

MOBİL ROBOTLARDA ENGELLERDEN KAÇINARAK HEDEFE VARMA STRATEJİLERİ OLUŞTURULMUŞ KUUVET ALANI

ÖZET

Bu yöntem robot'a yolu üzerindeki engelleri tespit ederek kaçınabilme ve hedefine çarpmadan gidebilme imkanı vermektedir. Bu oluşturulmuş kuvvet alanı (Virtual Force Field) yöntemi iki temel üzerine kurulmuştur.

i) Engellerin koordinat hücrelerinde temsili,

ii) Gidilecek yolun potansiyel alan yöntemiyle bulunması. Bu temeller üzerine kurulu yöntemle ultrasonik duyaçlardan veya diğer duyaç guruplarından gelen hatalı, eksik bilgiler ayıklanabilir ve tespit edilen bu engellerin önünde robot durdurulmadan akıcı bir şekilde hedefine sürülebilir. Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan deneylerde robotun maksimum 0.78 m/s hızına çıktığı gözlenmiştir. Bu da yöntemin ne kadar güçlü olduğunu göstermektedir.

I. GİRİŞ:

Hareketleri sürecinde önlerine çıkan engellerden sakınma (Obstacle - Avoidance) mobil robotlar için her zaman önemli bir sorun oluşturmıştır. Mobil robotlar engellerden sakınarak hedefine giderken optimum olmayan yolları izleyebilirdi. Söz gelimi, daha kısa olmayan kaba yüzeyli yollardan gidebilirler. Bunun nedeni de mobil robotun daha önce çevresi hakkında hiç bir ön bilgisi olmamasındandır. Bu ön bilgiden yoksun robotun engellere çarpmadan hedefine gidebilmesi için bazı yöntemler geliştirilmiştir. Yazıda bugüne kadar geliştirilmiş engel-sakınma yöntemleri kısaca özetlenmekte ve bunlardan biri "Oluşturulmuş Kuvvet Alanı". (Virtual Force Field - VFF) yöntemi daha ayrıntılı olarak sunulmaktadır. VFF yöntemi hızlı mobil robotların engellerden sakınarak hedefe varmasını sağlayan çok etkin bir yöntem olmakla birlikte diğer yöntemlerinde başarısız olabildiği yoğun engelli ortamlarda bazen robotun hızlı hareket etmesini engellediği gözlenmiştir[2,3]. Yazı ayrıca VFF yöntemini kullanarak mobil robotların dinamik hareket stratejilerini incelemektedir.

II. GÜNÜMÜZE KADAR GELİŞTİRİLMİŞ OLAN ENGEL-SAKINMA METODLARI

Engellerden sakınma yöntemleri üç grupta toplanabilir; kenar-saptama (edge-detection) yöntemleri, engellerin koordinat hücrelerine yerleştirilmesi (certainty grids) ve potansiyel alan yöntemleri.

A. Kenar-Saptama Yöntemleri (Edge-Detection):

Kenar-saptama (edge-detection) yönteminde algoritma engellerin dikey kenarlarını saptayarak robotun görünen bu kenarların etrafında dolanmasını sağlar. Dikey kenarları birbirine bağlayan hatlar engelin sınırlarını oluştururlar. Yöntem son yıllarda araştırmacılar tarafından ultrasonik duyaçlar yardımıyla engel saptanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.[4-6]. Yöntemin dezavantajlarından biri robotların duyaçlarından bilgi almak için engel önünde durmasıdır. Doğal olarak bu durum robotların hedeflerine duraksamasız olarak ilerlemelerine engel

Levent YENİLMEZ (*)
Aydm ERSAK (**)

(*) Hava Kuvvetleri Eğitim Dairesi
(*) ODTÜ, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

olmaktadır. Buna karşın görünen odur ki kenar saptama yöntemlerinin doğal sonucu olarak bu sorun gelecekte daha hızlı bilgisayarlar tarafından giderilebilecek gibi görünmektedir.

Diğer bir kenar-saptama yönteminde robot hareket etmeden önce ultrasonik duyaçlarıyla etrafını panoramik olarak tarayarak engelleri saptamaktadır[7,8]. Arkasında hat-birleştirici algoritmalar yardımıyla cisimlerin kenar sınırlarını gözeterek hedefe ulaşan yollar planlanır.

Her iki kenar-saptama yönteminde de mobil robotların düzenli hareketleri ultrasonik duyaçların topladığı bilginin doğruluğuna çok bağlıdır. Kullanılan ultrasonik duyaçların eksiklikleri ve dezavantajları şunlardır:

- Zayıf Yönlenme
(Poor Directionality)

Bu kusur mobil robotun ancak 10-50 cm arası yakınlıktaki kenarları sezebilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu mesafe engellerin yüzeyi ile ultrasonik duyaç'ın eksenindeki açı tarafından belirlenmektedir.

