

Gece görüş özellikli mobil robot için şekil eşlemeye dayalı lider takibi

Shape matching based leader tracking for a mobile robot with night vision ability

Tolga YÜKSEL^{1*}

¹Elektrik-Eletronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, Türkiye.
tolga.yuksel@bilecik.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 22.01.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 27.09.2016

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2016.35556

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Görsel kılavuzlanan bir mobil robotun baş etmesi gereken sorunlarından biri gece görüştür. Mobil robotların diğer bir uygulama alanı ise lider takibidir. Bu çalışmada bu amaçlara yönelik tasarlanmış Bilecik Mobil Robot (BLMp) tanıtılmaktadır. Çalışmada gece görüş IR-LED kamera ile sağlanırken şekil taşıyan lideri bulma ve takip etme bölgesel tanımlayıcılar, 2B çapraz korelasyon ve şekil betimleyici ile başarılmıştır. Kalman filtresi ile hesapsal yük azaltılarak daha etkin bir takip algoritması oluşturulmuştur. BLMp lider üzerindeki şeklin görsel geribesleme ile elde edilen merkezinin görüntüdeki konumunu ve BLMp'ya uzaklığını belirten görüntüdeki alanını giriş olarak almaktadır. Bu girişleri kullanan bulanık mantık birimi sağ ve sol tekerler için kontrol işaretleri üretmektedir. Çalışmada belirtilen aşamalar ayrıntılarıyla verilmiş, lider takibi için kullanılan yöntemler karşılaştırılmış ve deneysel sonuçlar sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Lider takibi, Mobil robot, Şekil eşleme, IR-LED kamera

Abstract

One of the problems that a visually guided mobile robot has to deal with is night vision. Another application field of mobile robots is leader tracking. In this study, Bilecik Mobile Robot (BLMp) which is designed for these purposes is introduced. While night vision is provided by an IR-LED camera, shape carrying leader detection and following is achieved with regional descriptors, 2D cross-correlation and shape context. A more efficient following algorithm is obtained by decreasing computational cost with Kalman filtering. BLMp takes the position of the center of the shape on the leader obtained from visual feedback and the shape area defining the distance between BLMp and the leader as inputs. A fuzzy logic unit uses these inputs to generate control signals for left and right wheels. In the study, these stages are given in details, the methods used for leader tracking are compared and experimental results are presented.

Keywords: Leader tracking, Mobile robot, Shape matching, IR-LED camera

1 Giriş

Gelişen teknoloji ile birlikte mobil robotların askeri, uzay ve endüstriyel kullanım alanları giderek artmaktadır. Artan bu kullanıma bağlı olarak da istekler farklı yönler doğru ilerlemektedir. Özellikle otonom çalışan mobil robotlar, hedef takibinden harita çıkarmaya, mobil manipülatör uygulamalarından robot futbola kadar birçok uygulamada çevre bilgisi için kamera ve/veya lazer mesafe ölçer (LIDAR) gibi sensörlere ve bu sensörlerden alınan bilgilerin yorumlanmasına ihtiyaç duymaktadır.

LIDAR'dan farklı olarak sadece kamera kullanan mobil robotlar endüstriyel ve askeri uygulamalarda birçok kısıta sahiptir. Özellikle kameranın tipine bağlı olarak oluşan görüş açısı, çözünürlük, varsa distorsiyon gibi kısıtlar mobil robotun hareket kabiliyetini kısıtlamakta ve yüklediği görevi yapmada önkoşullar veya önkabuller olarak ortaya çıkmaktadır. Bu kısıtlardan genel olarak öngörülmeyen veya tamamen göz ardı edilenlerden bir tanesi de gece veya karanlık ortamda çalışmadır. Özellikle askeri ve kurtarma amaçlı görevlerde mobil robotun bu gibi koşullara hazırlıklı olması gerekir. Bu sorunu çözmek için kullanılan başlıca yöntemler robota monteli aydınlatma veya termal kamera kullanımındır. Roh ve Choi'nin karanlık gaz borularında arıza tespiti için kullandıkları mobil robot kendi aydınlatmasına sahiptir fakat bu çözüm özellikle gizliliğin önemli olduğu görevler için uygun değildir [1]. Fehlman ve Hinders çalışmalarında her ne kadar sensör teknolojisi ucuzlansa da, kızılötesi ile sıcaklık yayılımı algılayan sensörlerin pahalılığından dolayı termal kamera fiyatlarının yüksek düzeyde devam etmekte olduğundan bahsetmiştir [2].

Birk, RoboCup için hazırladıkları IUB robotlarında robotun tüm maliyetinin çok üstünde sadece termal kamera maliyeti bulunduğunu belirtmiştir [3]. Ayrıca, Caballero ve diğ., Motai ve diğ. çalışmalarında termal kamera görüntülerinden insan bulma gerçekleştirilirken düşük gri görüntü kalitesinden dolayı insan ayırt etme oranlarının oldukça düşük olduğundan bahsetmiştir [4]-[5].

Askeri ve uzay uygulamalarında liderin mobil robot tarafından bulunması için LIDAR'a sahip mobil robot yaklaşımı uygulanmaktadır. Bununla beraber Graham ve Shillcutt'ın uzay görevleri üzerine yaptıkları çalışmalarda bahsettikleri üzere LIDAR ve kamera dış mekan uygulamalarında dik ve kısa yokuşlar içeren alanlarda zayıf kalmaktadır [6].

Liderin insan olduğu düşünüldüğünde bir görüntü içindeki insanları yüzleri dönük iken bulmak, ayırt etmek kolaydır ve ilgili mobil robot çalışmalarında bu tip uygulamalara yer verilmiştir [7]-[9]. Fakat robotların insanların önünden gelmesi değil peşinden gelmesi gerektiği düşünüldüğünde arkası dönük olan insanları ayırt etmek oldukça zordur. Bazı çalışmalar kıyafeti, lider vücut şeklini veya liderin duruşu ve düşük tanıma oranları bu yaklaşımların açıklarıdır.

Verilen bu sorunlarla beraber lider takibi için kullanılan farklı askeri İnsansız Kara Araçları (İKA) Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1a'daki Lockheed Martin SMSS, liderin giydiği kıyafetlerin şeklini tanıyarak lideri takip ederken Şekil 1b'deki BigDog lider üzerinde takılan yansıtıcı bantları LIDAR ile takip etmektedir. Şekil 1c'deki IAI Rex ise lider üzerine takılı vericiden gelen sinyallere göre hareket etmektedir. Verilen bu İKA

örneklerinde gündüz ve gece çalışmaya uygunluk konusunda herhangi bir bilgi verilmediği, sadece uygulama özelliklerinin resmi internet sitelerinde verildiği ve örneklerde askeri gizlilik sözkonusu olduğundan literatürde kaynak olarak bulunamadığı belirtilmelidir.



(a): Lockheed Martin SMSS. (b): Boston Dynamics BigDog. (c): IAI rex.

Şekil 1: Lider takip eden askeri İKA'lar.

Yukarıda bahsedilen uygulama özellikleri gece çalışmaya ilişkin herhangi bir bilgi verilmemekle beraber bu sorunu aşmak için kullanılabilecek diğer bir sensör ise özellikle son yıllarda güvenlik kameraları arasında popüler hale gelen IR (InfraRed)-LED kameralardır. Bu tip kameralar üzerlerinde bulunan IR-LED'ler infrared dalga boyunda ışık yaymaktadır. Bu dalgalar Near-IR olarak adlandırılan ve 700-1000 nm. dalga boyu aralığında olan dalgalardır. Yollanan IR ışık cisme çarptıktan sonra yansımakta, daha sonra yansıyan infrared ışık kamera sensörü tarafından algılanmaktadır. Ayrıca kameranın üstündeki LDR sayesinde gündüz ve gece kiplerinde çalışarak gündüz renkli, gece gri görüntüler elde edilmektedir.

