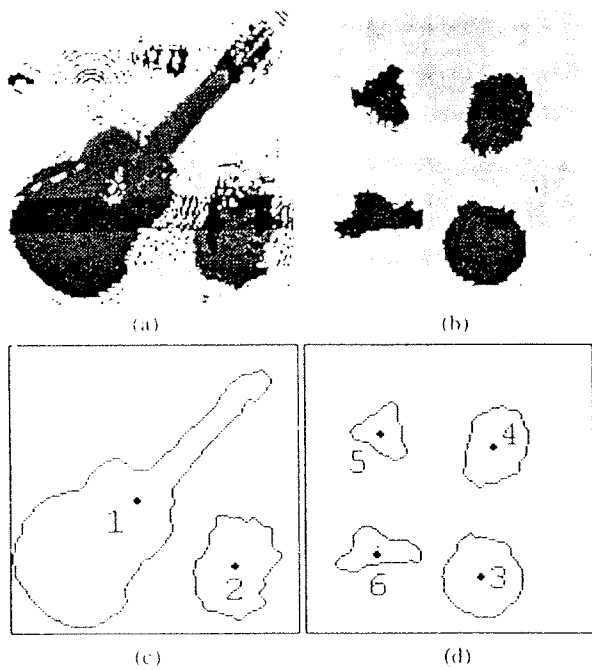


Figure 6 a-b) Scenes from which object models are extracted, c-d) Model boundaries after image processing.

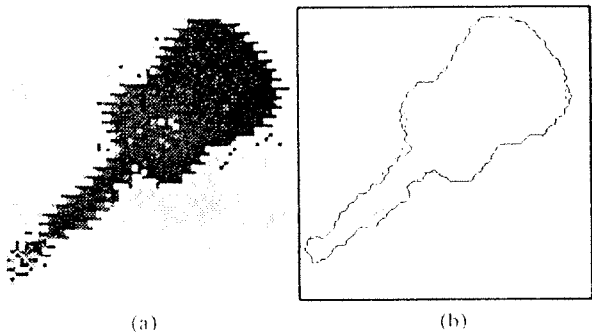


Figure 7 a) A 64x64 image containing object 1, b) Object, continuous curve, and corresponding model, dashed curve.

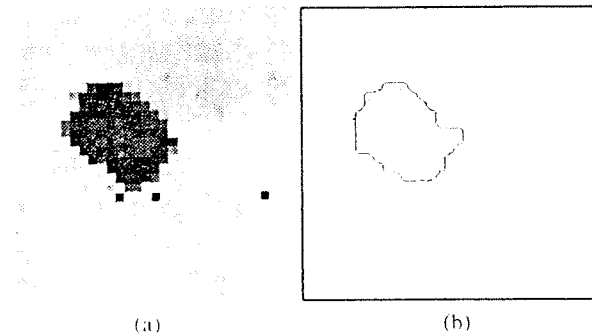


Figure 8 a) A 32x32 image containing object 2, b) Object, continuous curve, and corresponding model, dashed curve.

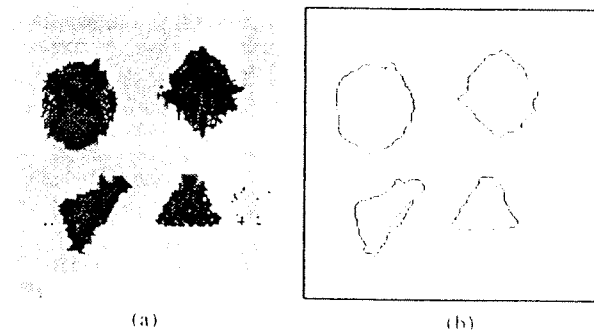


Figure 9 a) A 128x128 image containing objects 3,4,5, and 6. b) Objects, continuous curve, and corresponding models, dashed curve.

CONCLUSION

It is proposed in the study an object recognition and localization method for robotics applications with ultrasonic scanning of the workspace. Experimental results show that, the proposed method is capable of recognizing and localizing of the isolated objects having dimensions at the order of centimeters and can be characterized by its boundaries.

To recognize and localize smaller objects it is necessary to increase the sensor sensitivity both in lateral and depth directions.

It is also seeming reasonable to recognize and localize the overlapping objects by smoothing [7] the detected object boundaries and using the dominant points characterizing the boundaries to match the objects and the models [9].

ACKNOWLEDGMENT: Authors acknowledges the support given by TAEAGE for the research project on which this paper has been based.

REFERENCES

- [1] A.K.C. Wong, "Robotic Vision Knowledge System", *Sensor Based Robots: Algorithms and Architectures*, NATO ASI Series, Vol. F66, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991.
- [2] R.A. Jarvis, "A Perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision", *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-5, no. 2, 1983.
- [3] R.A. Jarvis, "A Laser Time-of-Flight Range Scanner for Robotic Vision", *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-5, no. 5, 1983.
- [4] A.C. Knoff, "Ultrasonic Holography Techniques for Localizing and Imaging Solid Objects", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. RA-7, no. 4, 1991.
- [5] J.F. Martin, K. Marsh, J.M. Richardson, G. Rivera, "Acoustic Imaging in Three Dimension", *Sensors and Sensory Systems for Advanced Robots*, NATO ASI Series, Vol. F-13, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988.
- [6] J.S. Schoenwald, "Acoustic Range Sensing For Robotic Control", *Sensor Devices and Systems for Robotics*, NATO ASI Series, Vol. F52, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1989.
- [7] N. Ansari, E.J. Delp, "On Detecting Dominant Points", *Pattern Recognition*, vol. 24, no. 50, 1991.
- [8] R.J. Schilling, *Fundamentals of Robotics Analysis and Control*, Prentice Hall, 1990.
- [9] N.M. Nasrabadi, W. Li, "Object Recognition by a Hopfield Neural Network", *Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 21, no. 6, 1991.

Object-Oriented Representation of a Robot Manipulator

Haluk ZONTUL, Student Member, IEEE,

Aydin ERSAK, Member, IEEE

Department of Electrical and Electronics Engineering,
ROLAB Middle East Technical University
Ankara, TR-06531, TURKEY

Abstract — The paper presents an object-oriented representation of a robot manipulator. The representation developed here is appropriate to implement a robot simulation package. The software package is easy to use and gives insight to the robot kinematics, the dynamics and the control subjects. The robot representation has been tested in resolved motion rate control and hybrid position/force control applications.

INTRODUCTION

The analysis carried on whole of the joint and Cartesian coordinate relations, actuator torque, joint positions, velocities and accelerations involved in robot is called the simulation of robot. Simulation of the robot has to be performed prior to the construction of the robot itself. This becomes advantageous since there is a chance of testing the dynamic behavior of the robot mechanics at the design phase. The performance testing of a new control algorithm can also be carried out before it is actually applied to the robot. As a result, simulation of robots allows researchers, designers and users to construct robots and task environments at a considerably low cost and time of real systems. Simulation packages are therefore important tools in robotics researches. There are many commercially available robot simulation packages in the market. These commercial packages are useful for research purposes. But, if the aim is to use the package also as a teaching aid, they are too complex to use.

In order to implement a simulation package that may be useful both in research and in teaching, object oriented methods might be used in design and implementation of these packages. Object-oriented methods are used in real-time position control of robot manipulators [1]. However, usage of the object-oriented methods in robot simulation is a new approach. Abstraction, encapsulation, modularity and hierarchy tools of object-oriented programming are used in this design and implementation of the robot simulation package [2,3]. The aim in using object-oriented programming methods in robot simulation is to give insight to the user into the robot kinematics, the dynamics and the control. The aim is achieved in the study by representing basic blocks of robot as objects and defining the necessary relations between these blocks. The paper also includes application of two conventional control algorithms namely resolved motion rate control and hybrid force/position control method to a two degrees of freedom planar robot arm [4,5,6].

OBJECT-ORIENTED MANIPULATOR REPRESENTATION

The object-oriented manipulator model developed here consists of six classes: inverse kinematics, kinematics,

controller, Runge-Kutta representation, manipulator dynamics and robot manipulator [7].

The Kinematics Class :

The first class is chosen as the kinematics of the robot manipulator. It is possible to choose each link as a class, and the kinematics class may be derived as a collection of link classes, but it is avoided here. The motivation behind this is that link classes are quite small building blocks for robots. Furthermore this extra abstraction does not bring any amelioration. Kinematics of a robot can easily be defined based on all joint parameters. The kinematics class can represent any number of spatial links connected to the succeeding and preceding ones over sliding and/or revolute joints. The restriction in the joint type is not important for the generality of the simulation package, because all industrial robots use these two types of joints. The kinematics class encapsulates the following information related to the kinematics.

Number of joint : The number of joints needs to be specified in almost all operations in kinematics .

Joint variable vector : This vector determines the kinematics output, joint angles.

Joint parameters : All kinematics operations require the values of joint parameters. They are "a" the link length, " α " the twist angle, "d" the link offset and " θ " the link angle. A fifth parameter is added to the parameter set in order to show the type of the joint, "0" for revolute, "1" for prismatic..

T_n : The homogenous matrix T_n shows the position and the orientation of the end effector. It is a crucial element of the class for path planning and control applications.

Jacobian matrix : The matrix gives the Cartesian velocities of the end-effector in base coordinate system as function of the joint velocities. The standard form of the Jacobian matrix is six by degree of freedom in dimension. But if the degree of freedom is different than six, this form of the matrix can not be use directly either in control or in inverse kinematics solution of the robot. To have a more useful Jacobian matrix for robots having less than six joints, the standard form is reduced in dimension. In reduction of Cartesian coordinate variables the kinematics structure and the requirement of control algorithm is considered.

