



**Araştırma Makalesi / Research Article**  
**GEZGİN ROBOTLAR İÇİN GÖRSEL TEMELLİ YÖNELİM VE ORTAM**  
**AÇIKLIK BİLGİLERİNİN KESTİRİMİ**

**Özgür ERKENT\***, **H. Işıl BOZMA**

*Boğaziçi Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Akıllı Sistemler Lab., Bebek-İSTANBUL*

**Geliş/Received: 06.02.2013 Kabul/Accepted: 13.05.2013**

---

**ÖZET**

Bir gezgin robotun, bulunduğu ortamı görsel veri temelli olarak betimleyerek kendini konumlandırabilmesi, yöngüdü benzeri tüm işlevleri için son derece kritik bir özelliktir. Ortamların robotun bakış noktasına bağlı olarak etrafını saran bir varsayımsal küre yüzeyine dayandırılan ve benîinci bir yaklaşım olan baloncuk uzayı ile betimlenmesinin tıkız bir gösterim sağladığı önceki çalışmalarımızda gösterilmiştir. Bu makalede, robotun bakış noktasının değişimine bağlı olarak, baloncuk yüzeylerinin dönüşümleri modellenmekte ve bu dönüşüm ile robotun bulunduğu ortama ait yönelim ve ortam açıklığı gibi bilgileri tespit edebileceği gösterilmektedir.

Bu çerçevede, salt yönelim değiştirme ve düzlemsel öteleme hareketleri için iki farklı dönüşüm eşlemlenmesi geliştirilmekte ve bir gezgin robot ile yapılan uygulamalar ile deneysel değerlendirmeleri yapılmaktadır.

**Anahtar Sözcükler:** Gezgin robotlar, görsel temelli yönelim kestirimi.

**VISION BASED ESTIMATION OF HEADING AND SCENE OPENNESS FOR MOBILE ROBOTS**

**ABSTRACT**

The representation of the environment based on visual data is vital to a mobile robot for navigation and localization. Bubble memory, which is an egocentric approach based on hypothetically surrounding a spherical surface around the robot, has been shown to provide a compact representation of the scene from a single viewpoint. In this paper, the transformations of the bubble surfaces are modeled based on the change of the viewpoint of the robot and it is shown that the information regarding the openness of the environment and the orientation with respect to the scene can be determined with this transformation. In this framework, two different transformation maps are developed for pure robot rotation and pure translation and experimental results on a mobile robot are presented.

**Keywords:** Mobile robots, vision based heading estimation.

---

**1. GİRİŞ**

Görsel veri temelli ortam gösterimi, gezgin robotlar için konumlarını bilebilme ve dolayısı ile hareket edebilme için son derece ivedidir. Ortam gösterimi, robotun çevresi ile ilgili bilgi içermekle sınırlı değildir. Aynı zamanda, algılayıcı ufkunun ötesindeki ortamlar ile ilgili bilgileri içerir [1]. Dolayısı ile algısal ve uzamsal bilginin tümleştireildiği bir tanımlamadır.

---

\* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: ozgur.erkent@boun.edu.tr, tel: (212) 359 71 99

Harita modelleri metrik ve topolojik olarak iki ana gruba ayrılabilir. İki-boyutlu doluluk ızgaraları [2], özellik-tabanlı haritalar [3] veya alt harita tabanlı yaklaşımlar [4] gibi modeller ortamın modellenmesine olanak sağlayıp farklı algılayıcı ve ortamlardan gelen verinin birleştirilmesini kolaylaştırır da, yapılandırılmamış, geniş ortamlarda sabit ızgara boyutundan dolayı ve geniş ortamlardaki binlerce durumun yarattığı hesapsal yükün eşlik ettiği problemleri olduğu kanıtlanmıştır. Diğer bir seçenek olarak topolojik haritalar, ortam komşuluk ilişkisiyle (kenarlar) birbirine bağlanan yerlerin (düğümlerin) bir koleksiyonu (çizge) olarak anlatıldığında, yerlerin allotetik karakterizasyonudur [5]. Ancak, topolojik haritaların ne olduğu veya nasıl oluşturulduğu konusunda fazla fikir birliği yoktur ve topolojik haritada düğümler kenarların anlamları algoritmalara bağlı olduğu kadar uygulamaya da bağlı olarak değişebilir [5].