- Sık Hatalı Okuma
(Frequent Misreading)

Kusur harici ultrasonik gürültü kaynaklarının yada mobil robotların kendi ultrasonik kaynaklarının yarattığı çevresel yansımalar (mobil robot birden fazla kaynağa sahip olabilir) kaynaklanır. Hatalı okumalar her zaman için iyi filtrelenememekte ve o nedenle de robot kenar-saptanmasını hatalı yapabilmektedir.

- Geniş Açılı Yansımalar
(Specular Reflections)

Kusur ultrasonik dalga ile dalganın çarptığı düz engel yüzeyleri arasındaki açının fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumda engel yüzeyleri gelen ultrasonik dalgaları robot duyacıdan uzağa yansıtmakta ve bu nedenle ya engel tespit edilememekte, yada gerçeğinden daha küçük olarak aklanabilmektedir.

Yukarıdaki kusurlardan herhangi biri engellerin hatalı algılanmasına ve bu nedenle de hatalı yol planlamasına yol açabilir.

B. Engellerin Koordinat Hücrelerine Yerleştirilmesi (The Certainty Grid For Obstacle Avoidance):

Koordinat hücreleri şeklinde modellenmiş bir düzlem üzerinde engellerin bulunma olasılıkları üzerine geliştirilen bir yöntem[7,9,10] mobil robotun çalışma alanı içinde yer alan engellerin mobil robota olan uzaklığına orantılı değerleri (Certainty Values, CV) bir grid sisteminin ilişkin hücrelerine yerleştirilmesine dayalıdır. Yöntem de CV'ler kullanılan ultrasonik duyaç karakteristiklerine göre kendi değerlerini ayarlarlar. Örneğin, ultrasonik duyaçların dalga yayımı konik bir biçimde olduğundan duyaçlar kendi konik açılımları içindeki nesnelerin uzaklıklarını algılamak onların açıl durumlarını saptayamaz. Şekil.1'de nesnelerin duyaca olan mesafeleri "d" ve algılanabilmeleri için de arasında yer alması gereken açılım "A" olarak gösterilsin. Öte yandan ultrasonik duyacı algılandığı bir nesnenin büyük olasılıkla akustik eksene koninin sınırlarından daha yakın olduğunu göz önünde bulunduralım[4]. Yöntemde tanımlanan bir engel olasılık fonksiyonu C_x , akustik eksene yakın hücrelerin CV değerlerini koninin sınırlarındaki hücrelerin CV değerlerine oranla daha fazla arttırmaktadır.

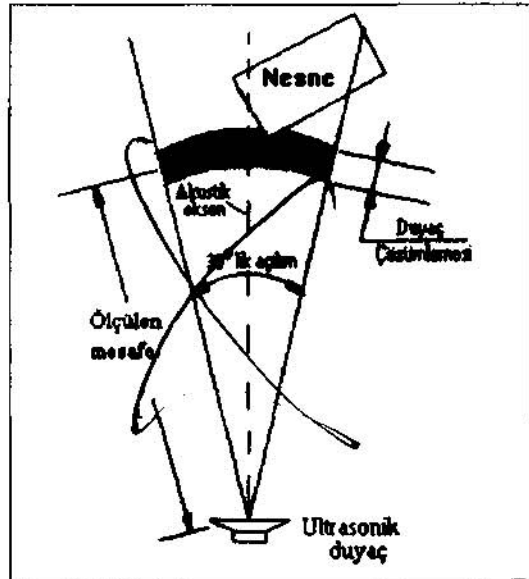
Yöntemin uygulamalarında robotlar ultrasonik duyaçlarıyla ancak durarak panoramik çevre taraması yapabilirler. Daha sonra bu taramadan elde edilen mesafe bilgileri grid de yer alan koordinat hücrelerine orantılı değerler olarak yerleştirilirler. Sonra robot yeni bir konuma hareket eder, durur ve hareketten önceki işlemlerini tekrarlar. Bir robotun bir oda