The functions computing T_n matrix, Jacobian matrix and auxiliary functions computing ${}^{i-1}A_i$, the joint transformation matrix between link i and $i-1$ and T_k the homogenous transformation of k^{th} are also encapsulated within the kinematics class.

The Inverse Kinematics Class

The inverse kinematics class is derived from the kinematics class by inheritance. It has all attributes of the kinematics class, and furthermore it encapsulates the desired point, the present point, and the error vector. The class also encapsulates necessary functions to form these vectors and solve the inverse kinematics problem numerically. The numerical solution of the inverse kinematics is done using the following procedure:

1. Calculate the actual Cartesian coordinates from the actual joint variables,
2. Form the Cartesian coordinate error,
3. Generate the joint angle change from $\Delta q = J^{-1}\Delta x$,
4. Update the actual joint variables as $q = q + \Delta q$,
5. If $\|\Delta q\| < error_range$, then q is the solution of the inverse kinematics, else go to step 1.

In the convergence of the inverse kinematics solution the position information does not introduce any problem since it has a unique definition. But the orientation information does introduce some problem caused by a multiplicity of definitions. The Jacobian matrix giving velocities of the end effector at the base coordinate system is used to solve the inverse kinematics. The orientation defined in terms of rotations about x, y and z axes (roll, pitch and yaw) must therefore be used in order to be consistent with the Jacobian definition. For example, if the desired point is defined in Euler angles representation, inverse kinematics solution does not converge with above procedure because of the inconsistency with the Jacobian matrix.

The Runge-Kutta Representation Class

The robot simulation depends on the solution of the differential equation of motion. The solution to this differential equation is found by a Runge-Kutta 4th order numerical integration method. The method solves the first-order differential equation system given as;

$$\frac{d\bar{y}}{dt} = f(\bar{y}, t) \quad (1)$$

The class encapsulates the initial, final, and current times, the number of states and the state vector data. The functions that change the integration step and perform integration are also members of the class. The class has a virtual function, named derivative, to represent (1). Any other class derived from Runge-Kutta representation must redefine the derivative function to use the class. The class is not particularly designed for the robot dynamics. It can also be used without an extra effort for electrical circuit simulation, or for the solution of any nonlinear time varying differential equation.

Controller Class

As part of the robot dynamics a PID (proportional integral derivative) controller array, whose size is equal to the degree of freedom of the robot is created. The PID class simulates the transfer function

$$G(s) = K + \frac{T}{Ts} + T^2s \quad (2)$$

and can be used for any PID simulation. The class encapsulates the present error, the old error, the integral of the error vector, the integration-time step, the size of the controller array, and the K_c , T_i and T_d parameter vectors. The functions that set PID parameters, and error vectors, and compute PID outputs are also members of the controller class. Although, the controller class simulates PID controller as a default, the class can be changed to simulate rule-based or artificial neural network controllers [7].

The Manipulator Dynamics Class

The manipulator dynamics class is defined by the aggregation of Runge-Kutta and controller classes.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + g(q) \quad (3)$$

Manipulator dynamics can be written as in equation (3) where $M(q)$ is the inertia matrix, $V(q, \dot{q})$ is made of the Coriolis, centrifugal and frictional force vectors, $g(q)$ is the gravitational loading vector and τ is the actuator torque vector.

The manipulator dynamics class encapsulates all component of equation (3) and inverse of inertia matrix.

$$\begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M^{-1}(\tau - V(q, \dot{q}) - g(q)) \\ \dot{q} \end{bmatrix} \quad (4)$$

These data are used in (4) to redefine virtual derivative function of Runge-Kutta class.

The Robot Manipulator Class

The manipulator class is defined as a collection of the manipulator dynamics and the inverse kinematics classes. The manipulator class does not encapsulate any information, but aggregate two classes using the relations belonging to the same robot.

The class hierarchy of the overall simulation package is shown Fig 1. Different levels of abstractions of the representation serve for efficient use of the simulation package by users at different levels of expert knowledge. As the information of user increases in the robotics field, the level user faces at with simulation package increases giving rise to flexibility at the use of the package. But if the user has little amount of information on robotics field, the package can be entered at level 0 in which the flexibility and possibility of misuse are restricted. As a result, different levels of abstraction concept is an information impedance matching between the user and the robotics field for maximum efficiency. The directional information flow is given in Fig 2.

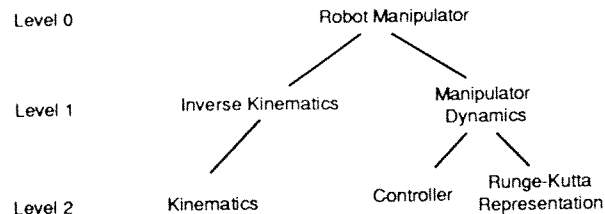


Figure 1 Class hierarchy of the simulation package

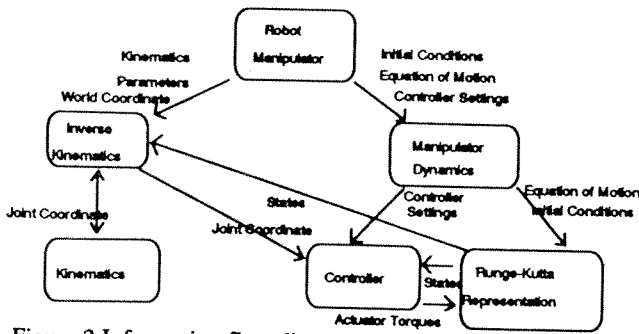


Figure 2 Information flow diagram of the simulation package

APPLICATIONS

The designed simulation package has been tested by simulation of a two degrees of freedom robot shown in Fig 3. The equation of motion of robot is taken from [6]. The resolved motion rate control and the hybrid position/force control algorithm is applied to the robot manipulator [7].

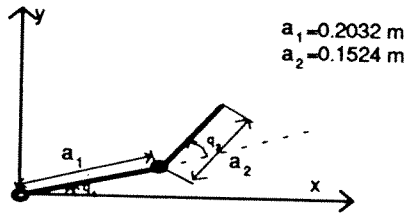


Figure 3 The two degree of freedom manipulator

Resolved Motion Rate Control Application

The resolved motion rate control is a Cartesian space position control algorithm that is applicable to tasks defined in Cartesian space. In the algorithm actual joint positions, q , are measured, and the forward kinematics is used to compute actual Cartesian space coordinates, x_a . The difference between the actual and the desired Cartesian coordinates, x_e , are computed as an error vector. The error vector is multiplied with the inverse Jacobian matrix to find joint space corrective rates, q_e . The PID controller computes the necessary torque, τ , that must be applied to the actuator of the robot in order to reduce the error x_e . The block diagram of the method is shown in Fig 4

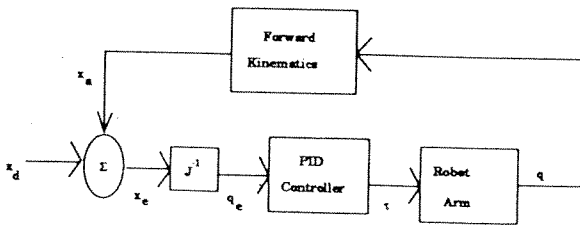


Figure 4 Block diagram of resolved motion acceleration control

The aim of the control is to move the end effector of the robot from an initial point (0.02,0.22) to a final point (0.05,0.27) on a linear path in Cartesian space in 4 secs. and

then keep the end effector at the final point. The desired trajectory is shown at Fig 5.

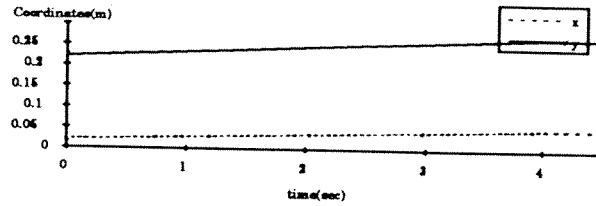


Figure 5 Desired trajectory of the end effector of the robot moving between two points in Cartesian coordinates

The initial state of the end effector of the robot is different from that of desired point. This intentional error is introduced for testing the performance of the algorithm at a step starting error. The PID parameters of the system are set using open-loop step-response of the manipulator to make the system stable, to reduce the steady state error to zero within reasonable phase and gain margins. The energy and the torque limits are not considered in setting of the parameters. But, the trajectory given in Fig 5 has a low velocity, so the torque limits are not important. The initial error is corrected in 0.5 sec as shown in Fig 6 and 7 for errors in the x and y coordinates, respectively. The robot follows the desired path with almost zero error, where error is in the order of 10^{-12} m. The change in the derivative of the path at 4th sec., does not introduce any error in the position of end effector. Since the errors in tracking the desired trajectory are low, it can be stated that the control method exhibits a high performance.