Topolojik haritalar için yer tanıma ve gösterim modülü önemlidir [6]. Yer gösteriminde bir yaklaşım küçük-ölçekli alanlar için metrik gösterim kullanırken daha geniş, alanlar için topolojik gösterim kullanılmaktadır [5]. Ancak metrik haritalar özellikle karmaşıklık sorunundan muzdaripken ortamın melez gösterimlere bölünmesi sorunludur. Görünüm tabanlı modellerde düğümler filtrelere olan yanıtlarla [7], imge koleksiyonlarıyla [8] ve bakışlarla [9] ilişkilendirilirler. Ancak eşleme gelen imgelerdeki yerel farklılıklara karşı duyarlıdır. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için yerler imgeleri parmak izleri [10] ve kelime çantası [11] gibi kompakt tanımlayıcılara çevirerek betimlenirler. Çoğu çalışmada yerlerin özel bir yapısı olmadığı düşünülür, böylece eşleme önceden öğrenilen yerler ile karşılaştırılarak yapılır. Yakın zamanda eşleme işlemini hızlandırmak için ağaç yapılı Bayes ağları ve Chow Liu algoritması gibi hiyerarşik organizasyon şemaları kullanılmıştır [12, 13]. Yine de geniş, ölçekte görsel sözlük hazinesini öğrenmede yüksek sayıda özellik gibi pek çok zorluk vardır [13]. Bu konuyu göz önünde bulunduran bir gösterim baloncuk hafızasıdır [14]. Burada gözlemlenen özellikler yerel  $S^2$ -metrik (küresel) ilişkileri korunarak eş zamanlı olarak kodlanırlar. Son yapılan çalışmalarda baloncuk uzayına dinamik robot pozu ve çoklu görsel özellik tipi eklenmiştir [15]. Robotun konumunun algısal bilgiden çıkarıldığı topolojik haritalarda ortam gösteriminin nasıl yapıldığı ve robotun değişen konumuna göre nasıl dönüşeceği robotun konumlandırılmasında kullanılacağı önemlidir.

Bu makalede baloncuk uzayı gösterimindeki farklı bakış, açılarına bağlı dönüşümler ele alınacaktır. İlk olarak, 2. Bölüm'de baloncuk uzayı kavramı tanıtılacak ve bakış, açısına bağlı baloncuk formülasyonunun matematiksel modeli verilecektir. Bu uzaydaki baloncuk yüzeyleri arasındaki dönüşümler 3. Bölüm'de gösterilecektir. Deneysel sonuçlar 4. Bölüm'de anlatılarak, makale kısa bir özetle sona erecektir.



**Şekil 1.** Solda:  $x = [c \ \alpha]^T$  noktasında bulunan bir robot; Ortada: Sadece bir izleme yönü  $f'$ 'den yerin görünümü; Sağ:  $N_S = 100$  odaklanma sonunda bir görsel filtreye olan yanıt kullanılarak elde edilen baloncuk yüzeyi.

## 2. BALONCUK UZAYI

Dolaşan ve etrafa kafasıyla bakan bir gezgin robot için baloncuk uzayı  $B = P \times S^2$  olarak tanımlanmaktadır.  $P = R^2 \times S^1$  taban uzayını tanımlamaktadır. Her bir taban noktası  $p \in P$  ise  $p = [c \ \alpha]^T$  olarak tanımlanır.  $c \in R^2$  robotun 2-boyutlu çalışma alanında konumunu ve  $\alpha \in S^1$  yönelimini göstermektedir. Her bir baloncuk uzayı noktası  $b = [p \ f]^T$  olarak ifade edilir. Baloncuk uzayından  $P$ 'ye robotun taban uzayına izdüşümü  $\pi : B \rightarrow P$  olarak tanımlanır.

Kesit  $h : P \rightarrow B$  sürekli bir eşlemedir öyle ki  $\forall p \in P, \pi(h(p)) = p$ .  $Im(h)$  imgesinin  $h$  gibi bir kesiti baloncuk olarak adlandırılır. Her baloncuk bir odaklanma kümesine karşılık gelmektedir. Herhangi bir  $b \in B$ 'ye karşılık gelen imge düzlemi  $f$ 'de  $Im(h(p))$ 'ye teğettir.