Bu çalışmada yukarıdaki araçlara alternatif olabilecek, görsel geribesleme ve gece görüş ile lider takibi yapabilecek düşük maliyetli bir mobil robot çözümü olan BLM ρ (BiLecik Mobile Robot) sunulmuştur. BLM ρ , üzerindeki IR-LED kamera sayesinde karanlık ortamlarda rahatça çalışabilmektedir ve çalışmada özgünlük açısından robotun gece çalışması üzerinde durulmuştur. Literatürde bahsedilen lider takip sorunlarıyla baş edebilmek, lideri arkası dönük durumdayken ayırt edebilmek, gerektiğinde başka şekil taşıyan başka bir lidere geçiş sağlayabilmek ve lideri giydiği giysilerden bağımsız kılmak adına lider üzerine "H" şeklinde bir şekil yerleştirilmiştir. Bu şekil, BLM ρ tarafından tanınarak görüntü geribeslemeli mobil robot kılavuzluğu yapılmaktadır. Çalışmada tanıma işlemi için bölgesel tanımlayıcılar kullanılmakta, bölgesel tanımlayıcılarının devamında ise şekil eşleme yöntemleri olan 2B çapraz korelasyon veya şekil betimleyici devreye girmektedir. Bu tip eşleme yöntemleri gerçek zamanlı çalışma için zorlayıcı algoritmalar olduğundan bu yöntemlerle lider bir kez belirlendikten sonra sadece bölgesel tanımlayıcılar ve Kalman filtresi ile şekil eşleme yapılarak takip devam etmektedir. Kalman ile eşleme yapılamadığı veya şekil betimleyici ve 2B çapraz korelasyon ile eşleşen şekil bulunamadığı durumda ise bölgesel tanımlayıcılar tekrar devreye girmektedir. Tanıma işleminden sonra görüntü düzleminde lideri merkezde tutmak üzere şekil merkezi ve liderle uzaklığı sabit tutmak üzere şekil alanı çıkarılmakta, bu değerler bir bulanık mantık denetleyiciye uygulanarak sağ ve sol tekere ait kontrol işaretleri üretilmekte ve kapalı çevrim görüntü geribeslemeli mobil robot kontrolü sağlanmaktadır.

Çalışma, anlatılan aşamaları ayrıntılandırmak üzere şu şekilde düzenlenmiştir. İzleyen bölümde mobil robot ile lider takibiyle ilgili çalışmalar ve yaklaşımlar verilmiştir. Bölüm 3'te BLM ρ 'nun mekanik, elektronik, görme ve yazılım yapısı hakkında bilgiler verilmiştir. Bölüm 4'te BLM ρ ile şekil eşlemeye dayalı lider takibinin nasıl yapıldığı ve şekil eşleme

yöntemleri verilmiştir. Bölüm 5 ve 6'da ise elde edilen deneysel sonuçlar ve gelecek çalışmalar sırasıyla verilmiştir.

2 İlgili çalışmalar

Mobil robot ile lider takibi üzerine literatürde yapılan çalışmalar çoğunlukla insan takibi üzerine odaklanmış ve liderin ayırt edilmesi gözardı edilmiştir. Ayrıca çalışmalarda çoğunlukla LIDAR ile kamera görüntülerinin kaynaştırılması yoluna gidilmiştir. Bunun haricinde literatürde gece görüş ve lider takibi için IR-LED kameranın kullanıldığı herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

Santoz ve diğ. çalışmalarında renkli kamera kullanmış ve insan görünümünü tanımak için elbiselerin renkli-doku niteliklerinden yararlanmışlardır [10]. Çalışmada insan takibi olarak bacak takibi yapılmış, yürüyüş analizi için LIDAR kullanılmıştır. Çalışma iç ortam için tasarlanmış fakat gece çalışma durumuna dair herhangi bir bilgi verilmemiştir. Treptowa ve diğ. termal kamera kullanmış ve lider tanıma olmadan insan takibi için eliptik kontür modeli ve parçacık filtrelerinden yararlanmışlardır [11]. Çalışmada ışıktan ve insan derisinden bağımsız bir sistem oluşturulduğu belirtilse de dermal kameranın getirdiği yüksek maliyet ve çalışmada belirtilen düşük insan ayırt etme yüzdelere de bahsedilmiştir. Hu ve diğ. Gabor dalgacık ve gizli Markov modeli kullanarak insanların üst vücut parçalarını belirlemiş, yatay-izdüşüm olasılık histogramı ve kokusuz parçacık filtresi ile lider tanımayı ve mobil robot ile takibi gerçekleştirmişlerdir [12]. Çalışmadaki lider tanıma yöntemleri insanın giydiği elbiseye bağımlıdır ve liderin çoklu insan grubunda belirlenme yüzdesine ve gece çalışmaya dair herhangi bir bilgi verilmemiştir. Feyrer ve Zell renk ve hareket algılama ile insanı belirlemiş ve stereo kamera ile 3B'de insanın yerini tespit etmişlerdir [13]. Çalışmada stereo kamera kullanarak derinlik bilgisi elde edilmeye çalışmış olsa da renge bağımlı ve sadece görüntüde bir insanın olması gibi kısıtlara sahiptir. Kim ve diğ. 3B insan vücudunun hiyerarşik ağaç modelini oluşturmuş, modeli renkli kamera ile beraber insan belirleme için kullanmış ve parçacık filtresi ile bu modeli takip etmişlerdir [14]. Çalışma sadece bir insanı değil insanın üst vücut parçalarını bulabilse de hareketin görüntü düzlemine paralel olması gerektiği belirtilmiştir ve renge bağlı olduğundan gece çalışmaya uygun değildir. Luo ve diğ. ise insan takibi için LIDAR ve kamera görüntüsünü olasılıksal yöntemleri kullanarak kaynaştırdıkları bir mobil robot sistemi tasarlamışlardır [15]. Çalışmada insanın yüzünün robota dönük olması gerektiği ve yüz tanıma yapılarak takip yapıldığı belirtilmiştir. Li ve diğ. çoklu insan bulma ve takibine odaklanmış ve mobil robot üzerine yerleştirilmiş stereo kameradan gelen görüntüdeki HOG ve maksimum benzerlik oranını insanları belirlemek ve ortalama-kaydırma takibini insanları takip için kullanmışlardır [16]. Çalışmada HOG'un renklere bağımlı olduğu belirtilmiştir. Böhme ve diğ. çok yönlü renkli kamera, stereo kamera ve mikrofonu olan tam ölçekli bir servis robotu tasarlamışlardır [17]. Tasarlanan robot çok yönlü kamera görüntülerini ve insan sesini kullanarak kendini ve insanı konumlandırmaktadır. Ess ve diğ. uzatılmış Kalman filtresi, görsel odometri ve Bayes ağımlı birleştirerek stereo görüşe sahip bir mobil robotta çoklu insan takibi, derinlik ve konum kestirimi için kullanmışlardır [18]. Çalışmada çoklu insan gruplarında her bir insanın ayrı ayrı takip edilebildiğinden bahsedilse de takip yüzdesi hakkında herhangi bir bilgi verilmemiştir. Zhang ve diğ. RGB-D kameralı bir mobil robot ile 3B çoklu insan algısı yapabilecek bir sistem tasarlamışlardır [19]. Sistemde RANSAC algoritması modifiye

edilmiş ve renk histogramı ile ilgili bölgelerin derinliği sınıflandırılmıştır. Çalışma her ne kadar 3B insan algısını geliştirse de RGB-D kameraya bağlı olduğundan gece çalışmaya uygun değildir. Petrović ve diğ. eşitsizlik temelli bölütleme, Hu momentleri ve modifiye Kalman filtresini birleştirerek stereo görüş temelli bir insan takip sistemi tasarlamışlardır [20]. Sistem Zhang ve diğ. çalışmasıyla benzer şekilde 3B insan çıkarımı yapabilse de renk tabanlı olduğundan gece çalışmaya uygun değildir. Jung ve Sukhatme renkli kamera ve LIDAR ile çerçeve fark alma, SIFT ve parçacık filtresi kullanarak gerçek zamanlı hareket ve insan takibi yapabilen bir sistem önermişler, önerdikleri sistemi bir helikopter ve iki farklı mobil robotta test etmişlerdir [21]. Çalışma farklılık olarak çoklu insan takibine odaklansa da LIDAR'a mutlaka ihtiyaç duymakta ve renk bilgisini kullanmaktadır. Kwon ve diğ. renk histogramını kullanarak insanları takip eden stereo görüş sistemi tasarlamışlardır [22]. Sistem insan orta vücudunda elbise desenini öğrenmeye odaklandığından renk bilgisi kullanmak zorundadır ve gece çalışmaya uygun değildir. Chen ve Birchfield ise stereo görüntüden elde edilen Lucas-Kanade özniteliklerini kullanarak eşitsizlik haritaları ile kestirdikleri hareket ile insan takip sistemi önermişlerdir [23]. Önerilen sistem lider tanımayı stereo görüntülerde eşleşen elbise öznitelikleri yardımıyla yapmakta ve renk bilgisine ihtiyaç duymaktadır.