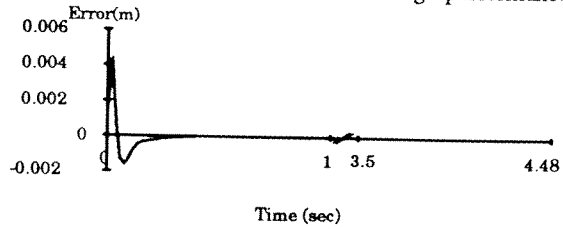


Figure 6 The time variation of the error in the x coordinate

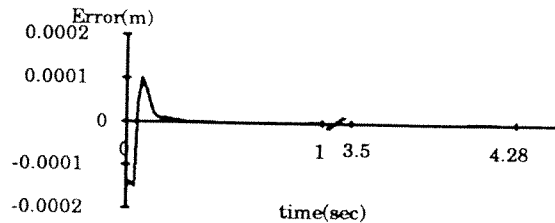


Figure 7 The time variation of the error in the y coordinate

Hybrid Position/Force Control Application

The position control of manipulators is suitable for tasks defined in free space. When there are obstacles, the use of position control algorithms becomes risky. The control may undesirably carry the robot arm to positions that may already be occupied by objects present around the arm. This action may result in possible damages to the objects as well as to the robot itself. The hybrid position/force control is an example of

such modified control approach in which the position of the end-effector and force exerted by it to any obstacle met in due course of its motion are controlled simultaneously. To this end, the Cartesian space is subdivided into two; the position controlled coordinates, and the force controlled coordinates [4]. Since the position and the force control loops are considered disjoint, the output torques of the two loops are additive and the resultant torque is applied to the robot. The block diagram of the algorithm is given in Figure 8.

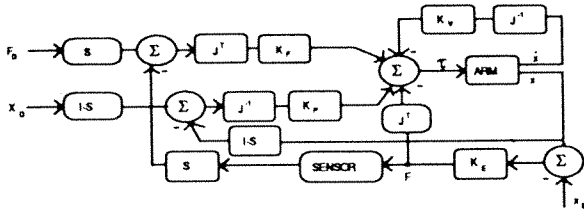


Figure 8 Hybrid position/force control algorithm

The task is to move the robot arm in the positive y direction from $y=0.23$ m to $y=0.28$ m in 4 secs., and remove some material from the wall by applying a force of 0.5 N in the positive x direction and keep robot at that position while applying the force. The stiffness of the wall is taken as 100 N/m.

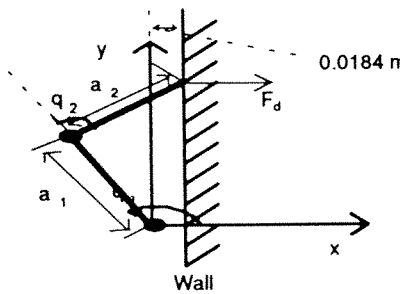


Figure 9 The two degree of manipulator constraint against a wall

The force in the y direction is zero, since the aim is to control position in the y direction, The force applied to the wall in the x direction is kept at 0.5 N. The robot is just touching the wall without applying any force causing an intentional large force error at initial time. But, this force error is decreases to zero in 0.3 seconds The error in the force applied in the x direction is shown in Fig 10. The position error in y coordinate is also reduced to zero at the same time. Position error in the y direction is given in Fig 11. The change in path occurring at 4th second does not introduce any errors

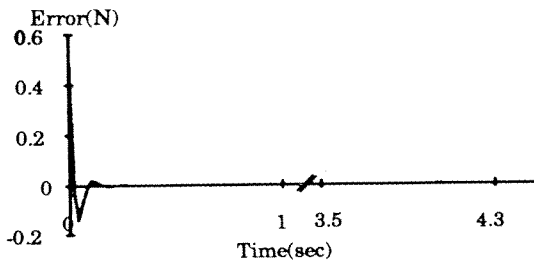


Figure 10 Error in the force in the x direction

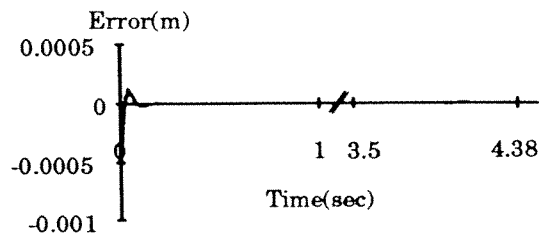


Figure 11 Error in the y position

CONCLUSION

The primary aim of the work is to design a robot simulation package that is both a research and a teaching tool. An object-oriented representation of a robot manipulator is developed for this purpose. Abstraction, encapsulation, modularity and hierarchy tools of the object-oriented design are used to establish different levels of abstraction for users of different information levels. The designed package is used in different research projects successfully at METU Rolab by different users whose information level differs extensively.

The application of the resolved motion rate and hybrid position/force control methods to a two-degrees of freedom manipulator proves the correctness and reliability of the package and also constitute a starting base for other users .

REFERENCES

- [1] Wang, Yulun, " The 3DP Real-Time Motion Control Computer", Expert System and Robotics, NATO ASI Proceedings, 1991
- [2] G. Booch, Object-Oriented Design with Applications, Benjamin/Cummings, (1991)
- [3] P. Coad, E. Yourdon, Object-Oriented Design, Yourdon press, (1991)
- [4] D.E Whitney, "The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 94, 303, (1972)
- [5] M.H. Raibert, J.J. Craig, " Hybrid Position/Force Control of Manipulators", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 102, 126, (1981)
- [6] C.Y. Kuo, S.P.T. Wang, "Robust Position Control of Robotic Manipulator in Cartesian Coordinates", IEEE Trans. Robotics and Automation, RA-7, (5), 653, (1991)
- [7] H. Zontul, "Object-Oriented Robot Simulation", Middle East Technical University, ANKARA, M.S. thesis, January 1994

MOBILE ROBOT SELF-LOCALIZATION BY ESTABLISHING 2D ABSOLUTE ORIENTATION WITH ULTRASONIC SENSORS

Levent Yenilmez
H.Harp Okulu
Ogretim Baskanligi
Yesilyurt, Istanbul 34807,
Turkey

Aydin Ersak
Electrical and Electronics Engineering Department
Middle East Technical University
Ankara, 06531,
Turkey

ABSTRACT

This paper presents a method for the self localization of a mobile robot on its due course of motion in a predefined environment. The range data is obtained by ultrasonic range finders. The localization of the mobile robot in Cartesian domain is determined in terms of N many 2D observations exercise on the environment that involves K many objects whose positions are known to us. The algorithm developed in the study relies on the use of 2D absolute orientation technique which matches all N observations with those corresponding N coordinate vectors defined in the model. The matching process between the observation vectors and model coordinate vectors requires rotations and translations to be carried out. This is used for the correction of the robot position by the amount of these transformations, thus giving a means to the robot for self-localization. The implementation uses a mobile robot equipped with an ultrasonic ring consisting of sixteen static sonic transducers uniformly spaced around the ring.

1. INTRODUCTION

This study considers the problem of enabling a mobile robot to determine its actual position and orientation inside any working environment in a way that is independent of assumptions about previous movement. This procedure can be called as absolute localization. The self localization is established by the direct determination of the mobile robot orientation which is deduced from the estimated positions of the objects in the predefined environment. Measurements for the determination of the orientation are taken relative to stationary objects present in the working environment.

Due to the slipping of the wheels the mobile robot eventually loses tracking of its position which accumulates in due course of

its motion. Hence, there is a need of periodically, if not continuously, updating of the absolute position and orientation of the robot to ensure the safe and reliable navigation.

Previous attempts to solve this problem proposed that modifications to the environment, such as triangulation from infrared beacons were required.[3,4,5]. This is not, however, possible in majority of the applications. It is, therefore, desirable to solve the problem without modifying the environment. On the otherhand, the most of the mobile robot navigation schemes developed so far lack any provision for periodically localizing the robot such as [6].

In the approach presented in this paper assumes that the environment includes only static objects. Besides that a model of the environment is available beforehand so that a list of segments indicating the locations of objects and walls are known.

The mobile robot considered here is equipped with an on-board microcomputer and an ultrasonic ring which consists of an array of sixteen ultrasonic echo-ranging sensors to obtain a 360-degree sweep horizontally. Each sensor is composed of an electrostatic transmitter and receiver and a circuitry for determining the distance between the transceiver and any object within the detection range.

The localization of the mobile robot is determined from the data of N (equals 16 in the system) 2D observations, o_1, \dots, o_N of the environment which involves K objects whose positions are known to us. The study relying on the use of 2D absolute orientation technique matches all N observations, with those of the N corresponding coordinate vectors, m_1, \dots, m_N defined in the model. The matching process between the observation

vectors and the model coordinate vectors requires rotations and translations to be carried out. This is used for the correction of the robot position by the amount of these transformations, thus giving a means to the robot for self-localization. The transformations R and T (R for rotation, T for translation) required for matching are closely estimated by

$$[m_i] = [R][o_i] + [T] \quad i=1, \dots, N \quad (1)$$

Observations also suffer from errors, which are minimized in the study by using minimization techniques. R and T can be determined by minimizing the sum of the residual errors.

I. LOCALIZATION PROCESS

This paper introduces an approach to the object localization based on the exploitation of simple geometric constraints between sensed data and model based on the study [1,2]. This approach uses sonar segments which are straight segments extracted from the ultrasonic horizontal ring readings as the primary observed inputs, o_1, \dots, o_N to the algorithm. The localization process is considered to be a two-dimensional matching (including rotation) between ultrasonic readings and the objects outline. It is desired to determine the geometrical relationship between the robot and the environment. The position and orientation of the robot relative to the sonar readings are always known, so if the possible position and orientation is determined for the sonar readings relative to the objects outline, then it is possible to find the position and the orientation of the robot in the predefined environment .

The aim in the localization process is to find possible matches in the sonar readings and the objects outline. It proceeds in the following four steps:

A) Extracting straight line segments from the sonar readings: straight segments extracted from a sonar trace are called sonar segments. An example of some sonar segments is shown in Fig.2 for the environment shown in Fig.1. The matching process is based on the determination of the sonar segments as a first step. These sonar segments are usually the sectionized sonar images of objects.

