

Yer Sezimi ve Özet Bölüt Çizgeleri

Mahmut Demir & H. Işıl Bozma

Akıllı Sistemler Lab., Elektrik ve Elektronik Müh. Bölümü
Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
E-posta: mahmut.demir@boun.edu.tr

Özetçe —Bu makalede, yer sezimleme için bölütlenmiş sahnelerin "bölge bitişiklik çizgeleri (BBÇ)" ile gösterilmesine dayanan yenilikçi bir yaklaşım sunulmaktadır. Ortam içinde hareket eden robotun oluşturduğu bölge bitişiklik çizgeleri üzerindeki uzam-zamansal kısıtlar kullanılarak çizgelerin kümelmesi, dolayısıyla yerin tanımlanması sağlamaktadır. Bu yaklaşımın avantajı, ortam seziminin yanında bölütlenmiş alanlara dayanan, "özet bölüt çizgeleri - (ÖBÇ)" olarak adlandırdığımız, ortamı betimleyen çizgelerin oluşturulmasıdır. Bu çizgeler ortamdaki öğelerin uzam-zamansal ilişkilerini koruduğundan dolayı anlambilimsel analize ve ortamın anlaşılmasına da olanak sağlamaktadır. Referans veri seti üzerinde yapılan deneylerde ortamların güvenilir şekilde sezimlendiği ve ortaya çıkan özet çizgelerin ortamdaki yaygın öğeleri başarılı şekilde modellediği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler—Yer sezimleme, Uzam-zamansal bölütleme, çizge eşleme, topolojik betimleme

I. GİRİŞ

Bu makale topolojik uzamsal bilişde ortaya çıkan görüntü temelli yer sezimleme problemine odaklanmaktadır. Burada, "yer" ifadesi ile kastedilen, ortak algısal özellikleri paylaşan taban noktaları veya görüntüler kümesidir. Robotun yer sezimleyebilmesi için, hareket ederken topladığı görsel verileri her biri bir başka yere tekabül eden kümelerle ayırması gerekmektedir [1], [2]. Bu yüzden, robotun çevresini tanıması için ilk adım olarak gösterilebilir¹. Buna ek olarak, robot her bir sezimlenen yerdeki egemen anlamsal özelliklerin çıkarımını yaparak, ortamı anlayabilir.

Önceki çalışmalar odometrik ve/veya metrik bilginin kullanılıp kullanılmadığına bağlı olarak sınıflandırılabilir. Metrik bilginin kullanıldığı çalışmalar geometrik çıkarım temellidir [1]. Fakat metrik bilginin güvenilirliği her zaman sağlanamayabilir [3]. Alternatif olarak, görüntü temelli yaklaşımlar hiçbir metrik bilgi kullanılmadan sadece görsel bilgiye dayanarak yer sezimi yapmayı amaçlamaktadır. Bu noktada temel yaklaşım yer sezimlemeyi sahne değişimini algılama veya imge setlerini bölütleme problemi olarak ele almaktır. Burada kullanılan yöntemler imgeler arasındaki piksel değeri farkları [4], kenar veya SURF özellikleri [5], dağılım grafiği gösterimi [6] veya optik akış[7] temelli olabilir. Işıklandırma veya bakış açısından kaynaklanan sahne değişimlerini ele almak için, sezimleme aşamasını güvenilirlik ölçütleri [8], olasılık tahminleri [9] veya alınan datanın güvenilirliği [10] gibi kıstaslar takip eder.

¹Yer sezimleme genellikle tanıma aşamasından önce gelir fakat iki aşamanın da birlikte gerçekleştirildiği bazı çalışmalar da bulunmaktadır.

Bu yaklaşımlar yer sezimlemede büyük kolaylıklar arz etse de, sahnelerin bölütlenmesi konusunu hiçbiri ele almamıştır. Oysa ki, sahne bölüt bilgilerini de içeren bir model semantik analiz için – özellikle robotun hareket ve el ile hareket ettirme gibi fiziksel yeteneklerine ihtiyaç duyan uygulamalarda - [11], [12] çok gerekli olabilir. Benzer şekilde, bu model ortam tanıma[13] için de kullanılabilir.