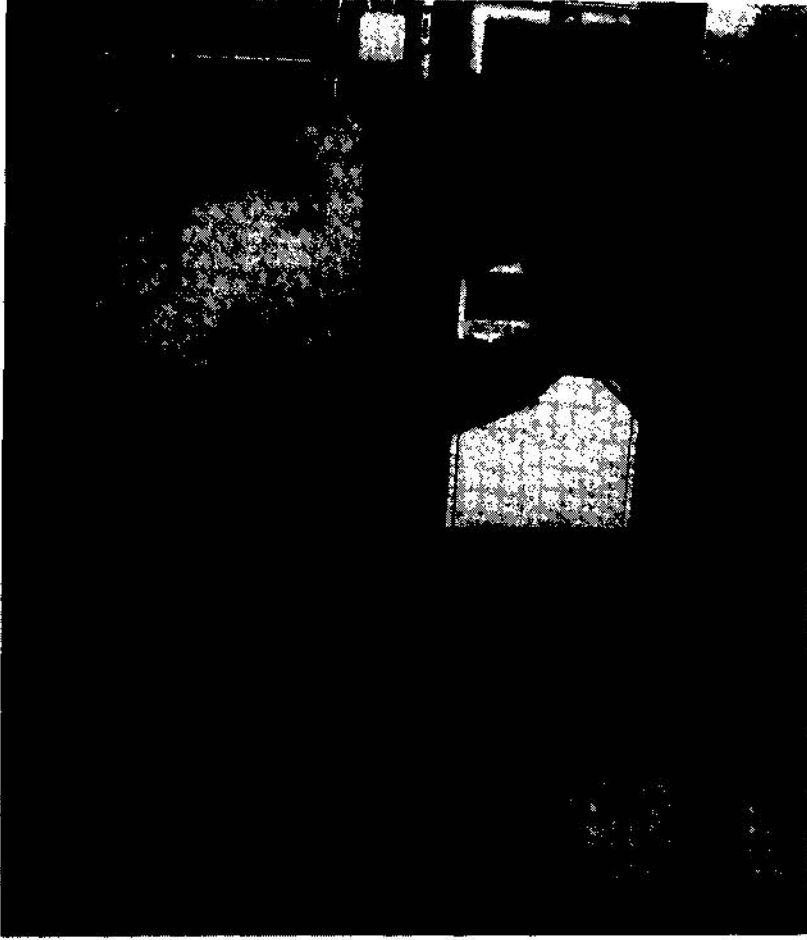
içinde bu şekilde hareketinden sonra koordinat hücrelerinin sahip olduğu değerler hemen hemen odanın tam bir sayısal haritasıdır.

C. Potansiyel Alan Yöntemleri:

Yöntem hedefin robota sanal bir çekici kuvvet (Attraction Force), yolu üzerindeki engellerde aynı biçimde sanal bir itici kuvvet (Repulsive Force) uygulaması gerektiği biçiminde bir senaryo ya dayalıdır [11]. Hedefe yönlendirilen çekici kuvvetle, karşılaşılan engellerin uyguladığı itici kuvvetlerin bileşkesi olan R vektörü robotun bulunduğu pozisyona göre hesaplanır. R'nin büyüklüğüne ve yönüne göre robotu harekete geçiren hızlandırıcı kuvvet (Accelerating Force) ve robotun alacağı yeni pozisyon hesaplanır. Bu işlem robot hedefine varana kadar tekrarlanır. Krogh [12] bu yöntemi, robotun en-



Şekil 1: Ultrasonik dalganın iki boyutlu kronik izdüşümü. Ölçülen mesafe bilgisi d nesnenin A alanı içinde olduğunu gösterir.



gelleri aşarken hızını ayarlayabilmesini de göz önüne alarak geliştirdi. Thorpe[13] potansiyel alan yöntemini robotun izleyebileceği yolların durağan planlamasını yapacak şekilde (off-line path planning) engellerden sakınarak hedefine varmasında kullandı. Krogh ve Thorpe[14] kısmi ve genel planlarını birleştirici genelleştirilmiş bir potansiyel alan (Generalized Potential Field) yöntemi de geliştirdiler. Newman ve Hogan [15] her bir engel fonksiyonunu mantık işlemleriyle birleştiren yeni bir potansiyel fonksiyon oluşturdu.

Yöntemlerin ortak yanı, çevrenin önceden bildirilen bir koordinat sistemine sahip olması, bu koordinat sistemi içinde engelleri temsil eden geometrik şekillerin verilmesi ve robotun bu verilerle hedefine giderken izleyeceği yolun durağan hesaplanmasıdır. Brooks [16,17] ve Arkin [18] ultrasonik duyaçlarla donatılmış bir deney robotu üzerinde potansiyel alan yöntemini kullandılar. Brooks yönteminde robot ultrasonik duyaçlarının okuduğu me-

safe bilgilerini itici kuvvet vektörüne çevirir. İtici kuvvetlerin bileşkesinin belirli bir eşik seviyesini aşması durumunda robot durarak oluşan bileşke vektör yönüne döner ve hareketine devam eder. Bu yöntemde robot, duyaçlarının saptadığı mesafe bilgilerini değerlendirirken daha önceki ölçüm bilgilerini gerektiğinde tekrar kullanmamaktadır. Arkin'in deneyinde de robot aynı yöntemle bir engelin etrafından 0.12 cm/s (0.4 f/s) hızında dolaşabilmektedir.