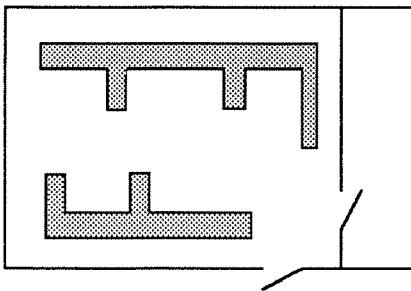


Fig.1 The top view of the laboratory environment with its obstacles.

B) Performing two-dimensional matching: A set of sonar segments are input to the algorithm and it in return produces a list of sonar segment and object pairings. Each sonar segment implies a particular robot position and orientation.

C) Admissible sonar segment test: The robot position and orientation implied by a sonar segment and object pairing may represent a geometrically feasible alignment of the sonar segments alone, but not of the entire sonar contour. In particular, each possible robot position and orientation found by the correlation algorithm must also pass the admissible sonar segment test. This test must not imply that any sonar ray penetrates a known solid object.

D) Maximum-sonar segment test: If multiple admissible sonar segment persist after all of the above steps, it is chosen as the one that places the greatest amount of the sonar contour in contact with the objects in minimum error.

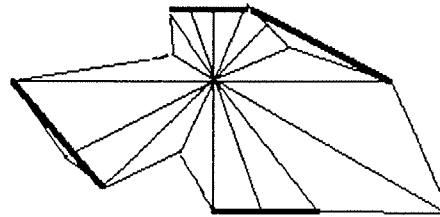


Fig.2 A sonar contour for the laboratory environment shown in Fig.1, and sonar straight segments extracted from it.

Fig.3 shows the result of the application of the localization algorithm into the case shown in Fig.2.

III. RANGING SYSTEM

A) The sensor: The sensor devices being used are Nippon Elec. ultrasonic range transducers. These sensors have a useful measuring range of 0.2-3.0 m. The main lobe of the sensitivity function is contained within an angle of 30° . Experimental results showed that the range accuracy of the sensors is in the order of ± 2 cm. A sensor interface circuitry designed to send and receive ultrasonic sound pulses catches always the first returning echo. The range data related to an object is considered to be on the conic axes even if it is located off the axes.

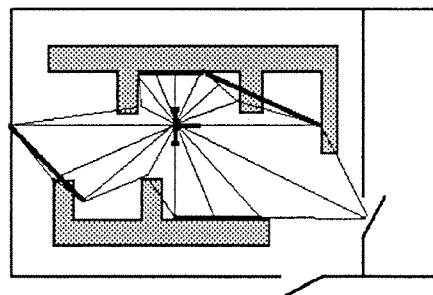


Fig.3 The resulting localization of the robot produced by the application of the algorithm.

B) The Horizontal Ultrasonic Sensor Array: The sensor array consists of 16 ultrasonic transducers, located around a ring placed 50 cm above the ground. They are spaced 22.5° apart. A 1800 processor selects and fires the sensors. It also measures the return time of the sonic pulse echos and converts the time value to a corresponding range value. Over a serial link, this information is transferred to a 486 DX 66 personal computer, which runs for higher level 2D localization and navigation functions.

C) The Robot: It has been conducted several experiments on the mobile robot furnished with the horizontal ultrasonic sensor array.

D) The Rangefinding Errors: An essential drawback of using ultrasonic sensors is the uncertainty in the information they carry. These may be briefed as;

- The detection sensitivity of the sensor varies with the angle of the reflecting echo path from the object to the main beam axis.

- Sonar beams can suffer from multiple reflections or specular reflections away from the sensor, giving false distance readings.

- Ultrasonic noise from external sources or stray reflections from neighboring sensors causes frequent misreadings. Misreadings cannot always be filtered out, and they cause the algorithm to falsely detected the sonar segments.

- Preprocessing the Sonar Data: Easily detectable incorrect readings are removed by preprocessing of the incoming data. So the data below the lower range threshold R_{mn} which is usually due to faulty sensors, or above the useful range R_{mx} of the device are rejected, as well as averaging multiple readings taken from the same sensor at the same robot position.

V. 2D ABSOLUTE ORIENTATION

A) The Method: In this part, a method for the self localization of a mobile robot on its due course of motion in a predefined environment is presented. Observations are obtained from sonic rangefinders. These 2D observations of the environment are denoted as o_1, \dots, o_N which involves K objects whose positions are known to us. The algorithm developed due to this method produces all admissible sonar segments and matches all observations of this segments, o_1, \dots, o_k with the corresponding coordinate vectors, m_1, \dots, m_k . Model vectors are extracted from the outline of the objects defined in the model due to the predefined robot position and orientation. The matching process between the observation vectors of the sonic segments and extracted model coordinate vectors requires rotation and translations to be carried out. This is used for the correction of the robot position by the amount of these transformations, thus giving a means to the robot for self-

localization. The transformations R and T (R for rotation, T for translation) required for matching are closely estimated by (1). Observations also suffer from errors, which are minimized in the study by using minimization techniques. R and T can be determined by minimizing the sum of the residual errors ϵ :

$$\epsilon^2 = \sum_{i=1}^N \left\| m_i - (R * o_i + T) \right\|^2 \quad (2)$$

which when expanded yields;

$$\epsilon^2 = \sum_{i=1}^N \left[(m_i - T)^T (m_i - T) - (m_i - T)^T * R * o_i - o_i^T * R^T * (m_i - T) + o_i^T * R^T * R * o_i \right] \quad (3)$$

Since R is a rotation matrix, it is orthonormal, that means $R^{-1} = R^T$. Also, since $(m_i - T)^T * R * o_i$ is a scalar, it is equal to its transpose. Hence

$$\epsilon^2 = \sum_{i=1}^N \left[(m_i - T)^T (m_i - T) - 2 * (m_i - T)^T * R * o_i + o_i^T * o_i \right] \quad (4)$$

Differentiating ϵ^2 with respect to the components of the translation T and setting the partial derivative to 0, we obtain

$$0 = \sum_{i=1}^N \left[-2 * (m_i - T) + 2 * R * o_i \right]$$

Letting

$$[\bar{o}] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [o_i]$$

and

$$[\bar{m}] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [m_i],$$

(1) turns out to be

$$[\bar{m}] = [R][\bar{o}] + [T]. \quad (5)$$

Substituting $\bar{m} - R * \bar{o}$ for T in (2) the residual error comes out as:)

$$\epsilon^2 = \sum_{i=1}^N \left\{ [m_i - (\bar{m} - R * \bar{o})]^T * [m_i - (\bar{m} - R * \bar{o})] - 2 * [m_i - (\bar{m} - R * \bar{o})]^T * R * o_i + o_i^T * o_i \right\}$$

$$\sum_{i=1}^N \begin{bmatrix} (m_i - \bar{m})^T * (m_i - \bar{m}) - 2 * (m_i - \bar{m})^T * R * (o_i - \bar{o}) + \\ (o_i - \bar{o})^T * (o_i - \bar{o}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

The counterclockwise rotation angle θ is related to the rotation matrix R by;

$$R = \begin{bmatrix} \text{Cos}\theta & -\text{Sin}\theta \\ \text{Sin}\theta & \text{Cos}\theta \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Considering o_i , m_i , \bar{o} and \bar{m} which are expressed explicitly as;

$$o_i = \begin{bmatrix} o_{xi} \\ o_{yi} \end{bmatrix}, \quad m_i = \begin{bmatrix} m_{xi} \\ m_{yi} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\bar{o} = \begin{bmatrix} \bar{o}_x \\ \bar{o}_y \end{bmatrix}, \quad \bar{m} = \begin{bmatrix} \bar{m}_x \\ \bar{m}_y \end{bmatrix}, \quad (9)$$

Then the second term in (6) can be rewritten as;

$$\begin{aligned} (m_i - \bar{m})^T * R * (o_i - \bar{o}) &= (m_{xi} - \bar{m}_x) * \text{Cos}\theta * (o_{xi} - \bar{o}_x) + \\ & (m_{xi} - \bar{m}_x) * (-\text{Sin}\theta) * (o_{yi} - \bar{o}_y) + \\ & (m_{yi} - \bar{m}_y) * \text{Sin}\theta * (o_{xi} - \bar{o}_x) + \\ & (m_{yi} - \bar{m}_y) * \text{Cos}\theta * (o_{yi} - \bar{o}_y) \end{aligned}$$

Setting the derivative of ϵ^2 with respect to θ to zero in (6) yields (10). Let on the other hand,

$$0 = -2 * \sum_{i=1}^N \begin{bmatrix} (m_{xi} - \bar{m}_x) * (-\text{Sin}\theta) * (o_{xi} - \bar{o}_x) + \\ (m_{xi} - \bar{m}_x) * (-\text{Cos}\theta) * (o_{yi} - \bar{o}_y) + \\ (m_{yi} - \bar{m}_y) * \text{Cos}\theta * (o_{xi} - \bar{o}_x) + \\ (m_{yi} - \bar{m}_y) * (-\text{Sin}\theta) * (o_{yi} - \bar{o}_y) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$A = \sum_{i=1}^N [(m_{xi} - \bar{m}_x) * (o_{xi} - \bar{o}_x) + (m_{yi} - \bar{m}_y) * (o_{yi} - \bar{o}_y)] \quad (11)$$

$$B = \sum_{i=1}^N [(m_{xi} - \bar{m}_x) * (o_{yi} - \bar{o}_y) - (m_{yi} - \bar{m}_y) * (o_{xi} - \bar{o}_x)] \quad (12)$$

Then (10) can be written in a compact-form as;

$$0 = A \text{Sin}\theta + B \text{Cos}\theta \quad (13)$$

where

$$\text{Cos}\theta = -A / \sqrt{A^2 + B^2} \quad \text{and} \quad \text{Sin}\theta = B / \sqrt{A^2 + B^2} \quad (14)$$

or

$$\text{Cos}\theta = A / \sqrt{A^2 + B^2} \quad \text{and} \quad \text{Sin}\theta = -B / \sqrt{A^2 + B^2} \quad (15)$$

The correct value for θ will, in general, be unique and will be the one that minimizes ϵ^2 . Thus the better of the two choices can always be easily determined by simply substituting each value of θ into the original expression for ϵ^2 , [2]

The actual position of the robot can be found by using crossing lines as explained in IV-C.