İlginc şekilde, benzer problem video işleme çalışmalarında da ele alınmıştır. Buradaki amaç video sahnelerini içeriğine bağlı olarak zaman ekseninde kümelendirmektir [14][15]. Diğer bir yaklaşım özellikleri ve özelliklerin uzamsal ilişkilerini çizge üzerine kodlamaya dayanmaktadır [16]. Bunun yanında, basit şekilde bölütlenmiş alanları ve alanlar arasındaki bitişiklik ilişkilerini kullanan yöntemler de vardır [17], [18]. Diğer çalışmalarda ise [14], uzam-zamansal kısıtlarla bölütlenmiş bölgelerin çizgeleri ile temsil edilmesi ele alınmıştır. Bununla birlikte, bu çalışmalardaki yaklaşımlar tek imgeyi modelleme üzerine kurulmuştur ve bütün videoyu özetleyecek şekilde nasıl genişletilebileceği yeterince açık değildir.

Bu makalede, video işleme konusundaki çalışmalardan esinlenerek, yer sezimi problemi üzerine 'bölge bitişiklik çizgeleri - BBÇ' temelli bir yaklaşım sunuyoruz. Robotun ortam içinde gezerken perspektif veya Kinect kamera² kullanarak zamansal sürekliliği sağlayacak şekilde ardışık olarak imgeler aldığını, önceden çevre hakkında bir bilgisinin olmadığını ve odometrik bilgiyi kullanmadığını farzediyoruz [19]. Ortam içinde gezinen robot, aldığı her bir imge için "bölge bitişiklik çizgesi - BBÇ" üretmektedir. Yer sezimlemenin bu bitişiklik çizgelerindeki birbiri arasında uyumlu kümelerin bulunmasına dayalı olması, bu çalışmanın özgün tarafını oluşturmaktadır. Bu yaklaşım ile yer sezimlemenin yanında, o yere ait "özet bölüt çizgesinin - ÖBÇ" üretilmesiyle, alandaki yaygın öğelerin uzam-zamansal ilişkilerini kodlayan bir modelin de oluşturulması bu yaklaşımın avantajları arasındadır.

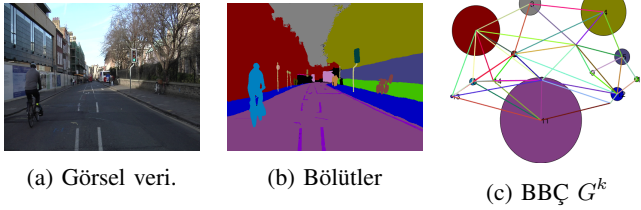
Makale şu kısımlardan oluşmaktadır: İlk olarak Bölüm II'de genel yaklaşım sunulmuştur. Bölge bitişiklik çizgelerinin oluşturulması Bölüm III'te açıklanmıştır. Bölüm IV'te bitişiklik çizgeleri temelli yer sezimleme algoritmasının uygulanması açıklanmıştır. Algılanan yerlerden özet bölüt çizgelerinin nasıl oluşturulduğu ise Bölüm V'te anlatılmıştır. Önerilen yaklaşım anlamsal olarak bölütlenmiş imge setleri üzerinde değerlendirilmiş ve elle etiketlenmiş setler ile kıyaslanmıştır. Makale kısa bir özet ve ileride yapılacak çalışmalar ile sonlanmaktadır.

²Bu tür kameralarda bakış açısı tümyönlü kameralara göre çok daha kısıtlıdır

II. GENEL YAKLAŞIM

Robotu $c \in R^2$ pozisyonunda ve $\alpha \in S^1$ yöneliminde konumlandığımızı düşünelim. $x = [c^T \alpha]^T$ "taban noktası" olarak, $X \subseteq R^2 \times S^1$ "taban uzayı" (tüm pozisyonlar ve yönelimler) olarak tanımlansın. Eğer odometrik bilgi kullanılmıyor veya güvenilir değil ise, taban noktası x 'in koordinatları tam olarak - burada farzedildiği gibi - tespit edilemeyecektir. Şimdi robotun hareket ettiğini düşünelim. Robotun ardışık olarak gittiği taban noktalarını x_k , $k \in \mathcal{K}$ olarak tanımlayalım.