III. KUVVET ALANI YÖNTEMİ (THE VIRTUAL FORCE FIELD METHOD - VFF):

Kuvvet alanı (VFF) yöntemi gerçekzamanda belirlenebilen engellerden kaçınan (Real-Time Obstacle Avoidance) yolların saptanmasına olanak vermektedir.[1] Robot bu yöntemle yoluna çıkan beklenmedik engellerin arasından hedefine hızlı, sürekli ve düzgün bir hareketle ulaşabilir. Yöntemde robotun karşılaştığı engellerin önünde durması gerekmemektedir.

VFF Yöntemi:

Robot hareket ederken ultrasonik duyaçlarıyla engellerin kendisine olan mesafesini ölçerek hareket ettiği düzlemdaki koordinat hücrelerine bu uzaklık verilerini işleyerek yerleştirir. Robota bağlı bir bilgisayar sürekli olarak (33x33) koordinat hücrelerinden oluşan ve kendisinde merkezinde olduğu bir grid alanı (3.30mx3.30m) tarayıp analiz ederek robotun hareket stratejisini tayin eder.

Grid'in her koordinat hücresi barındırdığı CV değerine (C(i,j)) doğru orantılı fakat hücre ile robot arasındaki uzaklığı karesiyle ters orantılı olarak robotu kendisinden uzaklaştırıcı, itici bir kuvvet, F[i,j] uygular.

$$\vec{F}(i,j) = \frac{F_{ct} * C(U)}{d^2(i,i)} \left(\frac{x_i - x_0}{d(i,i)} \vec{x} + \frac{y_i - y_0}{d(i,i)} \vec{y} \right)$$

F_{ct} : İtici kuvvet sabiti,

$d(i,j)$: hücre (i,j) ve robot arasındaki mesafe,

$C(i,j)$: hücre (i,j)'nin aldığı işlenmiş değer,

X_0, Y_0 : robotun bulunduğu koordinatlar,

X_i, Y_i : hücre (i,j)'nin koordinatları.

X, Y : x ve y vektörel bileşenleri.

Üzerinde engel olan koordinat hücreleri robot kendilerine yakın ise onu kuvvetle, eğer uzak ise zayıfça iter. Toplam itici kuvvet \vec{p}_t $9^{(FC * Y_{CE})}$ risindeki bütün (33x33) hücre kuvvetlerinin vektörel toplamıdır:

$$\vec{F}_t = \sum_i \vec{H}_{i,j}$$

Robot hareketi sürecinde sürekli sabit değerli bir çekici güç olan \vec{p}_c tarafından hedefe çekilir.

Bu \vec{F}_t kuvvetli hedef koordinatları tarafından yaratılır:

$$\vec{F}_c = F_{ct} * \left(\frac{X_c - X_0}{d(t)} \vec{X} + \frac{Y_c - Y_0}{d(t)} \vec{Y} \right)$$

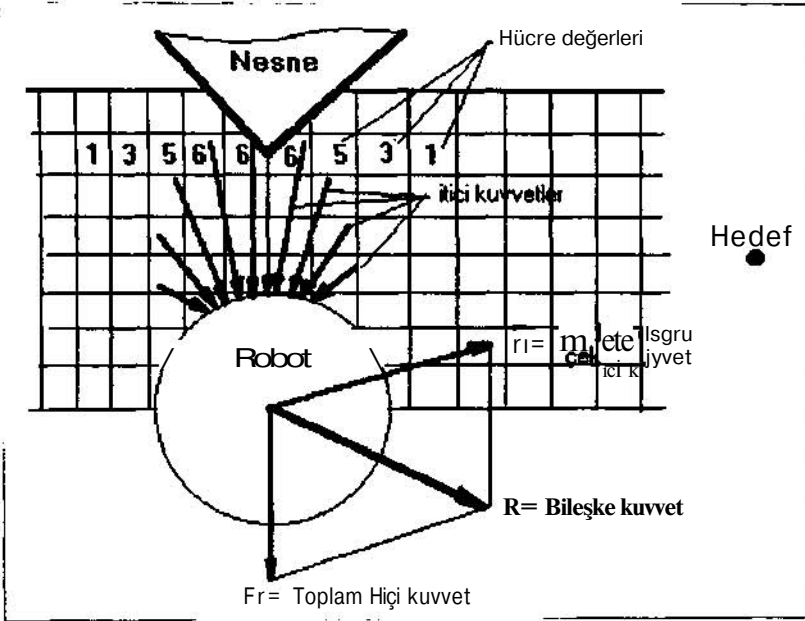
F_{ct} : Hedefe çekici kuvvet sabiti,

$d(t)$: Hedefle robot arasındaki mesafe,

X_c, Y_c : Hedef koordinatları,

X_0, Y_0 : Robotun bulunduğu koordinatlar,

X, Y : x ve y'nin vektörel bileşenleri.