B) Model Of Ultrasonics : The sensors of the horizontal ring are to sense a line segment on the obstacle nearby which must have a minimum two observed points o_1, \dots, o_k . Note that these points will be obtained with respect to robot's own position. Due to this robot position estimated points on the obstacle nearby are obtained as m_1, \dots, m_k in the model of the environment defined in the world coordinates. Observations o_1, \dots, o_k of the scanned line segment should be different than corresponding points m_1, \dots, m_k in the model if the robot is out of its course during navigation. If there is an error in its location then using (9)-(15), \bar{o} , \bar{m} , A , B , θ are calculated to find out the actual orientation of the robot resulting from the rotation matrix R .

C) Example : With reference to Fig. 4, the robot at the point $P(c-1)$ is to be sent to the point $P'(c)$. The position and orientation of the mobile robot during the navigation at step 'c' is denoted by the point vector $P'(c) = [x'(c), y'(c), \theta'(c)]^T$ which is expressed in Cartesian coordinates, and a heading defined with respect to a global coordinate frame. The robot is supposed to be at the point $P'(c)$ but we know that it will lose its position and orientation due to the slipping at the wheels. Therefore, the actual robot position and orientation which are denoted by the point vector $P(c) = [x(c), y(c), \theta(c)]^T$, must be found to prevent cumulative localization errors. One of the edges of the obstacle-1 and obstacle-2 can be displayed with reference to a prior location estimate with model vectors m_{11}, m_{12}, m_{13} and

m_{21}, m_{22}, m_{23} respectively. However, the data obtained in the panoramic scan of the environment using ultrasonic horizontal ring at the actual point $P(c)$ give the coordinates as the observations o_{11}, o_{12}, o_{13} and o_{21}, o_{22}, o_{23} for obstacle-1 and obstacle-2, respectively. Note that \bar{m} model vectors are defined in the world coordinates. Although, \bar{o} observation vectors are obtained with respect to the robot's own position.

The first step in the process is to use 2D absolute orientation method in order to match \bar{m} and \bar{o} vectors which give us the actual robot orientation $\theta(c)$. The second step is to seek for the actual robot position coordinates $x(c)$ and $y(c)$. In the algorithm, minimum ultrasonic edge observations of each obstacle are used as normal (shortest) distances of robot to the related obstacles. In Fig.4, these distances are named as d_1 and d_2 for obstacle-1 and obstacle-2, respectively. After that, two line crossings at the robot position are represented as L_1 and L_2 which are parallel to the observed edges of the obstacles. Using some simple trigonometric calculations, this crossing point can be presented as robot's position coordinates $x(c)$ and $y(c)$.

The system has a 2D global representation of the environments consisting of a list of line segments of the static obstacles. Figure 4 illustrates that it is sufficient to use one captured edge to obtain the actual robot orientation. From the figure the predicted model vectors and the observation vectors generated using ultrasounds for obstacle-1 are given as

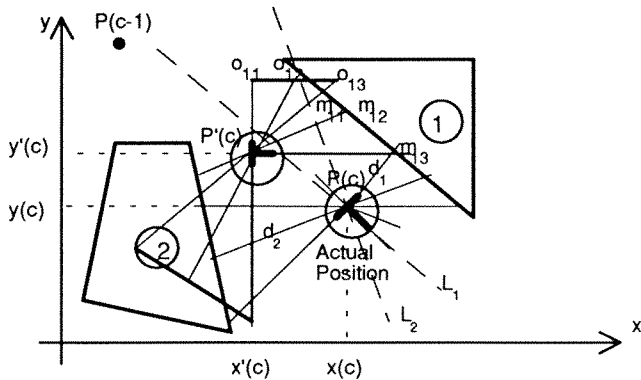


Fig.4. Ultrasonic scan displayed with reference to the a priori location estimate at $P'(c)$.

$$m_{11} = \begin{bmatrix} 35 \\ 33 \end{bmatrix}, m_{12} = \begin{bmatrix} 39 \\ 30 \end{bmatrix}, m_{13} = \begin{bmatrix} 45 \\ 25 \end{bmatrix}$$

$$o_{11} = \begin{bmatrix} 0 \\ 9 \end{bmatrix}, o_{12} = \begin{bmatrix} 5 \\ 9 \end{bmatrix}, o_{13} = \begin{bmatrix} 11 \\ 9 \end{bmatrix}.$$

respectively. Using (9)-(15), \bar{o} , \bar{m} , A, B and θ are found as;

$$\bar{m} = \begin{bmatrix} 39.7 \\ 29.3 \end{bmatrix}, \bar{o} = \begin{bmatrix} 5.3 \\ 9.0 \end{bmatrix}, A=55.33, B=44.33, \theta = -39^\circ.$$

The results presented here are taken from the an experiment where the vehicle's estimated orientation is about 0° . However, measurements showed that the actual orientation is approximately -39° . In the second step, the sonar range readings generated to the nearest obstacles 1 and 2 are obtained as $d_1 = 10$ and $d_2 = 19$, respectively to determine the actual position of the robot. First of all, the line equations of the captured edges should be calculated to provide a prediction of the parallel lines (L_1 and L_2) crossing at the actual robot position $P(c)$. The coordinates of acquired edges for obstacle-1 and obstacle-2 are given as

$$obs_{11} = \begin{bmatrix} 54 \\ 17 \end{bmatrix}, obs_{12} = \begin{bmatrix} 29 \\ 37 \end{bmatrix}$$

$$obs_{21} = \begin{bmatrix} 15 \\ 29 \end{bmatrix}, obs_{22} = \begin{bmatrix} 22 \\ 2 \end{bmatrix},$$

respectively. Using the trigonometric functions with the above data, the line equations for L_1 and L_2 are found as;

$$y_{L1} = (-0.8) \cdot x_{L1} + 47.39$$

and

$$y_{L2} = (-3.86) \cdot x_{L2} + 159.54,$$

respectively. The crossing point of these two equations are calculated easily to provide the actual robot position that is found as

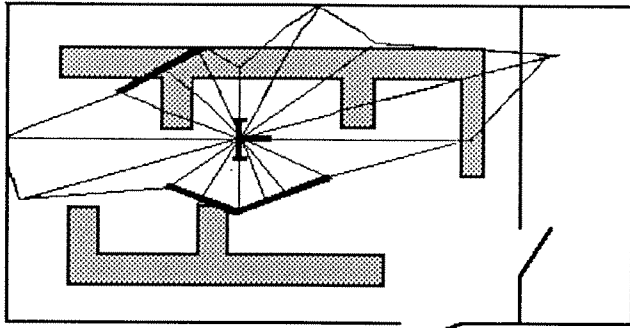
$$T_R = \begin{bmatrix} x(c) \\ y(c) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 36.65 \\ 18.07 \end{bmatrix}.$$

V. EXPERIMENTAL RESULTS

The algorithm described in this paper has been run on real sonar data. The following part describes some of the results from the experiments carried out.

A. The Experimental Set-Up

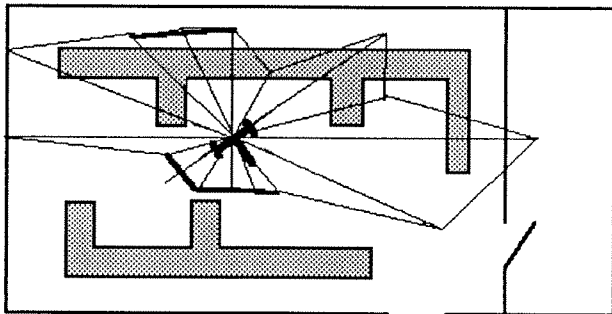
Fig.5 shows the original scan of the known environment shown in Fig.1 with reference to a prior location estimate. The edges of the objects taking place within the room are determined by the ultrasonic range readings. The edges in the captured image do not fit with those on the real object indicating a localization error.



	$x(c)$	$y(c)$	$\theta(c)$
$P'(c)$	38	30	0°

Fig.5 Original scan displayed with reference to the a prior location estimate

Fig.6 shows the same scene for a new orientation of the robot in order to demonstrate the use of 2-D absolute orientation method. The extracted edges are parallel to the captured edge of the objects within the scene, but they still do not fit to those of the object's own. The orientation of the robot is, therefore, corrected accordingly. Note that even in that case there is



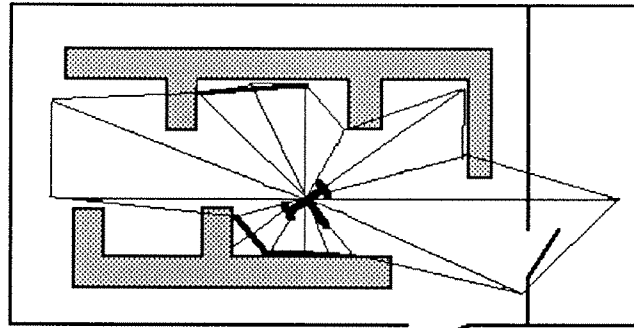
	$x(c)$	$y(c)$	$\theta(c)$
$P'(c)$	38	30	0°
$P(c)$	-	-	-45°

Fig.6 Original scan displayed with reference to the updated orientation

positional error in robot's location. The use of the information obtained from the parallel crossing lines of the captured edges in the image the actual position of the robot can be found and the localization errors can thus be minimized as shown in Fig.7.