İlk aşama her bir taban noktası x_k 'den alınan imgelerden bölge bitişiklik çizgelerinin (BBÇ) oluşturulmasıdır. Bu çizgelerde düğüm noktaları, bölütlenmiş alanları; kenarlar da bölütlenmiş alanlar arasındaki bitişiklik ilişkilerini belirtmektedir [20]. İkinci aşama, BBÇ dizilerinin eşleştirilmesi ile yer sezinimi yapılmasıdır. Yer sezinimi \mathcal{K} setinin her bir bölümün farklı bir yere tekabül edecek şekilde bölütlenmesi ile gerçekleşecektir. Son aşama ise, her bir tespit edilen yer için özet bölüt çizgelerinin - ÖBÇ'nin oluşturulmasıdır. ÖBÇ o yere ait baskın bölütlerin ve birbirleri arasındaki uzam-zamansal ilişkileri kodlayan çizgelerdir.



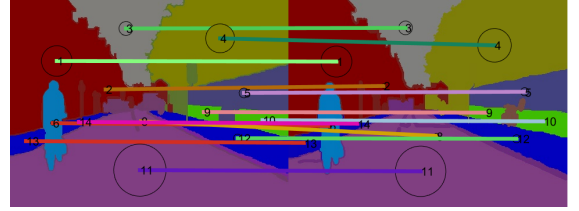
Şekil 1: Örnek taban noktası x_k : İmgeden Bölge Bitişiklik Çizgesine Dönüşüm. Görselleştirme amaçlı olarak, düğümlerin pozisyon, renk ve çapları bölütlerin ağırlık merkezi, ortalama renk ve alanları ile orantılı olarak gösterilmiştir. Kenarlar iki bölüt arasında ortak kenar olduğunu ifade etmektedir.

III. BÖLGE BİTİŞİKLİLİK ÇİZGELERİ

Her bir taban noktası x_k 'den alınan görsel veri $\mathcal{S}^k = \{\mathcal{S}_{ij}^k\}_{i=1}^{N_k}$ olarak N_k bölütten oluşacak şekilde betimlenmektedir. Bölütlenen alanlar ve aralarındaki ilişkiler G^k bölge bitişiklik çizgesinin düğüm ve kenarları ile temsil edilmektedir. BBÇ özniteliksel çizge olarak $G^k = (\mathcal{N}^k, E^k, \mathcal{A}^k)$ şeklinde tanımlanmaktadır. Burada \mathcal{N}^k düğümlere karşılık gelen bölütleri, E^k bölütler arasındaki kenarları ve \mathcal{A}^k ise \mathcal{N}_i^k ve E_{ij}^k 'ya ait özniteliksel değerleri içermektedir. Her bir bölüt $S_i^k \in \mathcal{S}^k$ bir düğüm \mathcal{N}_i^k ile ilişkilidir. Eğer iki bölüt, S_i^k ve S_j^k , ortak kenara sahip ise ilgili \mathcal{N}_i^k ve \mathcal{N}_j^k düğümleri arasında E_{ij}^k kenar ilişkisi oluşturulmaktadır. Her bir düğüm \mathcal{N}_i^k , N_A -boyutlu $a(\mathcal{N}_i^k)$ vektörü ile gösterilir ve ilgili S_i^k bölütünden türetilen alan, ağırlık merkezi, ortalama renk gibi niteliksel değerleri içerir. Kenar özniteliği, w_{ij}^k , ise ilişkili olduğu iki bölütün ortalama renklerinin farklılığı ile ters orantılı olarak değer alır. Örneğin, bir taban noktasında alınan görsel veri Şekil 1a'de gösterildiği üzere olduğunda, bölütlenmiş imge Şekil 1b'de gösterildiği üzere olmaktadır. Buna karşılık oluşturulan BBÇ G^k ise, Şekil 1c de gösterildiği üzeredir.