Şekil 2: Oluşturulmuş kuvvet alanı üzerinde engel bulunan herbir hücre robota itici kuvvet uygular. Bu kuvvet hücre değeri $C[i,j]$ ile doğru orantılı ve robot-hücre uzaklığının karesi d^2 ile ters orantılıdır.

Dikkat edileceği gibi \vec{F}_t robotun hedefe olan mutlak mesafesinden bağımsızdır. Şekil.2 den de görüldüğü gibi bütün kuvvetlerin (hücrelerin itici, hedefin çekici kuvvetleri) vektörel toplamı bileşke kuvvet vektörü olan \vec{F}_t 'ı meydana getirir.

$$\vec{R} = \vec{F}_t + \vec{F}_i$$

\vec{R} : Bileşke kuvvet vektörü

\vec{F}_t : Toplam çekici kuvvet vektörü

\vec{F}_i : Toplam itici kuvvet vektörü

\vec{R} vektörünü yönü $\theta = \tan^{-1}(\frac{F_{iy}}{F_{ix}})$

/ $\text{Re}(\vec{R})$ derecedir. Bu yön bilgisi sayesinde robotun gitmesi gereken yönü bildiren θ (steering - rate) komutu elde edilir:

$$\theta = K_s [6 - \theta_p]$$

K_s : Yönlenme sabiti (s^{-1}),

θ : Robotun o andaki açısı (derece)

Kullanılan (-) operatörü 9 ve (p arasındaki en kısa açısal farktır. Bu nedenle sonuç daima $-180 < \theta < 180$ dir. Engeller koordinat hücrelerinde yüksek değerleri temsil edilirler.

Diğer taraftan yanlış duyaç okumaları koordinat hücrelerinde düşük değerler oluşturduğundan dikkate alınmazlar.

VFF algoritması daha önce mobil robotlar üzerinde kullanılan kenar-saptama yöntemlerine göre bazı avantajlara sahiptir. Bunlar:

1) Kenar-saptama yöntemlerinde yapılan hatalı okumalar, robotun engelleri gerçek şeklinin dışında algılamasına sebep olur. Yine bu yöntemlerde engellerin şeklini tam olarak bilmemesi gerekmektedir. Robot Ultrasonik duyaçların zayıf okuma bilgilerini değerlendiremediğinden engellerin etrafındaki koordinat hücrelerine gerekli değer atamalarında bulunamaz. Halbuki VFF yönteminde engel şekillerinin tam olarak bilinmesine gerek yoktur. Onun yerine koordinat hücreleri üzerinde bir engelin oluşması için gereken olasılık değerlerinin bilinmesi yeterlidir. Bu durumda robot, hatalı okumalara rağmen sağlıklı bir şekilde hareket stratejisini geliştirebilir.

2) VFF yönteminde robotun, etrafını ultrasonik duyaçlarıyla algılaması ve ona göre hareketini belirlemesi esnasında durmasına gerek yoktur [4, 17, 19, 20]. Robot bu işlemleri hareket ederken yapabilir. VFF yöntemi,

robot hareketinin ani değişimlerden etkilenmemesi için yapılan suni yavaşlatma işlemi (damping) hariç robota, maksimum hızında hareket ederken, bütün engelleri sorgulayabilme kolaylığını verir.

3) Robotun üzerinde gittiği koordinat hücrelerini duyaç bilgileriyle işlemesi ve bu işlenmiş hücreleri izlenecek yolun planlanmasında kullanması bu yöntemde iki ayrı bağımsız işlemidir. Halbuki kenar saptama yönteminde önce engel algılanır, sonra robot durur, engelin şeklini yaptığı ölçümlerle tanımayaya çalışır (engel kenarlarının saptanması), izleyeceği yolu planlar ve sonunda da planladığı şekilde hareket eder.

4) Engellerin koordinat hücreleri üzerinde temsil edilmesi sayesinde robot farklı yapıdaki duyaçların (örneğin görüntüleme, dokunma, yaklaşma duyaçları) verilerini birleştirerek işleyebilir. Ayrıca önceki veriler ve sabit değişmez engel verileri (örneğin duvarlar) kolayca saklanabilir ve tekrar kullanılabilir.