Robot herhangi bir bakış açısı  $f$  çerçevesindeki imge düzlemi üzerinde kısmen karışık bir dizi görsel filtre uygulayarak ilginç görsel özellikleri çıkarır.  $v_i : P \rightarrow R^{\geq 0}$  bir özellik dönüşüm haritası ve  $N_V \in N^+$  görsel özelliklerin sayısı olmak üzere  $V = \{v_1, \dots, v_{N_V}\}$  dikkat özellikleri kümesini tanımlar.  $V$  seçimi yapılacak göreve ve betimleme moduna göre değişim gösterecektir. Ek- A'da bu çalışmada kullanılan dikkat özellikler kısaca tanımlanmaktadır. Baloncuk yüzeyi  $B_i : P \times R^{\geq 0} \rightarrow S^2 \times R^{\geq 0}$  tabana bağlı ve zaman-değişken bir yüzeydir:

$$B_i(p, t) = \left\{ \left[ \begin{array}{c} f \\ \rho_i(b, t) \end{array} \right] \mid \forall b \in B \quad \pi(h(p)) = p \right\} \quad (1)$$

öyle ki  $\rho_i : B \times R^{\geq 0} \rightarrow R^{\geq 0}$  baloncuk üzerinde görsel özellik  $v_i$ 'ye olan yanıtın Riemannian metriğidir. İlk olarak her  $i$  ve  $b \in B$  için  $\rho_i(b, 0) = \rho_0$  (öyle ki  $\rho_0 \in R^{\geq 0}$ ) olarak ilklendirilen her metriğin sabit bir değeri olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Her bir baloncuk yüzeyi  $R^3$ 'te bir küre olarak ilklendirilir. İkinci olarak değişik baloncuk yüzeyi sayısı  $N_V$  olacaktır.

Yeni görsel unsura dayanan baloncuk yüzeyi aşağıdaki gibi oluşturulur: Robotun  $b \in B$ 'de olduğunu varsayalım, robotun kafası da  $f \in C \ Im(h(p))$   $t + \delta t$ 'ye odaklanmış olsun. Robot mevcut odaklanma noktasında  $V$  kümesini kullanarak gözlemler yapar.  $t + \delta t$ 'de her  $v_i$  yanıtı için baloncuk yüzeyi  $B_i$   $b$ 'de  $v_i$ 'ye yanıtın işlevi olarak bir yerel tümsek oluşturarak değiştirilir. Yerel tümsek oluşturmak bu yamulgan yüzeyde metriği yerel olarak değiştirmeye denk olduğu için karşılık gelen baloncuk metriği  $\rho_i$  şu şekilde tanımlanır:

$$\rho_i(o, t + \delta t) = \rho_i(o, t) + g_b(o) \rho_i(b, t^+) \quad (2)$$

öyle ki tümsek fonksiyonu  $g_b : B \rightarrow [0, 1]$  sürekli bir işlevdir:

$$g_b(o) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } \|b - o\| = 0 \\ 0 & \text{eğer } \|b - o\| = \epsilon \end{cases}$$

Başka bir deyişle,  $v_i$ 'ye  $b$ 'de bir yanıt olan yerel bir tümsek baloncuk yüzeyi  $B_i$ 'ye  $b$ 'nin  $N \in (b)$  ile tanımlanan  $\epsilon$ -komşuluğundadır.

## 3. BALONCUK DÖNÜŞÜMÜ

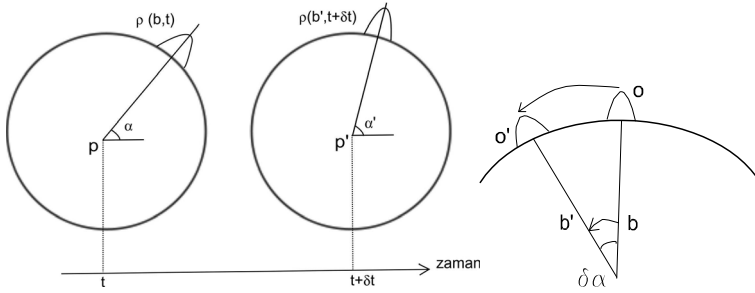
Robotun, Şekil 2-sol'da gösterildiği üzere,  $t$  zamanında  $b \in B$ 'de olsun ve  $t + \delta t$  zamanında  $b' \in B$ 'ye gittiğini varsayalım.

$$b = \begin{bmatrix} p \\ f \end{bmatrix} \quad \text{ve } b' = \begin{bmatrix} p' \\ f' \end{bmatrix} \quad (3)$$

Bu hareket sonucu baloncuk yüzeyi değişmektedir. Bu değişim iki farklı dönüşüm nedeni ile oluşmaktadır.