IV. YER SEZİMLEME

İkinci aşama yer sezimleme adımıdır. Bir yere ait BBÇ'lerin birbirleri ile tutarlı ve benzer olacağı varsayılmaktadır. Dolayısıyla, yer sezinlemede amaç, oluşturulan BBÇ'lerden oluşan $\{G^k\}_{k \in \mathcal{K}}$ kümesini, her bölümün bir yere karşılık gelecek şekilde bölütlenmesidir. Bölümler $\{D_0, \dots, D_m\}$ seti ile gösterilir. Sezimlenen yerlerin endeksleri $M = \{1, \dots, m\}$ ile dizilenmiş şekilde tanımlanmaktadır. Bölümleme işlemi ilişkili BBÇ'ler arasındaki uyumluluğu temel alan en büyük bölümleri belirlemeyi amaçlar. Her bir bölüm tek bir yere ait BBÇ'leri içerir.



Şekil 2: Ardışık iki taban noktasındaki BBÇ'lerin eşleştirilmesi.

Ardışık BBÇ Eşleştirilmesi iki varsayıma dayanmaktadır. İlk varsayım ardışık iki taban noktasından alınan görsel veriler eğer aynı yere ait ise benzer çizge yapılarına sahip olacaktır. Buradan yola çıkarak, ardışık iki taban noktası x^k ve x^{k+1} 'den oluşturulan iki BBÇ'nin düğüm ve kenarları eşleştirilir ve eşleşen BBÇ'lerin eşleşme oranına bakılarak aynı yere ait olup olmadığına karar verilir. Eşleştirme ardışık iki çizgedeki düğüm imzaları karşılaştırılarak yapılmaktadır [16]. Düğüm imzaları olarak adlandırılan yapılar düğüm öznitelikliklerinden, $a(\mathcal{N}_i^k)$, o düğüme bağlı kenar sayısından, $d(\mathcal{N}_i^k)$, ve komşu düğümlere, $C(\mathcal{N}_i^k)$, bağlı kenarların öznitelikliklerinden oluşmaktadır:

$$s(\mathcal{N}_i^k) = \{a(\mathcal{N}_i^k), d(\mathcal{N}_i^k), w_{ij}^k \text{ her } j \in C(\mathcal{N}_i^k)\} \quad (1)$$

İki düğüm imzası arasındaki benzeşmezlik oranı heterojen Öklid örtüşme metriği δ , ile tanımlanmaktadır:

$$\delta(\mathcal{N}_i^k, \mathcal{N}_j^{k+1}) = \sqrt{\sum_{a \in s(\mathcal{N}_i^k) \cup s(\mathcal{N}_j^{k+1})} \delta(s(\mathcal{N}_i^k)_a, s(\mathcal{N}_j^{k+1})_a)^2}$$

Burada $s(\mathcal{N}_i^k)_a$ düğüm imzası olan $s(\mathcal{N}_i^k)$ 'deki a özniteliğinin değerini göstermekte ve $\delta(s(\mathcal{N}_i^k)_a, s(\mathcal{N}_j^{k+1})_a)$

$$\delta(s(\mathcal{N}_i^k)_a, s(\mathcal{N}_j^{k+1})_a) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } a \notin s(\mathcal{N}_i^k) \cap s(\mathcal{N}_j^{k+1}) \\ \|s(\mathcal{N}_i^k)_a - s(\mathcal{N}_j^{k+1})_a\| & \text{diğer} \end{cases} \quad (2)$$

ile tanımlanmaktadır. Her bir G^k ve G^{k+1} ikilisinin düğüm çiftleri arasındaki uzaklıklar hesaplanarak oluşturulan maliyet matrisi Hungarian algoritması ile $O(n^3)$ zamanda çözülebilmektedir. Hungarian metodu ile oluşturulan P permütasyon matrisi iki çizge arasındaki optimum eşlemeyi tanımlamaktadır. Sonuç olarak, iki çizgedeki birbirine benzer özniteliklere ve ilişkilere sahip düğümler ve kenarlar eşleştirilmiştir. Şekil 2'de eşlenmiş ardışık iki BBÇ'ye ait bölütler