VI. CONCLUSIONS

The localization system developed in the study using 2D absolute orientation method and the crossing line method based on a variety of sonic range observations gives satisfactory location estimates for the vehicle position. The application of the method has been made for indoor case where a predefined environment can be easily structured, but the outdoor application needs some further study on the problem.



	$x(c)$	$y(c)$	$\theta(c)$
$P'(c)$	38	30	0°
$P(c)$	47	22	-45°

Fig.7 Result of applying the crossing line method to update the actual position.

There is a limitation in the application of the method. In determining the orientation of the robot capturing one edge of the object may be sufficient, but determination of the robot's actual position needs at least two edges of the object be captured at a time. The latter condition may not be applicable to every part of the environment to observe two edges at a time.

REFERENCES

- [1] M. Drumheller, "Mobile Robot Localization Using Sonar," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol. PAMI-9, pp.325-332, March 1987.
- [2] W. E. L. Grimson and T. Lozano-Perez, "Recognition and Localization of Overlapping Parts From Sparse Data in Two and Three Dimensions," in Proc. 1985 Int. Conf. Robotics and Automation, St. Louis, MO, March, 1985, pp.61-66.
- [3] J. J. Leonard and H. F. Durrant-Whyte, "Mobile Robot Localization by Tracking Geometric Beacons," IEEE Trans. Robotics Automat., Vol. 7, no.3, pp. 376-382, June, 1991.
- [4] H. F. Durrant-Whyte, "Integration, Coordination and Control of Multi-sensor Robot Systems", New York: Kluwer 1987.
- [5] ____, "Uncertain geometry in robotics," IEEE J. Robotics Automat., Vol. RA-4, no.1, pp.23-31, Feb. 1988.
- [6] H. P. Moravec, "Robot Rover Visual Navigation". Ann Arbor, MI UMI Research Press, 1981.

DYNAMIC COGNITIVE FORCE CONTROL FOR AN AUTOMATIC LAND EXCAVATION ROBOT

M. Bodur¹, H. Zontul², A. Ersak³, A.J. Koivo⁴,
H. Ö. Yurtseven⁵, E. Kocaoglan⁶, G. Paşamehmetoğlu⁷

(1,2,3,6) Middle East Technical University (METU),
Electrical and Electronics Eng. Dept., 06531 Ankara Turkey
(4) School of Electrical Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN 47907
(5) IUPUI, Indianapolis, IN46202-5132
(7) METU Mining Eng. Dept., 06531 Ankara Turkey

Abstract — The automation of the land excavation machines can find applications in the excavation of soil in both terrestrial and planetary mining and construction. The automation requires planning at different levels such as task and trajectory pre-planning, and the automatic execution of these pre-planned tasks. In the execution of the pre-planned digging trajectories, the unexpected soil properties along the trajectory rises problems such as excessive ram-forces that may harm the machine, or cannot be applied because of the power limitations.

The cognitive force control for the automation of the land excavation is developed to include the dynamics of the excavator arm. The control of the ram forces of the arm is proposed by regulating the digging depth and the trajectory speed.

The developed control system is able to track the pre-planned digging trajectories, and if the ram-forces becomes excessive then the trajectory is modified in time and path to control the ram-forces.

INTRODUCTION

The excavation of soil for mining and construction purposes are high volume repetitive operations. The automatic tracking of the digging trajectory is an important step of this automation. A backhoe excavator is made of three main units: (i) a mounting or travel unit which may be a crawler with heavy-duty chassis, or a heavy framed rubber-tired chassis; (ii) a revolving unit or *superstructure* which carries engine, transmission, and operating machinery; (iii) an *arm* which includes a bucket at its end. An important distinguishing feature of a backhoe is its working space that suits for digging below its own base level. Backhoes for heavy loads are always equipped by hydraulic actuators. The arm of a backhoe consists of three strong structural members; a *boom*, a *stick*, and a *bucket* as seen in Figure 1.

The automation of these machines are needed to reduce the uncomfortable operating conditions in mining and construction, as well as planetary excavation requirements [1]. The automation of the excavators require both position and force control along the trajectory of the bucket [2]. A pre-planned excavation requires the representation of the physical shape and properties of the excavation location, and generation of the bucket trajectories to dig and remove the soil [3]. The movement of the bucket against the soil is one of the most critical action in controlling the backhoe, because of the unpredicted soil properties and unexpected soil slides.

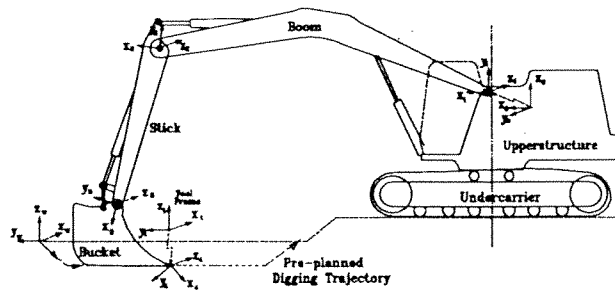


Figure 1: Moving items of typical backhoe excavator, and assignment of their coordinate frames

The generation of the excavation trajectories for a pre-planned pile loading without considering the dynamics of the arm has been presented by Hemami [4]. The unpredicted resistance of the soil against the bucket movement, and the unexpected amount of soil filled into the bucket may require some modification in the trajectory and in the orientation of the bucket. Neglecting the dynamic forces of the mechanism the transformation of the force control to the modification of the bucket trajectory has been proposed by Bullock [2]. In the following sections, the dynamics of a backhoe excavator is modeled, and the model is used in a rule based cognitive force control through trajectory modification. The dynamic control of bucket position against an unpredicted soil resistance is simulated, and the control of the digging forces through the bucket trajectory by modifying the pre-planned trajectory of the bucket is tested on a typical digging trajectory.

KINEMATICS AND DYNAMICS OF BACKHOE

During digging at a certain point on the excavation trajectory, both the crawler and the rotational super-structure bodies are stationary, and thus the kinematic and dynamic model is reduced to 3 degree of freedom. Kinematic solution of the arm is accomplished in the form of homogeneous transformation matrix by using Denavit-Hartenberg (D-H) notation [6]. The assignment of the joint displacement variables and the coordinate frames are as shown in Figure 1 and (D-H) parameters are as shown in Table 1. The forward kinematic transformation $T = A_1 A_2 A_3$ which is obtained using the homogeneous transformation matrices A_i , $i = 1, 2, 3$ of the boom, stick and bucket, respectively. It converts the coordinates in the bucket frame into the fixed superstructure frame.

Using the Lagrange-Euler formulation, the dynamics

TABLE 1: Kinematics parameters of the arm mechanism for the Backhoe Excavator in D-H notation

Link	θ	α	a	d
crawler	0	90°	q_c	0
superstructure	q_0	0	a_0	0
arm boom	q_1	0	a_1	0
arm stick	q_2	0	a_2	0
bucket	q_3	0	a_3	0

of the last three links is obtained as

$$\tau = \mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \tau_d \quad (1)$$

where $\tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$ is the vector of joint torques applied to the boom, stick and bucket by the hydraulic actuators; $\tau_d = [\tau_{d,1}, \tau_{d,2}, \tau_{d,3}]^T$ is the loading torque vector due to digging, $\mathbf{D}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$, $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbf{R}^3$ and $\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^3$ are coefficient matrices and vectors of the arm dynamics in Lagrange-Euler form. The dynamic model (1) contains inertial, coriolis and gravitational terms of the arm. The loading forces on the bucket during the digging trajectory is included to the dynamics through the Jacobian, \mathbf{J} by

$$\tau_d = \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{f}_b \quad (2)$$

where \mathbf{f}_b is the digging force vector on the bucket with force entries for x_o , z_o , and torque around y_o (rotation in q_3) directions of the superstructure. \mathbf{J} is the Jacobian of the arm to transform the generalized bucket forces to the joint torques.

DIGGING TRAJECTORY

The trajectory for digging action plays an important role on the determination of both the digging forces and the loading of soil into bucket. In the simulations, the soil surface is assumed to be smooth. The digging trajectory is composed of three parts, as seen in Figure 2. In the first part, a rotation about the bucket joint determines the depth of penetration of the bucket into the soil. At the end of this circular path the bucket blade reaches at the prespecified desired digging depth, and the bucket is oriented to dig the soil horizontally. In the second part, the bucket moves along a horizontal line at the desired digging depth. At the last part of the desired path, the bucket is rotated about the joint axis so as to weigh the bucket full of soil.

The bucket position in the free-space can be controlled as if it is an open-chain mechanism going through pure gross-motion control. At the contact instant to the soil, the soil exerts a force constraint on the motion of the excavator. The developed forces are expected to increase with the depth of penetration of the bucket. The forces can be approximated as a function of penetration, digging depth and bucket orientation. But in moving along a pre-planned trajectory, variations in soil properties, and unexpected obstacles met on the path may result in exerting excessive ram-forces. In such cases, a modification of the pre-planned trajectory is a solution to reduce the resulting joint torques and the ram-forces. The cognitive force control technique is used to modify the pre-planned trajectory whenever the ram-forces rise to unexpected high values.