IV - HIZLI ROBOTLARIN DİNAMİK HAREKET STRATEJİSİ

Bu bölüm hızlı hareket edebilen robotların dinamik özelliklerini de [21] hesaba katarak oluşturulan VFF metodu üzerindeki gelişmeleri tartışmaktadır. Borenstein ve Koren yöntemlerini kullanarak yaptıkları bütün deneylerde mobil robot olarak ticari yoldan elde edilebilir olan Cybarnation K2A mobil platformunu kullanmışlardır. K2A robotu maksimum $V_{max} = 0.78$ m/s hıza; maksimum $\dot{\theta} = 120$ deg/s açısal dönme oranına (steering rate) ve $W = 125$ kg ağırlığa sahiptir. Platform üç tekerleğini birden sürebilen tek bir senkronize sürücüyü sahip olduğundan bütün yönlere dönebilir. Platformun denetimi için platform üzerindeki bilgisayara seri olarak hız (V) ve açısal dönme oranı (Q) komutları gönderilir. Platform ayrıca üzerinde 24 Polaroid ultrasonik duyaç taşıyan bir çemberle ve bu sensörleri kontrol eden ufak bir PC-bilgisayarla (7.16 Mhz) donatılmıştır.

A. Robot Yön Kontrolü-Alçak Geçiren Filtre:

Bazı kritik durumlarda robotun ani hareketlerle yolunu değiştirmesini

engellemek için aşağıdaki koşulun sağlanması gerekmektedir:

$$AS > T \cdot V_{\max}$$

A S : Koordinat hücre boyutlu,

T : Duyaç örnekleme periyodu,

V_{\max} : Robotun gidebileceği maksimum hız.

Örneğin, $S=0.1$ metre, $T=0.1$ saniye ve $V_{\max}=0.78$ m/s ise koşul sağlanmıştır ($0.1m > (0.1s \cdot 0.078m)$). Bazen eşit. (6) sağlanmasına rağmen robot koordinat hücreleri $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ üzerinde hareket ederken mesafeye bağlanan toplam itici kuvvet vektörü \vec{F}_r (Şekil.2), bileşke kuvvet vektörü \vec{R} üzerinde büyük değişikliklere sebep olabilir. Bu sonuç robotun yön denetim sınırlarının ötesinde ise jpbot yönünü bileşke kuvvet vektörü \vec{R} yönüne ayarlayamaz. Bu problemten kaçınmak için zaman sabiti $X = 0.4$ s olan bir sayısal alçak geçiren filtre basamağı açılmalısın dönme oranına ($O.$) eklenir. Bu filtrenin eklenmesiyle elde edilen açılmalısın dönme - oranı:

$$n_i = \frac{T \cdot n_{i-1} + (T-T) \cdot n_{i-2}}{\tau}$$

Q1: Alçak-geçiren filtre eklendikten sonra-oranı,

iii-1: Bir önceki yönlenme-oranı,

Qi : Alçak-geçiren filtre uygulanmadan önceki yönlenme-oranı,

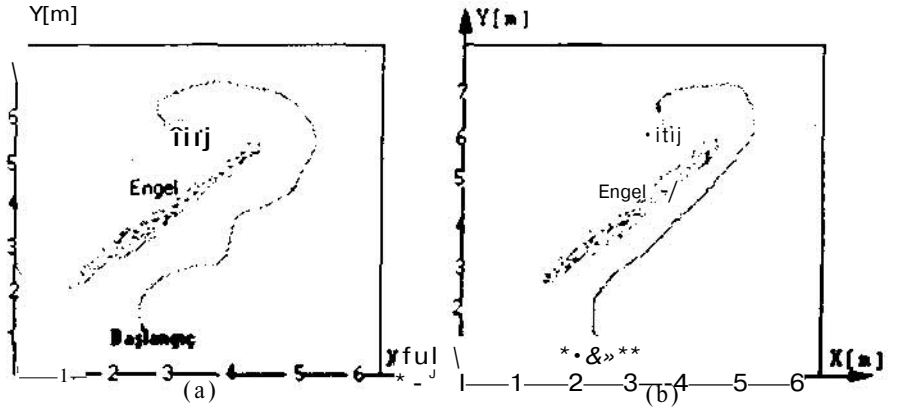
T: Duyaç örnekleme periyod (örneğin $T = 0.1$ s),

X : Alçak - geçiren filtrenin zaman sabiti

Bu filtre robot engellere paralel giderken meydana gelebilecek engele çarpma veya engelden uzaklaşmaları ortadan kaldırır. Bir dezavantaj olarak bu durum filtre zaman sabiti X kadar bir gecikme meydana getirir.