gösterilmektedir. Eşleşen düğümler kümesi \mathcal{N}^{k*} şu şekilde tanımlanabilir:

$$\mathcal{N}^{k*} = \{\mathcal{N}_i^k \mid \exists \mathcal{N}_j^{k+1} \in \mathcal{N}^{k+1}, \delta(\mathcal{N}_i^k, \mathcal{N}_j^{k+1}) < \tau_m\} \quad (3)$$

Eşleşme oranı φ_k şu şekilde tanımlanabilir:

$$\varphi_k = \frac{|\mathcal{N}^{k*}|}{|\mathcal{N}^k|} \quad (4)$$

İkinci varsayım ise farklı iki yer arasında geçiş bölgeleri bulunması gerektiğidir. Dolayısıyla, eşleme oranı φ_k düşük olan taban noktaları, geçiş bölgesi olarak tanımlanabilir. Bu karar τ_c eşik değerine göre karar verilir. İki geçiş bölgesi arasında olan taban noktalarının tümü ve ilgili BBÇ'ler yeni bir yeri işaret ederler. Ancak, yer olarak tanımlanabilmeleri için yeterli sayıda olmaları şartı aranır. Buna da sayılarının τ_n 'den büyük olup olmadığına bakılarak karar verilir. Büyük olması durumunda, bu küme yeni sezimlenmiş yer D_{m+1} olarak tanımlanır ve M seti $M = M \cup \{m+1\}$ olarak güncellenir.

V. ÖZET BÖLÜT ÇİZGELERİ

Özet bölüm çizgesi o yer içinde baskın olarak bulunan düğüm ve kenarlardan oluşur. Bu öğeler BBÇ'lerin uzam-zamansal uyumluluğuna bakılarak tespit edilir. Uzamsal uyumda, düğümlerin ağırlık merkezlerinin ve alanlarının önemi vardır. Özet çizgelerinin oluşturulması sırasında küçük alanlı ve o yer içinde hızlı hareket ettiği tespit edilen düğümler silinir. Zamansal uyum düğüm ve kenarların o yere ait BBÇ'ler boyunca ne kadar görüldüğüne bağlı olarak belirlenir. Tüm BBÇ'lerin en az $\% \tau_l$ 'inde yer alan düğümler aday düğümler olarak seçilir. Tüm BBÇ'lerin en az $\% \tau_e$ 'inde yer alan kenarlar aday kenarlar olarak seçilir. Son olarak kenarlar görülme uzunluklarına göre ağırlıklandırılır. Böylece, ortaya çıkan özet bölüm çizgesi herhangi bir yer boyunca baskın olan bölütleri ve ilişkilerini kodlamış olur. Örnek bir ÖBÇ Şekil 3b'te görülmektedir.

VI. DENEYLER

Deneyler CamVid veritabanında olan ve manuel olarak bölütlenmiş imgeler üzerinde gerçekleştirilmiştir [21]. Bölütler anlamsal olarak 32 sınıftan birisi olarak tanımlanmaktadır. Tabii ileride, bölütlemenin otomatik olarak yapılmasına yönelik çalışmalar yapıp, EDISON [22] ve Felzenszwalb-Huttenlocher çizge-kesimi [17] gibi alternatif metodlar denenecektir. Bu çerçevede yine insan tarafından yapılmış yer sezim sonuçları Şekil 3a'da gösterilmektedir. Burada mavi bölgeler sezimlenen yerleri, kırmızı bölgeler ise geçiş bölgelerini temsil etmektedir.