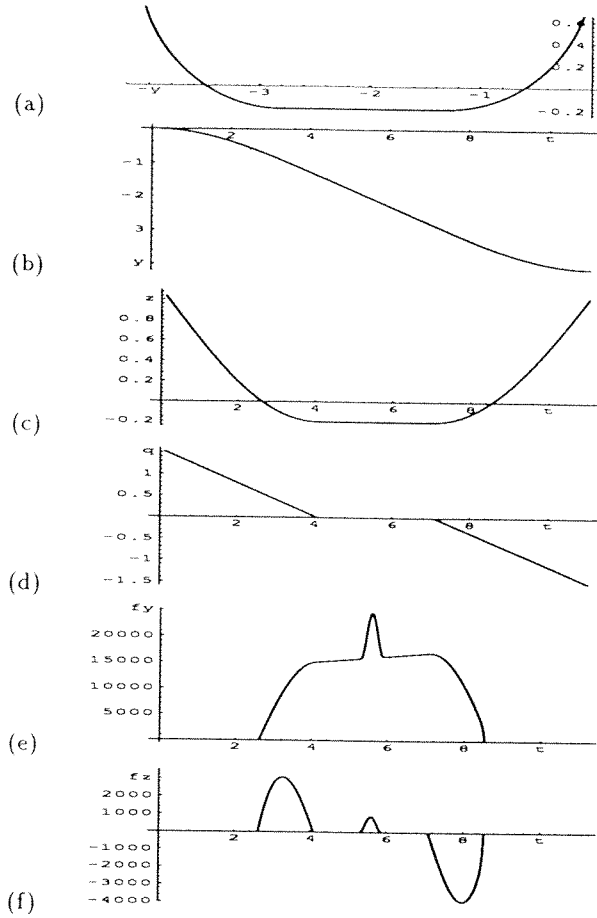


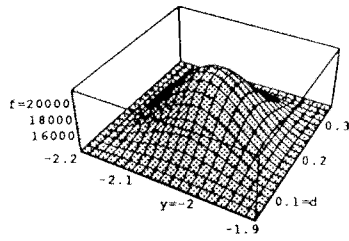
Figure 2: Desired digging path and expected ram forces without cognitive control. (a) path in $z-y$ plane; (b) y vs. time; (c) z vs. time; (d) bucket rotation q_3 (rad.) vs. time (e) f_y vs. time; (f) f_z vs. time.

DIGGING FORCES

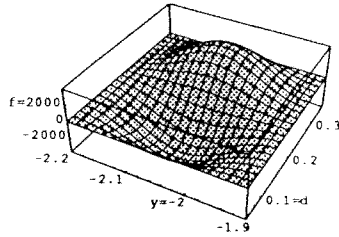
The ram-forces in digging along the path is computed according to Vähä's study [5]. The penetration of the bucket and scooping of the bucketful of soil demand varying energy depending on the type of the soil, area of the cutting edge of the bucket blades and the thickness of the cut. During the digging of the soil, there are three tangential resistance forces; the cutting resistance, the frictional resistance, and the resistance to the moving prism of the soil in (and front of) the bucket. The magnitude of the ram-force vector is given as [5];

$$f = 1.005(k_s hb + \mu N + \epsilon(1 + \frac{V_s}{V_b})V_d) \quad (3)$$

where $k_p = 1.005$ is a scale constant; V_s is the volume of the prism of the soil, (m^3); V_d is amount of the soil in the bucket, (m^3); k_s is specific resistance to cutting, (N/m^2); b and h are width and thickness of the cut slice of the soil, (m); μ is the coefficient of friction between the bucket and the ground; N is downward pressure force of the bucket against the soil, (N); and ϵ is coefficient of the resistance to filling of the bucket and movement of the



(a)



(b)

Figure 3: Digging forces for a 20 cm diameter spherical obstacle centered at $y = -2.05$ and depth d as parameter. (a) force in y direction, f_y (b) force in z direction, f_z .

prism of soil, (N/m^3). The volume of the soil prism V_s is taken as $(1 + \sin \alpha)bh^2$. The pressure force N is taken directly proportional to digging depth h and cutting velocity of the bucket blade over a proportionality constant n_c . The force vector is opposite in direction with the velocity of the ram.

When the bucket ram is in contact with an obstacle which has a comparable or larger area than the cutting edge area, ram-forces are expected to increase because of: (i) the increase in the area of the cutting edge of the bucket blade, and (ii) the increase of V_s . In modeling the force exerted by the obstacle, the increase of V_s and the cutting edge area are considered as a function of the position and size of the obstacle in the bucket coordinate frame. The parametric 3-d plot of the ram-forces for a spherical obstacle of 20 cm diameter effective size at $y = -2.05$ m is shown in Figure 3, where $-y$ is the digging direction, f_y and f_z are the ram-forces, and d is the position of the center of the obstacle. The forces in these plots are obtained for a bucket width of $b = 1.15$ m, soil density 4000 kg/m^3 , pressure force coefficient is $n_c = 50\ 000$ specific resistance $k_s = 50000$, soil slice friction $\mu = 0.5$, and resistance against the soil slice $\epsilon = 0.1k_s$. These parameters are also used in the simulations of the cognitive force control.

COGNITIVE FORCE CONTROL

The mechanical strength of the bucket blades, and the power limitations of the actuators impose certain bounds for the application of the ram-forces. The pre-planned digging trajectories should obviously consider the force limits of the mechanism. In case of the digging forces exceed the limit values, the digging depth should be decreased by changing the bucket trajectory. In this way, the problem of controlling the ram-forces are turns out to be the problem of the modification of the bucket trajectory. In this study, ram-forces are assumed as measured either directly, or computed from the hydraulic cylinder pressures. The dynamics of the heavy mechanical structure of the

Table 2: Kinematic parameters of hypothetical backhoe in the simulation

Link	length a_i	Center of Gravity	weight	Inertial Moment $kg \ m^2$
superstr.	0.5	0.6	6400	11750
boom	5.2	2.7	1600	14250
stick	2.6	0.6	740	730
bucket	1.3	0.6	430	230

All units in MKS

excavators cannot be neglected in the development of the ram-forces, and therefore both the speed and the path of the desired trajectory is modified according to a rule based cognitive control, so that the ram-forces remain within the allowable ram-force range.

The rule based cognitive control algorithm has been developed in the study by on-site observations of the experienced backhoe operators. Operator senses the excessive ram forces by (i) the jerk of the backhoe superstructure, (ii) reading the hydraulic pressure indicator of the stick actuator, or (iii) observing the elastic deformation of the hydraulic tubes due to the excess pressure. The operator stops the horizontal motion of the bucket, and gives a rotation of about 15° to the bucket. This rotation compensates the torque strain developed at the bucket joint, causing to both downward and backward motion due to the dynamics of the manipulator. The bucket is then raised a few centimeters, and the forces are checked again while the bucket moves forward with a 15° slope. The obstacle is avoided after a few trials, by moving the bucket each time a few cm up whenever the ram-forces are excessive. After avoiding the obstacle and reaching the desired digging depth the bucket orientation is corrected while the digging is still continuing in horizontal direction. In the simulation, this operation is accomplished in four steps. In the first step, the bucket move along the nominal desired path as long as the ram-forces are in nominal limits. Whenever the ram-force f exceeds a limit f_M , step two operation starts. The bucket is then rotated to 15° down, and the desired path is oriented upward to lift the bucket. This step ends after the desired path is shifted by 1 cm up relative to the point where f is higher than f_M . The third step is moving the bucket forward with a 15° downwards slope, until either the ram-force becomes excessive again, or the digging path reaches to pre-defined desired path. If the ram-force becomes excessive, the operation is switched back to the second step; and if the digging path reaches to pre-defined desired path, the fourth step is initiated. In the fourth step, the orientation of the bucket is corrected and returned back to step one again.

SIMULATION RESULTS

The dynamic model of a hypothetical backhoe excavator is simulated here to obtain an experimental environment for cognitive force control. The backhoe is assumed to have parameters as given in Table 2.

The simulation is carried out for the desired trajectory described in Figure 2. In the simulation, the digging forces and unexpected soil resistances are implemented as given in Figures 2 and 3. The PID controller parameter settings in the simulations are given in Table 3. $f_M = 17000 \text{ N}$ is

Table 3: PID settings of the boom, stick and bucket joints

PID Parameter	Joint 1	Joint 2	Joint 3
Proportional Gain K_c	$35 \cdot 10^6$	$1.5 \cdot 10^6$	$0.75 \cdot 10^6$
Integral Time Const. T_I	1	1	2
Derivative Time Const. T_D	0.1	0.1	0.02

chosen to keep the ram-forces below 20000 N. An obstacle, of 0.20 m effective diameter is centered at $y = -2.05$ m and $z = -0.21$ m. The modification of the path and the resulting forces of the simulations are given in Figure 4. The effect of the bucket rotation at the first execution of the second phase begins at $y = -1.94$ m when the digging force exceeds $f_M = 17000$ N. The ram-forces during the rotation reaches to 23000 N because of the dynamic behavior of the bucket. After the bucket is rotated 15° down, the ram-forces in z -direction increases because z -component of the motion is nonzero. After the rotation, the magnitude of the force vector f remains bounded by 19000 N.

CONCLUSION

The satisfactory automation of land excavation depends on using a successful method to keep the ram-forces in nominal limits. The cognitive force control prevents excessive ram-forces by converting the control of the ram-forces into the modification of the digging trajectory.