Tablo 1'de ilgili çalışmalar ile bu çalışmanın mobil robot ile lider takibi üzerine önemli özellikler açısından karşılaştırması verilmiştir. Tablo 1 incelendiğinde ilk olarak göze çarpan gece görüş özelliğinin sadece [11]'de termal kamera kullanılarak verilebildiği fakat lideri ayırt edebilme özelliğinin olmadığıdır. Bu çalışmada ise termal kamera yerine kullanılan IR-LED kamera ile hem daha ucuz bir çözüm getirilmiş, hem de termal görüntüye göre çok daha ayrıntılı bir gri görüntü elde edildiğinden lider ayırt etme özelliği de kazandırılmıştır.

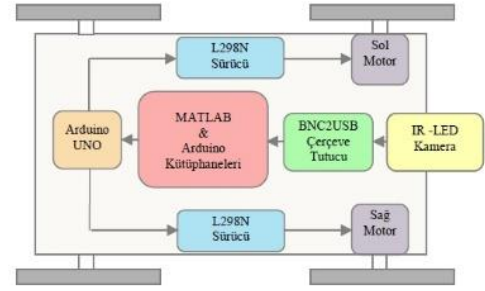
3 BLM ρ

BLM ρ 'ya ait bir görünüm ve donanım yapısı sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir. BLM ρ , öndeki iki teker aktif olarak ayrı ayrı iki DC motor tarafından sürülmekte olan 4 tekerlekli bir yapıya sahiptir ve robot hareketi diferansiyel sürüş sistemiyle tanımlanmaktadır. BLM ρ 'ya ait mekanik özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

BLM ρ , üzerinde Geovision GV-2710 IR-LED kamera taşımaktadır. Bu kamera 36 High-LED barındırmakta, 12V ile beslenmekte, maksimum 0.5A akım çekmekte ve yaklaşık 45 metrelik bir gece görüş mesafesi sağlanmaktadır. Kameradan alınan görüntünün bilgisayara aktarılması için BNC2USB olarak çalışan ve 20 fps hızında görüntü veren Easycap görüntü yakalayıcı kullanılmıştır.



Şekil 2: BLM ρ .



Şekil 3: BLM ρ 'nun donanım yapısı.

Tablo 1: İlgili çalışmalar ile bu çalışmanın karşılaştırması.

	Lider tanıma	Liderin niteliği	Sensörler	Gece görüş	Duruş kestirimi
[10]	✓	Elbise	Renkli kamera, LIDAR	×	×
[11]	×	Yok	Termal kamera	✓	×
[12]	✓	Elbise	Renkli kamera Stereo	×	×
[13]	×	Deri	renkli kamera	×	×
[14]	×	Yok	Renkli kamera Renkli	×	×
[15]	✓	Yüz	kamera, LIDAR	×	×
[16]	×	Yok	Stereo kamera Renkli,	×	×
[17]	✓	Yüz	çok yönlü kamera, mikrofon	×	×
[18]	×	Yok	Stereo kamera	×	✓
[19]	×	Yok	RGB-D kamera	×	×
[20]	×	Yok	Stereo kamera Renkli	×	×
[21]	×	Yok	kamera, LIDAR	×	✓
[22]	✓	Elbise	Stereo kamera	×	×
[23]	✓	Elbise	Stereo kamera	×	×
Bu çalışma	✓	Şekil "H"	IR-LED kamera	✓	×

*: Hayır, ✓: Evet.

Tablo 2: BLM ρ 'nun mekanik özellikleri.

Boyutlar [mm ³]	450×564×230
Sol ve sağ teker arası mesafe [mm]	518
Ön ve arka teker arası mesafe [mm]	496
Teker çapı [mm]	200
Ağırlık [kg]	24.5
n_{\max} (tekerler) [d/d]	14
v_{\max} [cm/s]	14.7

BLM ρ 'da yazılımların yürütülmesi için Core i3 1.2 GHz işlemcili, 3 GB RAM'e sahip bir dizüstü bilgisayar ve Arduino UNO mikrodenetleyici kullanılmıştır. Arduino UNO ATmega328 mikrodenetleyici tabanlı, 8 bitlik 16 MHz hızında çalışan, USB bağlantılı, 6 adet PWM çıkışına sahip açık-kaynak kodlu bir platformdur.

BLM ρ 'da üç farklı yazılım beraber çalışmaktadır. Birinci yazılım MATLAB ile çalışan *Image Processing Toolbox* ve *Computer Vision Toolbox*'ı kullanan, lider üzerindeki şekli bulan ve şeklin görüntü merkezi ve alanını çıkaran lider takip algoritma yazılımı, ikincisi lider takibi için motorlara gerekli komutları hesaplayan ve *Fuzzy Logic Toolbox*'ı kullanan kontrol yazılımı, üçüncüsü ise Arduino UNO üzerinde, Arduino ile MATLAB haberleşmesini sağlayan ve MATLAB tarafından yollanan kontrol komutlarına göre 8 bitlik çözünürlükte L298N motor sürücülere PWM sinyalleri gönderen motor sürme yazılımıdır. Kontrol işaretinin eldesine dair ayrıntılar izleyen bölümde verilmiştir.

4 Şekil eşlemeye dayalı lider takibi

Literatürdeki çalışmalar bir insan grubunda tek bir lider olacağını kabul eder. Buna ek olarak bir lider takip sisteminde insan grubu içinde lideri değiştirebilme özelliği mutlaka sağlanmalıdır ve lider takip sistemi insan uzunluğu, cinsiyeti, saçı veya vücudu gibi özelliklerden bağımsız olmalıdır. Ayrıca, insan takibi ile belirli bir insanı-lideri arkası dönük şekilde takip farklı uygulamalardır. Bu ölçütlerle beraber bu çalışmanın amacı arkası dönük bir insanı karanlık ortamda

kameralı bir mobil robot ile takip edebilmektir. Çalışmada bunu sağlamanın en iyi yolu olarak liderin bir şekil taşıdığı kabul edilmiştir.

Taşınan şekil ortamın karanlık olması durumunda da etkinliğini sürdürebilecektir. Çalışmada şekil olarak "H" seçilmiştir. BLM ρ , görüntü içindeki "H" şeklini şekil eşleme algoritmaları kullanarak bulmakta, şekil merkezini görüntü merkezinde tutmaya çalışarak lideri görüntünün ortasında tutmaya ve şekil alanını sabit tutmaya çalışarak lider ile arasındaki mesafeyi sabit tutmaya çalışmaktadır. Liderle BLM ρ 'ya ait örnek görünüm Şekil 4'te gösterilmiştir. BLM ρ 'nun lider takip şeması ise Şekil 5'te verilmiştir. İzleyen altbölümlerde şemanın adımları, alınan bir örnek görüntü üzerinden açıklanmıştır.

4.1 Görüntü alma-önışleme

Şemanın ilk adımını görüntü alma ve önışleme oluşturmaktadır. IR-LED kameradan alınan görüntü 320x240 çözünürlükte ve 20 fps hızında renkli görüntüdür. Gece modunda IR-LED'ler çalıştığında oluşan görüntüyse daha net görüntü elde edilmesi için kamera yazılımı tarafından gri ölçekli görüntüye dönüştürülmektedir.