İlk aşama her taban noktasına ait BBÇ'lerin oluşturulmasıdır. Bir sonraki aşama ise yer sezimlerinin yapılmasıdır. Yer seziminde ilk olarak ardışık BBÇ'ler eşleştirilir. Parametre değerleri $\tau_c = 0.003$ ve $\tau_n = 3$ olarak tanımlanmıştır. Eşleştirme sonuçları, ardışık iki taban noktaları olan x_k ve x_{k+1} 'den gelen görsel verilerin benzerliğine bağlı olarak değişmektedir. Tablo I'de benzerlik oranına bağlı olarak örnek 3 farklı durumda yapılan eşleştirmelerin analizleri sunulmaktadır. İki ardışık taban noktasından gelen görsel verilerin içerik olarak çok benzer olduğu ilk örnekte, x_k taban noktasındaki BBÇ'de 22 bölüm bulunmaktadır. Bu bölütlerin, ardışık x_{k+1} taban noktasındaki BBÇ'deki bölütlerle aynı olduğu

manuel olarak tespit edilmiştir. Otomatik olarak yapılan BBÇ eşleştirmesinde ise, 20 bölümün iki ardışık BBÇ'de eşleştirildiği görülmektedir. Dolayısıyla, %90 oranında bir doğruluk oranı vardır. Orta benzerliğe sahip iki ardışık taban noktasındaki BBÇ'lerin eşleştirilmesinde durum daha farklı olmaktadır. Burada, ilk taban noktasındaki BBÇ'de olan 21 bölümün 17'sinin bir sonraki BBÇ'de olduğu manuel olarak gözlenmektedir. BBÇ eşleştirmesinde ise, 16 bölüm eşleştirilmektedir. Başarım oranı %94 civarındadır. Benzerliğin az olduğu durumda ise, ilk BBÇ'de olan bölütlerin ancak yarısı bir sonraki taban noktasındaki BBÇ'de bulunmaktadır. Otomatik BBÇ eşleştirmesinde ise bu durum tespit edilebilmektedir. Bu sonuçlar, BBÇ eşleşme oranının iki görsel veri arasındaki benzerlik miktarının ölçümünde kullanılabileceğine işaret etmektedir. Yer seziminde de bu eşleşme oranı kullanılmaktadır.

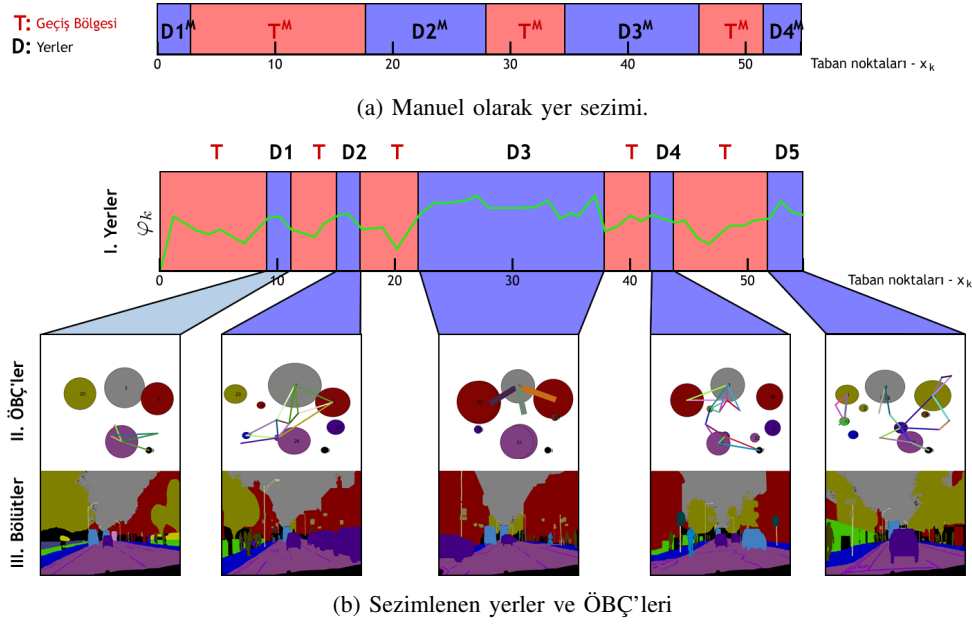
Tablo I: Örnek BBÇ eşleştirmeleri.