B. Engellere Göre Robot Hızının Ayarlanması:

ideal olarak, robot bir engelle karşı-



Şekil 3: (a) Engel kenarlarında meydana gelebilecek olan düzensiz robot hareketi, (b) itici kuvvetin kompanse edilmesi ile oluşan düzenli robot hareketi.

lastiği zaman hedefine tekrar yönelene kadar bu engel boyunca düz bir şekilde hareket eder. Hızlı giden bir robot (örneğin $V > 0.5$ m/s) gerek kendi mekanik aksamlarından gerekse daha önce sözü edilen alçak-geçiren filtre tarafından meydana getirilen zaman kaybından dolayı kendini hareketi esnasında meydana gelebilecek yön değişikliklerine hemen uyarlayamaz. Meydana gelen bu gecikmeden dolayı robot çok miktarda itici kuvvet algılayabilir. Aynı nedenden dolayı karşılaştığı bir engelden gerektiğinden fazla uzaklaşabilir. Sonuç olarak izlediği yol Şekil.3a'daki gibi bir hayli düzensiz olabilir. Bu düzensiz hareketi giderebilmenin bir yoluda, robot engele yaklaşırken ikinci kuvveti arttırmak, uzaklaşırken azaltmaktır. Kısacası, toplam itici kuvvet değeri, F_r hem kendi yönü ile hem de hız vektörü \vec{v} 'ye bağımlı olarak değişmektedir. Yani eşit. (9)'da \hat{v} ve \vec{v} vektörlerinden elde edilen $\cos\theta$ ile toplam itici kuvvet çarpılmaktadır:

$$\vec{F}_f = u \cdot \vec{F}_r + (1-u) \cdot \vec{F}_r \cdot (-\cos\theta) \quad (8)$$

\vec{F}_r : Kompanse edilmiş toplam itici kuvvet,

u : Etki faktörü (örneğin $u = 0.25$).

ve

$$\cos\theta = \frac{V_x \cdot F_{rx} + V_y \cdot F_{ry}}{|\vec{v}| \cdot |\vec{F}_r|} \quad (9)$$

V_x, V_y : Hız vektörü \vec{v} 'nin x ve y bileşenleri,

F_{rx}, F_{ry} : Toplam itici kuvvet \vec{F}_r 'm x ve y bileşenleri.

Robot, hareketini düzenleyen bu yöntemin etkisiyle, bir engelle tam önünden yaklaşırken maksimum toplam itici kuvvet tarafından karşılanır (Örneğin $\theta = 180$ ve $u = 0.25$ ise $F_r' = F_r$ dir). Halbuki robot engelden uzaklaşırken bu durum tersine döner ve toplam itici kuvvet $\cos\theta$ tarafından azaltılır. Örneğin $u = 0.25$ ise;

$$\vec{F}_r' = 0.25 \cdot \vec{F}_r - (1-0.25) \cdot \vec{F}_r \cdot \cos\theta$$

dir. $u = 0$ ise;

$$\vec{F}_r' = \vec{F}_r \cdot (-\cos\theta)$$

dir. Robot engele çok az bir açı ile yaklaşıyorsa ona çarpabilir. Eşit. (8)'e dikkat edilirse, \hat{v} kompanse edilmiş toplam itici kuvveti negatif olabilir. Bu durumda robot engelden uzaklaşmaktadır ($\cos\theta > 0$). Yani hedefin yarattığı robot-çekim kuvvetine katkıda bulunulmuştur. Bu çekici kuvvet etkisi robot hızını kompanse ederek meydana gelebilecek ani hız değişikliklerini azaltır.

C. Genel Hız Denetimi:

Bir mobil robotun hızını VFF ortamında denetleyebilmek için bu hızın

hesap edilen bileşke toplam kuvvete $\vec{R} = \vec{F}_i + \vec{F}_r$ orantılı olmasına dikkat edilir. Böylece, eğer robotun hedefe doğru öni açık ise, yani sadece çekici kuvvet etkisi gözleniyorsa, robot hızını en yüksek değerine çıkarabilir. Şayet yol üzerinde engeller mevcut ise bu engellerin oluşturduğu toplam itici kuvvet F_r maksimum hızı azaltıcı yönde etkiyecektir. Robot'a gönderilen hız komutunun (V) değişimi aşağıdaki fonksiyonla verilir:

$$V = \begin{cases} V_{max} & \text{Eger } |F| = 0 \\ V_{max} (i - |\cos\theta|) & \text{Eger } |F| > 0 \end{cases}$$

Bu fonksiyonla robot, yolu üzerinde engel yoksa gidebileceği en yüksek hızla hedefine doğru yönelebilecektir. Yolu üzerinde engeller varsa ve kendisinde bir engele yönelmişse (veya uzaklaşıyorsa) hızını Cos θ 'ya bağlı olarak azaltacaktır. Bu durum robot hızı üzerinde ikinci bir düzenleyici etki yaratmaktadır. Şayet robot bir engel boyunca hareket ediyorsa (bu durumda Cos $\theta = 0$ ve $V = V_{max}$ dir) yine hızını en yüksek değerine çıkararak hedefine varma süresini kısaltır. Şekil 3b'de robotun izlediği yol üzerinde yukarıda sözü edilen eşit. (8), (9)'un sağladığı ani hız değişikliklerini kompanse edici etkinin sonucu gösterilmiştir.