(a): Perspektif görünüm.

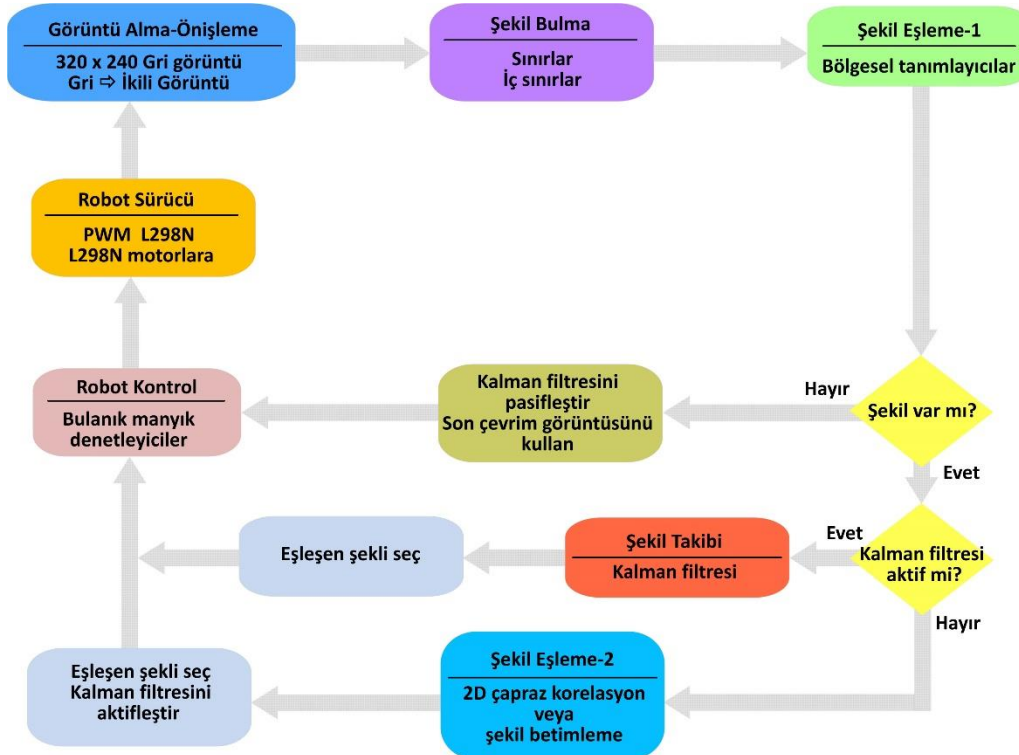


(b): Işıklı kamera görüntüsü.



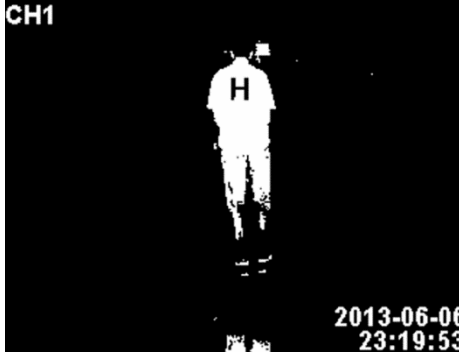
(c): Işıksız kamera görüntüsü.

Şekil 4: Liderle BLM ρ .



Şekil 5: BLM ρ 'nun lider takip şeması.

Önişleme adımının ikinci kısmında ise elde edilen görüntü eşikleme işleminden geçirilerek (eşik=0.9) ikili görüntü haline dönüştürülmektedir. Elde edilen ikili görüntü Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6: Önişlemeden geçmiş ikili görüntü.

4.2 Şekil bulma

Şemanın ikinci adımı ise şekil bulmadır. Herhangi bir ikili görüntüdeki şekiller kapalı sınırlar olarak tanımlanır ve ikili görüntü içindeki sınırlar, dolayısıyla nesnelere, bağlantılı pikseller içinde komşu piksellerden bir veya birden fazlası tanımlı bölge içinde olmayan piksel kümesi olarak tanımlanır. Bağlantılı pikseller ise 4'lü veya 8'li komşu pikseller cinsinden tanımlıdır. Bu tanıma bağlı olarak bir şeklin dışını çevreleyen dış sınır ve şeklin içindeki delik veya deliklerden dolayı oluşan iç sınırlar bulunabilir. MATLAB *Image Processing Toolbox* altında tanımlı olan sınır bulma fonksiyonu Jacob'in durma kriteri ile modifiye edilmiş Moore Komşuluk Takip Algoritması'nı kullanmaktadır [24]. Bu algoritma bir pikselden başlayarak komşu pikselleri saat veya saatin tersi yönünde tarar, eğer piksel değişimi var ise o pikseli sınır olarak atar. Daha sonra sınır kabul edilen pikselden tekrar tarama yapar. Jakob'in durma kriteri ise tekrar tekrar aynı piksellerden geçmeyi önlemek için başlangıç pikseline tekrar aynı yönde geri döndüğünde durmayı sağlar. Algoritma dış sınırları bulduktan sonra bunların içindeki iç sınırları da arar. Bu arama işleminde siyah pikseller arka plan iken beyaz pikseller şekil olarak algılanır. Şekil 7'de, Şekil 6'ya ait görüntüde 8'li komşuluk kullanılarak bulunan şekillere ait dış sınırlar kırmızı, iç sınırlar yeşil ile gösterilmiştir.



Şekil 7: Dış ve iç sınırlar.

4.3 Şekil eşleme-1: Bölgesel tanımlayıcılar

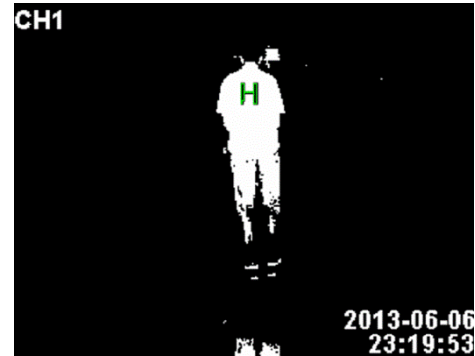
Şekil eşleme bir grup şekil adayları içinde tanımlayıcı adı verilen öznelikleri kullanarak uygun şekli bulmak olarak tanımlanır. Bu tanımlayıcılar sınırlarına dair pikselleri kullanan bölgesel tanımlayıcılar ve şekli oluşturan ve kapsayan tüm pikselleri

kullanan dahili tanımlayıcılar ile tanımlanabilir. Şeklin formu önemli olduğu zaman bölgesel tanımlayıcılar önem kazanırken doku ve renk gibi terimler önemli olduğunda dahili tanımlayıcılar önem kazanmaktadır. Bu çalışmada doku ve renk gibi özellikler ayırt edilmeyeceğinden bölgesel tanımlayıcılara odaklanılmıştır. Burada, Şekil 7'de tanımlı sınırlardan çalışma için gerekli olan "H" şeklini belirlemek adına iç sınırların kullanıldığı belirtilmelidir.

Literatürde şekil eşleme için bölgesel tanımlayıcılar olan zincir kodu, Fourier tanımlayıcıları ve istatistiksel momentler gibi yöntemler bulunmaktadır [26]. Bu çalışmada ise şekil eşleme için şeklin piksel sayısı cinsinden alanı ve çerçeve oranı olmak üzere iki farklı bölgesel tanımlayıcı kullanılmıştır. Lider üzerinde tanımlı "H" şekli hem sabit uzaklığı sağlamak hem de benzer nesnelere kaçınmak amacıyla alanının 50 pikselden daha az olamayacağı ve çerçeve oranının 0.526 ile 1.1 arasında olması gerektiği şeklinde tanımlanmıştır. Bu tanımlamaya ilişkin mantıksal kural (1) ile verilmiştir:

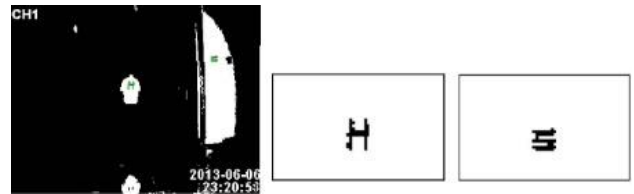
$$S(i) = \{(A(S(i)) > 50) \wedge (1.1 > AR(S(i)) > 0.526)\}, \quad (1) \\ \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$$

Burada, n görüntüdeki şekil sayısı, i şekil indeksi, $S(i)$ değerlendirilen şekil, $A(S(i))$ şeklin alanı, $AR(S(i))$ ise şeklin çerçeve oranıdır. (1) uygulandıktan sonra Şekil 7'de kalan aday şekil Şekil 8'de yeşil ile gösterilmiştir.