Bölüt Sayısı		\mathcal{S}^k ve \mathcal{S}^{k+1} arasındaki benzerlik		
		Çok	Orta	Az
	Toplam	22	21	14
	Manuel Eşleştirilmiş	22	17	7
	BBÇ Eşleştirmesi	20	16	7

Yer sezimleme sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Parametreler $\tau_l = 0.7$ ve $\tau_e = 0.7$ olarak tanımlanmıştır. Bu çerçevede robotun 5 yer sezimi yaptığı görülmektedir. Bu yerler, geçiş bölgeleri ile birbirlerinden ayrılmaktadır. Bu yerlerin, manuel olarak sezimlenen yerler ile büyük oranda örtüştükleri görülmektedir. Sahneler arasında ardışık olarak küçük ama sürekli farklılıkların olduğu bazı durumlarda yer değişimleri tespit edilememektedir. Bu nedenden dolayı D_2^M ve D_3^M tek yer D_3 olarak sezimlenmiştir. İkinci bir husus olarak da, D_3 ve D_4 'de olduğu gibi, dinamik etkenlerden dolayı aslında aynı olan yer bir geçiş bölgesi ile iki yer olarak sezimlenebilmektedir. Bunun nedeni, yer sezimlemenin sadece ardışık imgelerin farkına bağlı olması ve önceden sezimlenen yerler ile karşılaştırma yapılmamasıdır. Sezimleme sonucu ortaya çıkan ÖBÇ'lerin sadece o yerde baskın olan bölütleri içermesi beklenmektedir. Herhangi bir bölümün baskınlığı, o bölümün zamansal sürekliliği, alanı ve konumsal kararlılığı ile ilişkilidir. Diğer bir deyişle, görünüp kaybolan, hızlı hareket eden ve küçük olan bölütler ÖBÇ gösteriminde yer almayacaktır. Şekil 3b'de otomatik olarak üretilen ÖBÇ'ler ve o yeri temsil eden bölütlenmiş imgeler gösterilmektedir. Deney sonuçlarından yola çıkarak, ÖBÇ'lerin yerdeki baskın bölütleri başarılı bir şekilde içerdikleri gözlemlenmektedir.

VII. SONUÇ

Bu makale topolojik uzamsal bilişde ortaya çıkan görüntü temelli yer sezimleme probleminde odaklanmaktadır. Yer sezimleme için bölütlenmiş sahnelerin "bölge bitişiklik çizgeleri" ile gösterilmesine ve ardışık çizgelerin eşleştirilmesine dayanan yenilikçi bir yaklaşım sunulmuştur. Bu yaklaşımın en büyük avantajı "özet bölüm çizgeleri" oluşturarak, yere ait anlamsal analizi imkanı kılmasıdır. ÖBÇ'nin o yer içindeki baskın bölütlerin uzam-zamansal ilişkilerini koruması nedeniyle anlamsal analiz için uygun bir araç olduğu düşünülmektedir. Verisetleri üzerinden gerçekleştirilen deneylerde, bu yaklaşımın hem yer sezimleme hem de sezimlenen yerdeki ana bölütler ve ilişkilerini çizge olarak kodlamada başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın bir sonraki aşamasında, görsel