V- SONUÇ

Borenstein ve Koren mobil robotların engellerden sakınarak hızla hedeflerine gidebilmesi için oluşturdukları VFF metodunu bir deney robotu olan Carmel üzerinde test ederek geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu VFF metodu aşağıdaki ilkeler üzerine kurulmuştur:

- 1) Robotun yolu üzerindeki engellerin koordinat hücreleri üzerinde temsil edilmesi sayesinde engellerin sürekli bir şekilde algılanmasını ve gidilecek yolun planlanmasını sağlar.
- 2) Robot üzerinde oluşturulmuş itici ve çekici kuvvet alanları robotun hızını ve yönünü belirler.
- 3) 1 ve 2'nci maddelerin sonuçları sayesinde robotun karakteristik davranışı ortaya çıkar. Robot engellerin yüksek olasılıkla temsil edildiği yerleri

dikkate alırken düşük olasılıklı yerleri dikkate almaz.

- 4) Robotun hareketinde meydana gelebilecek düzensizlikler alçakgeçiren bir filtre ve itici kuvvetlerin kompanse edilmesiyle giderilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Y.Koren and J.Borenstein, "Real-Time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots," IEEE Trans. Systems ManCybern., vol. 19, no.5 pp. 1179Sept./Oct. 1989.
- [2] Y.Koren J.Borenstein, "The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots," IEEE Trans. Robotics Automat., vol. 7, no. 3, pp. 278 - 288, June 1991.
- [3] Y.Koren and J.Borenstein, "Critical analysis of potential field methods for mobile robot obstacle avoidance," IEEE
- [4] Y.Koren and J.Borenstein, "Obstacle Avoidance with ultrasonic sensors," IEEE J.Robotics Automat., vol. RA- 4, no. 2, pp. 213-218, 1988.
- [5] Y.Koren and J.Borenstein, "World modeling and position estimation for a mobile robot using ultrasonic ranging," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat. (Scottsdale, AZ, May 14-19, 1989), pp. 674-680.
- [6] R.Kuc and B.Barshan, "Navigating vehicles through an unstructured environment with sonar," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat. (Scottsdale, AZ, May 14-19, 1989), pp.1422-1426.
- [7] A.Elfes, "Sonar-based real-world mapping and navigation," IEEE J. Robotics Automat., vol. RA-3, no.3, pp.249-265, 1987.
- [8] A.M. Flynn, "Combining sonar and infrared sensors for mobile robot navigation," Int. J.Robotics Res., vol.7, no.6, pp. 5-14, Dec. 1988.
- [9] H.P.Moravec and A.Elfes, "High resolution maps from wide angle sonar," in Proc. IEEE Conf. Robotics Automat. (Washington, DC, 1985, pp.116-121.
- [10] H.P. Moravec, "Sensor fusion in certainty grids for mobile robots," AI Mag., pp.61-74, Summer 1988.

[11] O.Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat. (St.Louis, MO, Mar. 25-28, 1985), pp.500-505.

[12] B.H.Krogh, "A generalized potential field approach to obstacle avoidance control," presented at Int. Robotics Res. Conf., Bethlehem PA, Aug. 1984.

[13] C.F. Thorpe, "Path relaxation: Path planning for a mobile robots," Carnegie-Mellon Univ. The Robotics Institute, Mobile Robots Lab., Autonomous Mobile Robots Annual Rep., pp.39-42, 1985.

[14] B.H. Krogh and C.E. Thorpe, "Integrated path planning and dynamic steering control for autonomous vehicle," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat. (San Francisco, CA, Apr. 7-10, 1986), pp. 1664-1669.

[15] W.S. Newman and N.Hogan, "High speed robot control and obstacle avoidance using dynamic potential functions," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat. (Raleigh NC, Mar. 31-Apr. 3, 1987), pp.14-24.

[16] R.A.Brooks, "A robust layered control system for a mobile robot," IEEE J.Robotics Automat., vol. RA-2, no. 1, pp. 14-23, 1986.

[17] R.A.Brooks and J.H.Connel, "Asynchronous distributed control system for a mobile robot," Proc. SPIE, Mobile Robots, vol. 727, pp.77-84, 1987.

[18] R.C.Arkin, "Motor schema-based mobile robot navigation." Int. J.Robotics Res., pp.92-112, Aug. 1987.

[19] R.A.Cooke, "Microcomputer control of free-ranging robots," Proc. 13th Int. Symp. Ind. Robots and Robots, Chicago, IL, Apr. 1983, pp.13.109-13.120.

[20] C.Jorgensen, W.Hamel, and C.Weisbin, "Autonomous robot navigation," BYTE, pp.223-235, Jan. 1986.

[21] J.Borenstein and Y.Koren, "A mobile platform for nursing robots," IEEE Trans.on Ind. Electron., vol.32, no.2, pp.158-165-1985.