Şekil 8: Bölgesel tanımlayıcı sonrası kalan şekil.

Şekil eşleme için (1) uygulandığında ortaya çıkan aday şekil sayısı 1 olduğunda bu şekil eşleşen şekil olarak kabul edilir. Bununla beraber Şekil 9'da gösterildiği üzere (1) kuralına uyan ve iki veya daha fazla aday şeklin ortaya çıktığı durumda ikinci bir eşleme yöntemi kullanılmalıdır. Bu çalışmada yöntem olarak 2B çapraz korelasyon ve şekil betimleme yöntemleri seçilmiş ve kullanılmıştır.



(a): Örnek görüntü üzerinde yeşil aday şekiller. (b): Birinci aday şekil. (c): İkinci aday şekil.

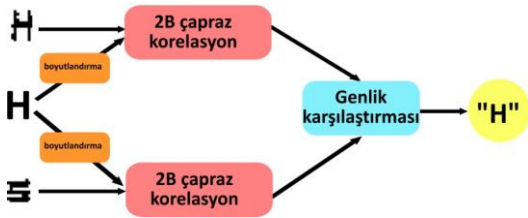
Şekil 9: Bölgesel tanımlayıcılar sonrası aday şekiller.

4.4 Şekil eşleme-2: 2B çapraz korelasyon

İki sinyal dizisinin benzerliğini tanımlamak için kullanılan çapraz korelasyon 2B hali ile iki matris arasındaki benzerliği ve ikili haldeki iki şekil arasındaki benzerliği tanımlayabilir [24],[25]. 2B çapraz korelasyon birbirine boyut olarak eşit olan matrisler için tanımlanabilir ve sonuç korelasyon katsayısı olarak adlandırılır:

$$C_k = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (A(i,j) - m(A))(B(i,j) - m(B))}{\sqrt{(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (A(i,j) - m(A))^2)(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (B(i,j) - m(B))^2)}} \quad (2)$$

Burada A, B eşleştirilen şekilleri, $M \times N$ piksel olarak şekil boyutlarını, $A(i, j), B(i, j)$ şekillerin piksel değerlerini, $m(A)$ ve $m(B)$ A ve B şekillerinin ortalama piksel değerlerini ve C_k korelasyon katsayısını tanımlamaktadır. 2B korelasyonun işleyişinde, önce korelasyona sokulacak şekiller aynı boyutta olmak üzere yeniden boyutlandırılmalıdır. Çalışmada aday şeklin piksellerini bozmamak adına hedef şekil olan "H" şekli aday şekille aynı boyuta sahip olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Daha sonra aday ve hedef şekil 2B çapraz korelasyona sokulmuş ve elde edilen korelasyon değerlerinden büyük olan değere sahip şekil eşleşen şekil olarak tanımlanmıştır. 2B çapraz korelasyonun işleyişi, örnek olarak Şekil 9'daki aday şekiller oluştuğunda Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10: 2B çapraz korelasyon aşamaları.

4.5 Şekil eşleme-3: şekil betimleme

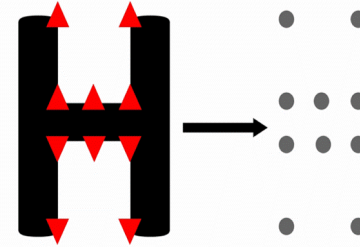
Şekil betimleme, 2B veya 3B şekillerin nokta karşılıklarına göre şekil benzerliğini ortaya koyan bir tanımlayıcıdır [26]. Şekil betimlemeye göre şekil, sınırlarındaki noktaların sıralanışı şeklinde betimlenebilir ve iki şekil arasındaki eşlemeyi bulma en yakın betimlemelere sahip şekiller arasında yapılır. Bu betimlemede bir şekildeki nokta diğer şekildeki bir nokta ile eşleştirilir ve bu eşleme tektir. Eğer şekillerin nokta sayısı aynı değilse az olan şekil üzerine boş noktalar yerleştirilir. Noktaların eşleşmesi sırasında her bir noktanın şekil üzerindeki diğer noktalara göre uzaklık ve açı histogramı çıkarılarak bu histogramların diğer şekil üzerindeki eşleşmesi yapılır. Yöntemin ayrıntıları ve akış şeması [26]'da bulunabilir.

Şekil betimlemenin başarımı şekiller üzerinde seçilen nokta sayısına bağlıdır. Nokta sayısını arttırmak şekil eşleme oranını arttırsa da hesapsal yükü de arttırarak gerçek zamana uygunluğu zora sokmaktadır. Çalışmada bu başarımlar-hesapsal yük pazarlığı göz önünde tutularak çalışmada "H" şekline ait 10 nokta seçilmiş ve Şekil 11'de gösterilmiştir.

4.6 Şekil takibi

Çalışmada kullanılan şekil eşleme yöntemleri şeklin takibini her çevrimde yapmakla beraber şeklin bir sonraki durumunun kestirilmesi eşleme yöntemi kullanmadan şeklin takibini sağlayabilir ve hesapsal yükü azaltabilir. Kestirim algoritmalarından Kalman filtresi özyinelemeli olarak karesel hatayı minimum yapacak şekilde sürecin durumlarını kestiren

etkin bir kestirimcidir [27]. Bu çalışmada ise Kalman filtresi şekil takibi için kestirim yaparak hesapsal yükü azaltmak amacıyla için kullanılmıştır.



Şekil 11: Şekil betimleme için seçilen noktalar.

Kalman filtresinin şekil eşleme yeteneği bulunmamaktadır. Bununla birlikte filtrenin yaptığı, bulunan aday şekillerden daha önceki çevrimde eşleşen şekle ait merkezine göre aday şekillerden merkezi uygun bir kestirim görüntü çerçevesi içinde kalanı eşleşen şekil olarak seçmektir. Şekillere ait tüm noktalar seçilmeden sadece aday şekillerin ağırlık merkez noktaları kestirim için kullanılmaktadır. Uygun aday bulunamadığında ise tekrar şekil eşlemeye dönülmektedir. Kalman filtresi adımları ve matrisleri sırasıyla aşağıda verilmiştir:

$$\hat{x}_k^- = A \cdot \hat{x}_{k-1}^- + B u_{k-1} \quad (3)$$

$$P_k^- = A P_{k-1}^- A^T + Q \quad (4)$$

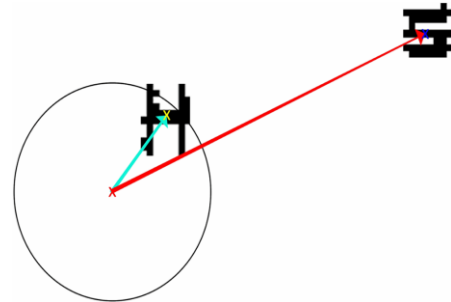
$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \quad (5)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H \hat{x}_k^-) \quad (6)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^- \quad (7)$$

Burada, $\hat{x}_k = [\hat{x}_{merkez}; \hat{y}_{merkez}]$ aday şeklin merkez kestirimi, $A = [1 \ 0; 0 \ 1]$ durum matrisi, $P_k = 1$ kestirim hata kovaryansı, $Q = 1$ gürültü kovaryansı, $R = 1$ ölçüm gürültü kovaryansı, K_k Kalman kazancı ve z_k bir önceki görüntü çerçevesinde eşleşen şeklin merkezidir.