Şekil 3: Yer sezimleme sonuçları

verinin otomatik bir şekilde bölütlenmesi ve bölütlerin eşleştirilmesi sırasında ortaya çıkacak tutarsızlıkların – hareket eden nesnelerin eşleştirilmesi, bir bölütün ikinci sahnede birden çok bölüte ayrılması veya bölütlerin birleşmesi – giderilmesi ele alınacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu proje TÜBİTAK EEEAG 115E380 projesi tarafından desteklenmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] P. Beeson, N. K. Jong, and B. Kuipers, "Towards autonomous topological place detection using the extended voronoi graph," in *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut. (ICRA)*, pp. 4373–4379, 2005.
- [2] A. Chella, I. Macaluso, and L. Riano, "Automatic place detection and localization in autonomous rob.," in *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Rob. and Sys. (IROS)*, pp. 741–746, 2007.
- [3] E. Remolina and B. Kuipers, "Towards a general theory of topological maps," *Artificial Intelligence*, vol. 152, no. 1, pp. 47 – 104, 2004.
- [4] Y. Matsumoto, M. Inaba, and H. Inoue, "Visual navigation using view-sequenced route representation," in *IEEE Int. Conf. on Rob. & Aut. (ICRA)*, pp. 83 – 88, 1996.
- [5] H. Korrapati, Y. Mezouar, and P. Martinet, "Efficient Topological Mapping with Image Sequence Partitioning," in *ECMR*, pp. 1–6, 2011.
- [6] J. W. Jang and I. K. Oh, "Performance evaluation of scene change detection algorithms," in *Fifth Asia-Pacific Conf. on Communication*, vol. 2, pp. 841–844 vol.2, 1999.
- [7] N. Nourani-Vatani and C. Pradaliar, "Scene change detection for vision-based topological mapping and localization," in *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Rob. and Sys. (IROS)*, pp. 3792–3797, 2010.
- [8] J. Martinez-Gomez and B. Caputo, "Towards semi-supervised learning of semantic spatial concepts," in *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut. (ICRA)*, pp. 1936–1943, 2011.
- [9] A. Ranganathan, "Pliss: Detecting and labeling places using online change-point detection.," in *Rob.: Science and Systems*, 2010.
- [10] H. Karaoguz and H. I. Bozma, "Reliable topological place detection in bubble space," in *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut. (ICRA)*, pp. 697–702, 2014.
- [11] S. Vasudevan and R. Siegwart, "Bayesian space conceptualization and place classification for semantic maps in mobile rob.," *Rob. and Aut. Systems*, vol. 56, no. 6, pp. 522–537, 2008.
- [12] S. Sengupta, P. Sturges, P. H. Torr, et al., "Automatic dense visual semantic mapping from street-level imagery," in *Int. Conf. on Intell. Rob. and Sys. (IROS)*, pp. 857–862, 2012.
- [13] A. Ranganathan and F. Dellaert, "Semantic modeling of places using objects," in *Proc. of the Rob.: Science and Systems Conf.*, vol. 3, pp. 27–30, 2007.
- [14] J. Lee, J. Oh, and S. Hwang, "Strg-index: Spatio-temporal region graph indexing for large video databases," in *Proc. of the ACM SIGMOD Int. Conf. on Management of Data*, pp. 718–729, 2005.
- [15] E. Galmar, T. Athanasiadis, B. Huot, and Y. Avrithis, "Spatiotemporal semantic video segmentation," in *IEEE 10th Workshop on Multimedia Signal Processing*, pp. 574–579, 2008.
- [16] S. Jouili, I. Mili, and S. Tabbone, "Attributed graph matching using local descriptions," in *Adv. Concepts for Intell. Vision Sys.*, pp. 89–99, 2009.
- [17] P. F. Felzenszwalb and D. P. Huttenlocher, "Efficient graph-based image segmentation," *Int. J. of Computer Vision*, vol. 59, no. 2, pp. 167–181, 2004.
- [18] A. Trémeau and P. Colantoni, "Regions adjacency graph applied to color image segmentation," *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 9, no. 4, pp. 735–744, 2000.
- [19] H. Karaoguz, H. Bayram, and H. I. Bozma, "Communication integrated control architecture in multirobot systems," *Workshop on Towards Fully Decentralized Multi-Robot Systems: Hardware, Software and Integration, ICRA*, 2013.
- [20] C.-W. Ngo, Y.-F. Ma, and H.-J. Zhang, "Video summarization and scene detection by graph modeling," *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 296–305, 2005.
- [21] G. J. Brostow, J. Fauqueur, and R. Cipolla, "Semantic object classes in video: A high-definition ground truth database," *Pattern Recognition Letters*, vol. 30, no. 2, pp. 88–97, 2009.
- [22] C. Christoudias, B. Georgescu, and P. Meer, "Synergism in low level vision," in *16th Int. Conf. on Pattern Recognition*, vol. 4, pp. 150–155 vol.4, 2002.