The researches on the automation of the land excavation is expected to find applications in lunar and planetary excavation, as well as in terrestrial and underground excavation to reduce the hazardous and uncomfortable mining and construction conditions.

Including the dynamic model into the cognitive force control simulations gives a means to modify the digging trajectory in time as well as in digging depth. The simulation results indicates that the dynamic behavior may results unexpected ram-forces in manipulating the orientation of the bucket. The dynamic cognitive force control of the digging forces and the forces against the unexpected obstacles should be modified based on the experimental measurements related to the soil dynamics specific to the applications. The presented method bounds the ram-forces satisfactorily to a pre-determined allowable limit.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors acknowledge the support given by NATO Collaborative Research Grand.

REFERENCES

- [1] E. B. Leonhard, "Experimental studies on mechanics of lunar excavation", *Journal of Aerospace Engineering*, Vol.4, No.1, Jan. 1991
- [2] D. M. Bullock, S. M. Apte, I. J. Oppenheim, "Force and geometry constraints in robot excavation", *Proc.*

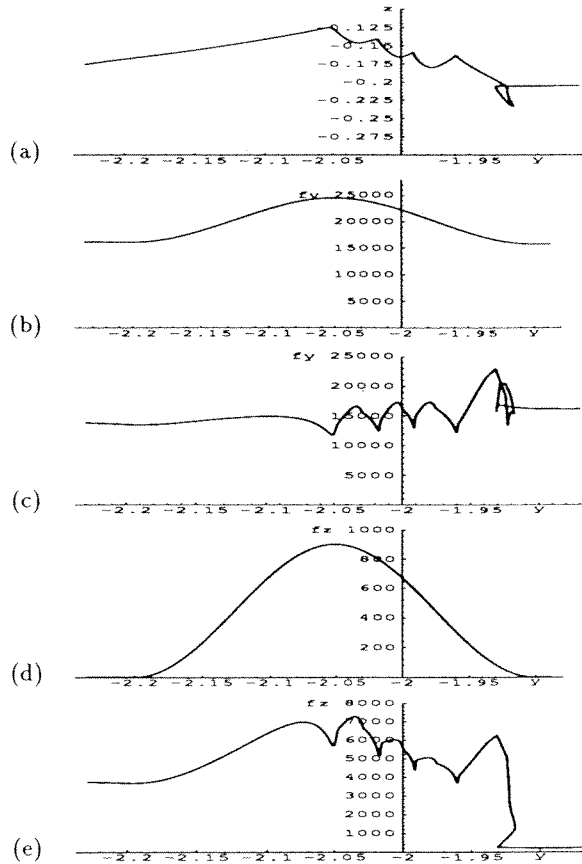


Figure 4: Comparison of digging path and resulted ram-forces when the rule base cognitive control is applied. (a) cognitive path in $z - y$ plane (desired path is constant at $z = -0.2$ m); (b) non-cognitive force f_y vs. y position; (c) cognitive force f_y vs. y position; (d) non-cognitive force f_z vs. y position; (e) cognitive force f_z vs. y position.

of Space 90, Engineering Construction and Operations in Space II, Albuquerque, N.M., p.p. 960-969, 1990

- [3] S. Singh, R. Simmons, "Task Planning for Robotic Excavation", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Raleigh, NC, 1992
- [4] A. Hemami, "Modelling, analysis and preliminary studies for automatic scooping/loading in a mechanical loader". *International Journal of Surface Mining and Reclamation* Vol. 6 p.p. 151-159, 1992
- [5] Vähä, P. K., "Modelling and Control of Cognitive Excavation". Technical Report, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN.
- [6] Uicker, J. J., Denavit J., Hartenberg R. S., "An Iterative Method for the Displacement Analysis of Spatial Mechanisms." *Journal of Applied Mechanics*, Vol 26, pp309-314, June 1964

BİBLİYOGRAFİK BİLGİ FORMU			
1 - Proje No :	MODISA - 2	2 - Rapor Tarihi :	1.12.1993
3 - Projenin Başlangıç Tarihi :	1.8.1992	Bitiş Tarihi :	31.7.1993
4 - Projenin Adı :	Bilinmeyen Değişken Ortamda Modelleyerek İrdeleme ve Öğrenme Yöntemleriyle Nesnelerin Değişik Algılayıcılardan Bilgi Füzyonu Elde Edilerek Özelliklerinin Tanımlanması		
5 - Proje Yürütücüsü :	Prof.Dr.Aydın ERSAK		
Yardımcı Araştırmacılar :	Y.Doç.Dr.M.Mete BULUT Araş.Gör. Haluk Zontul Araş.Gör. A.Serdar YÜCEL		
6 - Projenin Yürütüldüğü Kuruluş :	Robotik Laboratuvarı (ROLAB), Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi		
Adresi :	İnönü Bulvarı, Balgat, Ankara 06530		
7 - Destekleyen Kuruluşların Adı :	- TÜBİTAK, - ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü		
8 - Öz :	<p>Rapor "Bilinmeyen Değişken Ortamda Modelleyerek İrdeleme ve Öğrenme Yöntemleriyle Nesnelerin Değişik Algılayıcılardan Bilgi Füzyonu Elde Edilerek Özelliklerinin Tanımlanması" konusunda yapılan çalışmaları özetlemektedir. Birden çok algılayıcıdan edinilen bilgilerdeki duyaçlardan ileri gelen belirsizlikler ve gürültü önce en aza indirgenmektedir. Burada önışlem algoritmaları kullanılmaktadır. Duyaç bilgisindeki belirsizlik ve eksiklikler diğer duyaçlardan elde olunanlarla tamamlanmakta sonuçtaki görüntünün taşıdığı bilginin tama yakın olması sağlanmaktadır. Bundan sonra görüntü üzerinde nesne tanıma algoritmaları uygulanmaktadır. Nesne tanıma, kenar çizgisi belirlenmiş nesne örüntüleri üzerine inşa edilmiştir. Nesnenin kenar çizgisi, bu çizginin boyu, örüntünün ağırlık merkezi, ve birinci ve ikinci momentlerin bellekteki modelde tanımlananlarla karşılaştırılmasıyla tanıma işlemi tamamlanmaktadır. Sistemin bu yöntemle öğrenebilir bir yapısı vardır.</p> <p>Gerçekleştirilen donanımsal yapıda ultrasonik duyaç dizisi bir robot kol bileğine bağlanmıştır. Taranarak alınacak görüntü kolun bir tür süpürme hareketi sonucunda alınmaktadır. Kol bu işlemi takiben üzerinde işlem görülecek nesnelere tanıyıp, yerlerini ve duruş biçim ve yönlerini belirledikten sonra gerekli manevralara başlayabilecektir. Bu bölüm çalışmalar kolun yörünge planlamasının yapılmasına ilişkin çalışmaların konusudur.</p>		
Abstract:	<p>The report summarizes the approach and findings in a study on "Model Based Recognition and Learning of the Characteristics of Objects by Sensory Fusion in an Unknown Environment". As a first step ambiguities on the collected information due to the ultrasonic device uncertainties and the noise is reduced by preprocessing of the image. Information obtained from multiple sensors when fused reduces the inherited device uncertainty and noise in the final image so that information lacking in the image may be compensated by that supplied from another sensor. Following this phase algorithms related to object recognition are applied on the preprocessed image.</p> <p>The object recognition is based on the pattern of outer boundary of the object whose inner surface area taken out. The outer boundary, the path length of the boundary, center of gravity of the object, and the first and the second moments of the object are compared to match with those of the model in recognition of the object. Any object characteristics not matching with those of the model is identified as a new object which is to be added into the library. The system with this feature is considered to be a system having the ability of learning.</p> <p>In the hardware structure, an array of eight pairs of ultrasonic transducers are placed on the wrist of a robot arm for scanning the scene involving the objects to be recognized. The robot arm recognizes the objects, determines their positions and the orientations of the objects and</p>		

then plans its trajectory, preshapes and plans its fine motion for grasping in accordance with this data.

Anahtar Kelimeler: Nesne Tanıma, Tümlşik Algılama

- 9 - Proje ile ilgili yayımlar :
1. H.Kırağı, A.Ersak; "Object Recognition and Localization with Ultrasonic Scanning", Proceedings of IEEE Melecon'94, Vol.3, 1185-1188, Antalya, Türkiye, 12-14 Nisan 1994
 2. H.Zontul, A.Ersak; "Object-Oriented Representation of a Robot Manipulator", Proceedings of IEEE Melecon'94, Vol.1, 363-366, Antalya, Türkiye, 12-14 Nisan 1994
 3. L.Yenilmez, A.Ersak; "Mobile Robot Self-Localization by Establishing 2D Absolute Orientation with Ultrasonic Sensors", Proceedings of ESDA Second Biennial European Joint Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Londra, İngiltere, 4-7 Temmuz 1994
 4. M.Bodur, H.Zontul, A.Ersak, A.J.Koivo, H.Ö.Yurtseven, E.Kocaoğlan, G.Paşamehmetoğlu; "Dynamic Cognitive Force Control for an Automatic Land Excavation Robot", Proceedings of IEEE Melecon'94, Vol.2, 703-706, Antalya, Türkiye, 12-14 Nisan 1994

10 - Bilim Dalı : Robot Bilim
Doçentlik B.Dalı Kodu: 609.02.08 ISIC Kodu :
Uzmanlık Alanı Kodu :

11 - Dağıtım : Sınırlı Sınırsız
12 - Raporun Gizlilik Durumu : Gizli Gizli Değil