Çalışmada ani lider hareketlerinde şekli kaçırmamak için, kestirim çerçevesi olarak 20 piksellik bir daire çerçeve seçilmiştir. Bu çerçeve içinde kalan şekil uygun şekil olarak gösterilmiştir. Şekil 9a'da örnek için uygun olan ve olmayan şekiller için Kalman filtresi ve kestirim çerçevesine göre durumlar Şekil 12'de gösterilmiştir. Sarı ve mavi işaretler aday şekillerin ağırlık merkezlerini, kırmızı işaret bir önceki karedeki eşleşen şeklin ağırlık merkezini göstermektedir.



Şekil 12: Kalman filtresi ile dairesel çerçeve tanımı.

4.7 Görsel geribeslemeli kontrol

Çalışmada BLM ρ 'nun amacı IR-LED kameradan alınan görüntüde lider olarak tanımlanan şekil ile eşleşen şekli görüntü merkezinde tutmak ve liderle mesafeyi sabit tutmak için şekil alanını sabit tutmaktır. Şekli görüntü merkezinde tutarken robot kontrol işaretinde salınma sebep olmamak adına yatayda 150-170 piksel arası ölü bandlı bir piksel aralığı tanımlanmıştır. Robotla lider arasındaki mesafeyi sabit tutmak için ise "H" harfi alanın değeri gözönünde bulundurulmuş, alanın 180 piksel olduğu durum lidere sabit uzaklık olarak alan bu değerden büyük olduğunda durması istenmiştir. Bu uzaklık liderin tam ortada olması durumunda yaklaşık 2 m'ye karşılık gelmektedir.

BLM ρ 'nun hareket kontrolü için şekil alanına ve ölü band aralığına uzaklığına göre bir bulanık mantık denetleyici tasarlanmıştır ve kapalı çevrim halinde görsel geribeslemeli kontrolü Şekil 13 ile gösterilmiştir. Burada, görsel geribesleme ile kontrol yapıldığından mobil robota dair dinamiklere yer verilmediği belirtilmelidir.



Şekil 13: BLM ρ 'nun görsel geribeslemeli kontrolü.

Tasarlanan bulanık mantık denetleyici sağ ve sol teker için ayrı bulanık mantık bloklarından oluşmaktadır. Denetleyici giriş olarak şekil alanını ve merkezin ölü band aralığına uzaklığını almakta, çıkış olarak da sağ ve sol teker için ayrı ayrı kontrol sinyal çıkışı üretmektedir.

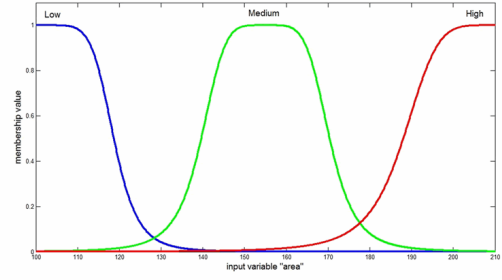
Tasarlanan bulanık mantık denetleyici Sugeno tipindedir, sağ ve sol tekerine ait giriş üyelik işlevleri aynıdır ve gbell fonksiyonu ile tasarlanmıştır. Üyelik işlevleri Şekil 14'te, kural tabanı ise Tablo 3'te verilmiştir. Kural tabanı ve üyelik fonksiyonları görüntüde şeklin durumuna göre BLM ρ 'dan istenen hareketlere göre ayarlanmıştır. Bulunan $U_{sağ}$ ve U_{sol} kontrol işaretleri ise L298N sürücü devresi tarafından sağ ve sol motorları sürececek olan $PWM_{sağ}$ ve PWM_{sol} işaretlerine dönüştürülmüştür.

Tablo 3: Bulanık denetleyici için kural tabanı.

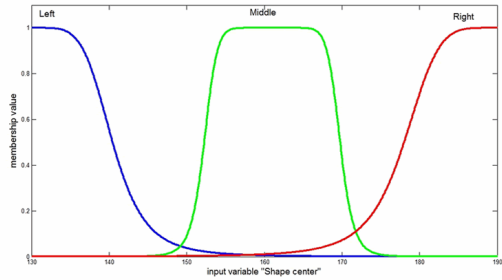
Sol Teker			
Alan/Uzaklık	Solda	Ortada	Sağda
Düşük	Yavaş	Hızlı	Hızlı
Orta	Dur	Yavaş	Hızlı
Yüksek	Dur	Dur	Yavaş
Sağ Teker			
Alan/Uzaklık	Solda	Ortada	Sağda
Düşük	Hızlı	Hızlı	Yavaş
Orta	Hızlı	Yavaş	Dur
Yüksek	Yavaş	Dur	Dur

Dur: 0, Yavaş: 128, Hızlı: 255.

Denetleyicinin doğrusal olmayan karakteristiğini göstermek amacıyla elde edilen kontrol yüzeyleri Şekil 15'te verilmiştir. Burada kontrol yüzeylerinin bölgesel olarak doğrusal yüzeylerden oluştuğu görülmektedir. Bu durum eşleşen şeklin durumuna göre kontrol sinyallerinin bölgesel olarak kısmi doğrusal yapıda olmalarından kaynaklanmaktadır.

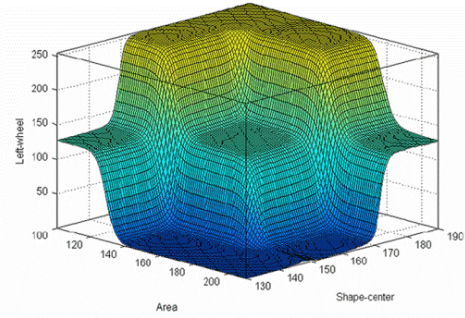


(a): Alan.

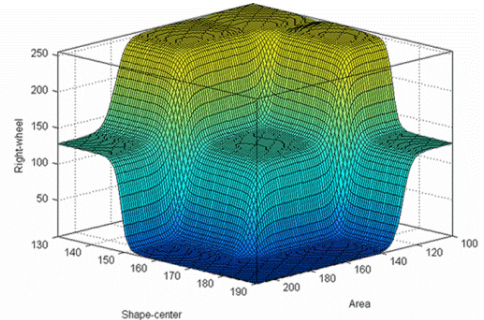


(b): Uzaklık.

Şekil 14: Tasarlanan bulanık denetleyicinin üyelik fonksiyonları.



(a): Sol teker kontrol yüzeyi.



(b): Sağ teker kontrol yüzeyi.

Şekil 15: Denetleyici kontrol yüzeyleri.

5 Deneysel sonuçlar

Bu bölümde BLM ρ 'nun lider takip başarımı deneysel olarak ortaya konulmuştur. Başarım için şekil eşleme oranları ve hesapsal zaman karşılaştırması göz önünde bulundurulmuştur. Sisteme ait bir örnek olması açısından 2B çapraz korelasyon yöntemi ile elde edilen 6037 karelik bir video, kareler halinde alınmış, 190 karede 1 örnek alınacak şekilde 32 kare lider takip şemasına ait adımlarla beraber Şekil

16'da gruplar halinde gösterilmiştir. Her bir grupta birinci satır alınan gri görüntüyü, ikinci satır görüntünün ikili halini, üçüncü satır bulunan şekillerden sadece alan kuralına uyanların siyah ile kapatılmış halini, dördüncü satır ise eğer varsa bulunabilen "H" şekil merkezi ve ölü band aralığını göstermektedir. Gruplar birbirinden beyaz bir çizgi ile ayrılmıştır.

Şekil 16'daki bazı görüntüler incelendiğinde (örn. 1. grup (4,4) ve (4,5)) bölgesel tanımlayıcılar kullanıldıktan sonra herhangi

bir aday şekil olmadığı gözlemlenmektedir. Bu durum özellikle liderin robota göre çok hızlı hareket edip uzakta kaldığı senaryoda ortaya çıkmaktadır. Bu gibi senaryolardaki lider kaybını engellemek için alan tanımlayıcı sınırı dikkatli ayarlanmalıdır fakat alan tanımlayıcının eşik değerinin çok düşürülmesinin de küçük yanlış aday şekillere sebep olacağı unutulmamalıdır. BLM ρ , böyle durumlarda lider takip şemasını sıfırlamakta ve yeni bir aday şekil gelene kadar son şema çevriminde elde edilen sonucu yürütmeye devam etmektedir.



Şekil 16: Örnek video görüntü çerçeveleri ve işlenmiş görüntüler.

Çalışmada bölgesel tanımlayıcılar şekil ön eşleme yöntemi olarak tanımlanmıştır. Bölgesel tanımlayıcılar 6037 kareden 995'inde (%16.48) aday şekil bulamamış, 4943'ünde (%81.88) bir aday şekil bulmuş ve 99'unda (%1.64) birden fazla aday şekil bulmuştur. Bu oranlarda ön eşlemeyi sağlayacak olan bölgesel tanımlayıcılardan sonra aday şeklin olmadığı çerçeve sayısının yadsınamayacak kadar fazla olduğu görülmektedir. Bu oranların bir şekil eşleme uygulaması için doyurucu sonuçlar vermesine rağmen bir mobil robot takip uygulamasında dikkatli kullanılması gerektiği belirtilmelidir. Ayrıca gerçek zamanlı çalışan şekil eşleme yöntemleri literatürde oldukça kısıtlıdır ve bu oranları arttırmak adına yoğunluk, dairesellik oranı gibi farklı bölgesel tanımlayıcılar kullanılabilir fakat bu gibi bölgesel tanımlayıcıların hedef şeklin daha ayırt edici olduğu durumlarda kullanılabilmesi göz önünde bulundurulmalıdır.

Tablo 4'te örnek video için bölgesel tanımlayıcılardan sonra elde edilen şekil eşleme oranları verilmiştir ve 2B çapraz korelasyon ve şekil betimleme yöntemlerinin eşleme oranlarının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Burada 2B çapraz korelasyon liderin yavaş hareketi ile oluşan düşük gürültü ve düşük açılal duruş sayesinde biraz daha iyi çalıştığı görülmüştür. Şekil betimleme ise şekil kenarına ihtiyaç duymaktadır. Bu ise kenar operatörü kullanım ihtiyacından dolayı her bir piksel komşuluğu için en az 3x3 dolu piksel olması gerektiği anlamına gelmektedir. Bu operatörün başarımını arttırmak için operatörden önce açma-kapama ve genişletme operatörleri uygulanabilir fakat bu da şeklin gerçek halini değiştirecektir. Ayrıca şekil betimlemenin başarımını arttırmak için kenar üzerindeki ilgili nokta sayısı artırılabilir fakat bu da gerçek-zamanlı çalışmayı engelleyecektir.

Tablo 4: Örnek video için şekil eşleme oranları.

	Tek aday şekilli	Çoklu aday şekilli	Doğru eşleme oranları
2B çapraz korelasyon	4942	97	5039 (%99.94)
Şekil betimleme	4913	85	4998 (%99.12)

Bu eşleme başarım belirteçlerinin yanında Şekil 16'da tüm gruplardaki birinci satır görüntüleri incelendiğinde iç mekanlarda görsel yönlendirme için literatürde belirtilen liderin silüetinin parlak yüzey üzerinden yansımından etkilenmediği görülmektedir.

Çalışmadaki lider takibi literatürde geçen çoğu çalışmada olduğu üzere iç ortam çalışmasına odaklanmıştır, bu yüzden engebeli ortamda çalışma gözardı edilmiştir. Bununla beraber dış ortamda bu tip bir senaryoda dik ve kısa yokuşlarda liderin kaybolabileceği Graham ve Shillcutt'ın çalışmasında da belirtilmiştir [6].

Liderin hareket yörüngesi ve hızına çalışmada verilmemiş, doğrudan görsel geribesleme üzerinden deneysel sonuçlar değerlendirilmiştir. Bununla beraber liderin farklı yönelimlerde verdiği cevaplar Şekil 16'da örnek olarak ikinci grup 3. sütun ve 5. sütunlarda bulunabilir.

Benzer şekilde BLM ρ , lider ile arasındaki mesafeyi sabit tutmaya çalışsa da liderin farklı hareket hızına bağlı olarak farklı uzaklıklardaki durumlar Şekil 16'da örnek olarak üçüncü grup 1. sütunda ve dördüncü grup 3. sütunda görülebilir. Ayrıca lider ile BLM ρ arasındaki mesafenin sabit tutulması için (1) ile tanımlı bölgesel tanımlayıcılarda farklı parametreler kullanılan senaryolarda Tablo 4'tekine benzer başarımın elde edildiği

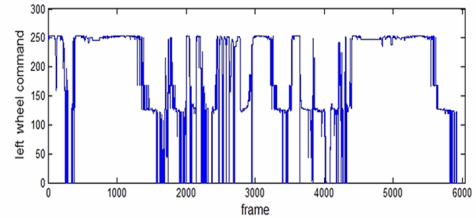
görülmüştür. Ayrıca "H" şeklinden farklı olarak "T" ve "M" şeklini taşıyan lider takip senaryolarında ve bozucu olarak "H" ve "T" şeklinin beraber olduğu senaryolarda benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 5'te Şekil 16'daki örnek bir görüntü için şekil eşleme ve takip yöntemlerinin MATLAB Profiler ile alınan hesapsal zaman karşılaştırması verilmiştir. Tablo 5'teki sonuçlar tüm yöntemlerin 2 fps'den yüksek hızda çalışabileceğini göstermiştir ve bu değerler lider takibi için yeterlidir. Beklediği üzere şekil betimleme açık ara farkla en yüksek hesapsal zamana sahipken Kalman filtresi en düşük zamana sahiptir. Burada Kalman filtresinin herhangi bir eşleme yapmadan bir önceki çevrimde var olan eşleşen şekilden yararlandığı unutulmamalıdır. Ayrıca MATLAB Profiler ile daha detaylı incelendiğinde Tablo 5'teki zamanların çoğunun bulanık denetleyiciye ait çıkarım sistemi ve şekil sınır bulma işlemleri tarafından harcadığı görülmektedir.

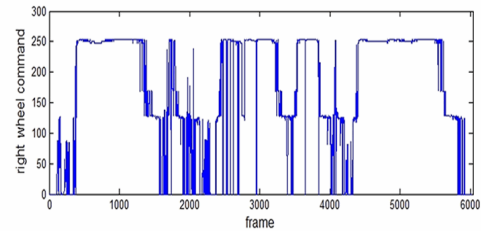
Şekil 17'de Şekil 16'daki örnek video için BLM ρ 'yu kontrol eden denetleyiciye ait sağ ve sol teker denetleyici çıkışları gösterilmiştir. Buradaki işaretlerin yorumlanmasında örnek videodaki lider hareketleri gözönünde bulundurulmalıdır. Örnek video <http://www.youtube.com/watch?v=NpFE1zBGCdc> adresinde bulunabilir. Şekil 17 incelendiğinde her ne kadar merkez için ölü band kullanılsa da kontrol işaretlerinde çatırtı (chattering) görülmektedir.

Tablo 5: Lider takibi için hesapsal zamanlar.

	2B çapraz-korelasyon	Şekil betimleme	Kalman filtresi
Hesapsal zaman (s)	0.320	0.533	0.270



(a): Sol teker çıkışı.



(b): Sağ teker çıkışı.

Şekil 17: Denetleyici çıkışları.

6 Sonuçlar ve gelecek çalışmalar

Bu çalışmada gece görüşe sahip ve şekil eşlemeye dayalı lider takibi yapabilen bir mobil robot sistemi önerilmiş ve gerçekleştirilmiştir. Bu amaç için tasarlanan BLM ρ , üzerindeki IR-LED kamera sayesinde gece görüş özelliğini düşük maliyet ile sağlamaktadır ve termal kameraya göre çok daha ayrıntılı bir görüntü elde ederek daha kolay lider takibi sağlamaktadır. Bu özellikleriyle BLM ρ diğer lider takibi yapan mobil robot çalışmalarının önüne geçmektedir.

Çalışmada lider belirteci olarak "H" şeklinde bir işaret kullanılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde farklı şekillere sahip farklı liderler tanımlanabilir ve liderler arası geçiş mümkün olabilir. Bir şekil taşımak her ne kadar bir kısıt gibi görünse de literatürde bulunan ve Tablo 1'de gösterilen çalışmalara göre BLM ρ 'nun IR-LED kamera ile beraber sağladığı yüksek şekil eşleme ve lider tanıma yüzdeleri uygulamada daha öne çıkan ölçütlerdir.

Çalışmada ilk olarak IR-LED kameradan alınan görüntünün iç sınırları şekil bulma için kullanılmıştır. Daha sonra bölgesel tanımlayıcılar, 2B çapraz korelasyon ve şekil betimleme kullanılarak şekil eşleme yapılmıştır. Alan ve çerçeve oranı olarak tanımlanan bölgesel tanımlayıcılar öncelikle görüntü içindeki aday şekilleri bulmayı sağlamaktadır. Çalışmadaki bölgesel tanımlayıcılarla görüntü içinde mevcut olduğu halde aday şekil bulamama oranı yadsınamayacak kadar yüksektir. Bu oranı düşürmek için QR kod gibi şekiller lider üzerindeki şekiller olarak veya yoğunluk, dairesellik gibi bölgesel tanımlayıcılar ek bölgesel tanımlayıcılar olarak kullanılabilir fakat bu durumda da çok ayrıntılı bir şekil kullanılması gerektiği unutulmamalıdır. 2B çapraz korelasyon yeterli seviyede eşleme oranı sağlasa da bölgesel tanımlayıcıların getirdiği etkiler mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

Çalışmada 2B çapraz korelasyon hem Tablo 4'teki eşleme oranları açısından, hem de Tablo 5'teki hesapsal zaman açısından şekil betimlemeden üstün olarak bulunmuştur. Bu sonuç, liderin üzerindeki şeklin liderin duruş açısına göre ancak belirli bir perspektifte olabileceğine istinaden elde edilmiştir. 2B çapraz korelasyonun dönmeden bağımsız bir öznelik sınıflandırıcı olmadığı [25]'de belirtilmiştir fakat sınırlı dönem için bu durum geçersizdir.

Çalışmada Kalman filtresi eşleme sonrası lider takibinde hesapsal yükü azaltmak için kullanılmıştır. Tablo 5'teki hesapsal zaman sonuçlarını bu yaklaşımı desteklemektedir.

Çalışmada liderin duruşunun sabit uzaklık hatalarına sebep olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu hatadan sakınmak için, şeklin ve dolayısıyla liderin yönelimi de elde edilmelidir. Gelecek çalışmalarda, yönelim bilgisini veren şekil eşleme yöntemleri kullanılacak ve daha hassas bir lider takip sistemi elde edilecektir.

7 Kaynaklar

- [1] Roh S, Choi HR. "Differential-Drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines". *IEEE Transactions On Robotics*, 21(1), 1-17, 2005.
- [2] Fehlmann WL, Hinders MK. *Mobile Robot Navigation with Intelligent Infrared Image Interpretation*. Londra, İngiltere, Springer Science & Business Media, 2009.
- [3] Birk A. "RoboCupRescue-Robot league team IUB Rescue, Germany". *RoboCup 2004*, Almanya, 27 Haziran 2004.
- [4] Caballero AF, Castillo JC, Cantos JM, Tomás RM. "Optical flow or image subtraction in human detection from infrared camera on mobile robot". *Robotics and Autonomous Systems*, 58(12), 1273-1281, 2010.
- [5] Motai Y, Kumarjha S, Kruse D. "Human tracking from a mobile agent: Optical flow and kalman filter arbitration". *Signal Processing: Image Communication*, 27(1), 83-95, 2012.
- [6] Graham J, Shillcutt K. "Robot tracking of human subjects in field environments". *International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, Nara, Japonya, 19-23 Mayıs 2003.
- [7] Bellotto N, Hu H. "Vision and laser data fusion for tracking people with a mobile robot". *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Kunming, Çin, 17-20 Aralık 2006.
- [8] Dunkel CT. Person Detection And Tracking Using Binocular Lucas-Kanade Feature Tracking And K-Means Clustering. MSc Thesis, Clemson Üniversitesi, Clemson, Amerika, 2008.
- [9] Ficht SM. A Person Following Algorithm For Use With A Single Forward Facing Rgb-D Camera On A Mobile Robot. MSc Thesis, Clemson Üniversitesi, Clemson, Amerika, 2012.
- [10] Santos VA, Pardo XM, Iglesias R. "Feature analysis for human recognition and discrimination: application to a person-following behaviour in a mobile robot". *Robotics and Autonomous Systems*, 60(8), 1021-1036, 2012.
- [11] Treptow A, Cielniak G, Duckett T. "Real-Time people tracking for mobile robots using thermal vision". *Robotics and Autonomous Systems*, 54(9), 729-739, 2006.
- [12] Hu C, Ma X, Dai X, Qian K. "Reliable people tracking approach for mobile robot in indoor environments". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(2), 174-179, 2010.
- [13] Feyrer S, Zell A. "Detection, Tracking and pursuit of humans with an autonomous mobile robot". *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Kyongju, Kore, 17-21 Ekim 1999.
- [14] Kim S, Park CB, Lee SW. "Tracking 3D human body using particle filter in moving monocular camera". *18th International Conference on Pattern Recognition*, Hong Kong, Çin, 20-24 August 2006.
- [15] Luo RC, Chen YJ, Liao CT, Tsai AC. "Mobile robot based human detection and tracking using range and intensity data fusion". *IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts*, Hsinchu, Tayvan, 9-11 Aralık 2007.
- [16] Li L, Yan S, Yu X, Tan YK. "Robust multiperson detection and tracking for mobile service and social robots". *IEEE Transactions On Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 42(5), 1398-1412, 2012.
- [17] Böhme HJ, Wilhelm T, Key J, Schauer C, Schröter C, Gross HM, Hemper T. "An approach to multi-modal human-machine interaction for intelligent service robots". *Robotics and Autonomous Systems*, 44(1), 83-96, 2003.
- [18] Ess A, Leibe B, Schindler K, Gool LC. "Robust multiperson tracking from a mobile platform". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 31(10), 1831-1846, 2009.
- [19] Zhang H, Reardon C, Parker LE. "Real-Time multiple human perception with color-depth cameras on a mobile robot". *IEEE Transaction On Cybernetics*, 43(5), 1429-1441, 2013.
- [20] Petrović E, Leu A, Durrant DR, Nikolic V. "Stereo vision-based human tracking for robotic follower". *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10, 1-10, 2013.
- [21] Jung B, Sukhatme GS. "Real-Time motion tracking from a mobile robot". *International Journal of Social Robotics*, 2(1), 63-78, 2010.
- [22] Kwon H, Yoon Y, Park JB, Kak AC. "Person tracking with a mobile robot using two uncalibrated independently moving cameras". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, İspanya, 18-22 Nisan, 2005.

- [23] Chen Z, Birchfield ST. "Person following with a mobile robot using binocular feature-based tracking". *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, Amerika, 29 Ekim-2 Kasım 2007.
- [24] Gonzalez RC, Woods RE, Eddins SL. *Digital Image Processing Using MATLAB*, 2nd ed., Amerika, Gatesmark Publishing, 2008.
- [25] Shih FY. *Image Processing And Pattern Recognition*. IEEE Press-Wiley Publication, New Jersey, Amerika, 2010.
- [26] Belongie S, Malik J, Puzicha J. "Shape context: A new descriptor for shape matching and object recognition". *Neural Information Processing Systems Conference*, Colorado, Amerika, 27-30 Kasım, 2000.
- [27] Welch G, Bishop G. "An Introduction To The Kalman Filter". Scientific Report, University of North Carolina at Chapel Hill, North Carolina, Amerika, 1995.