İlki, robotun  $o \in Im(h(p))$ 'dan  $o' \in Im(h(p'))$ 'ya hareketinden dolayı, özneliliklerin yüzey üzerindeki yerleri değişmektedir. Bundan dolayı  $B_i$  baloncuk yüzeyi robotun hareketine bağlı olarak  $B_i'$ 'ya dönüşmektedir. Bu iki adımda gerçekleştirilebilir: ilk önce her  $o \in Im(h(p))$  noktasında  $t + \delta t$  zamanına kadar oluşan bütün yerel tümsekler kaldırılır. Daha sonra önceki ve dönüştürülmüş baloncuk yüzeyi arasındaki dönüşüm haritası  $d_{b \rightarrow b'} : Im(h(p)) \rightarrow Im(h(p'))$  hesaplanır. Böylece yeni baloncuk noktaları  $o' = d_{b \rightarrow b'}(o)$  bulunabilir. Bulunulan ortama ve dönüşüme bağlı olarak  $d_{b \rightarrow b'}$  bire-bir, bire-çok veya çoka-bir olabilir. Son olarak, bütün kaldırılan tümsekler yeni  $o' \in Im(h(p'))$  yerlerinde şu şekilde oluşturulurlar:

$$\begin{aligned} \rho_i(o, t + \delta t) &= \rho_i(o, 0) \\ \rho_i(o', t + \delta t) &= \rho_i(o, t) \end{aligned} \quad (4)$$



**Şekil 2.** Sol: Robot  $B$ 'de  $b$ 'den  $b'$ 'ye hareket ettikçe, karşılık gelen baloncuk yüzeyleri  $B$ 'de tanımlı metriği değiştirerek değişirler. Sağ: Robot dönüşü. Robot  $B$ 'de,  $b$ 'den  $b'$ 'ye dönerken,  $o$  noktasındaki bir tümsek  $o'$  noktasına taşınıyor.

İkinci olarak, yeni bakış açısında yeni gözlemler yapılır ve baloncuk yüzeyi ilgili noktalarda bu gözlemlere uygun şekilde Denklem. 2'de belirtildiği gibi yerel olarak biçimlenir. Bu dönüşüm haritası formülasyonu daha önce belirtilen duyargaç gürültüsünü, ortamın ışıklandırmasındaki değişimleri ve ölçeklendirme etkilerini gözardı etmektedir. Gerçekte model bu sorunların üzerinden gelecek biçimde yenilenmelidir. Son olarak, baloncuk dönüşümü ancak  $d_{b \rightarrow b'}$  belirlendiği takdirde uygulanabilir. Bu bölümün geri kalan kısmında, farklı tip robot hareketleri için bu dönüşüm modelleri geliştirilecektir.

### 3.1. Robot Yönelimi

İlk önce Şekil 2'de gözüktüğü gibi sadece  $\delta \alpha \in S^1$  kadar dönüş, yapan bir robot düşünelim. Taban vektörleri  $p$  ve  $p'$ 'nin sadece 3. elemanlarının değişeceğini göz önünde bulunduralım. Bu yüzden taban noktaları arasındaki dönüşüm şu şekilde açıklanabilir:

$$p' = p + \begin{bmatrix} 0 \\ \delta\alpha \end{bmatrix}$$

Bir baloncuk yüzey noktasını  $o = [p_o f_o]^T \in Im(h(p)) \in Im(h(p))$  ele alalım. Baloncuk yüzey dönüşümü

$$d_{b \rightarrow b'}(o) = \begin{bmatrix} p_o + \begin{bmatrix} 0 \\ \delta\alpha \end{bmatrix} \\ f_o + \delta f \end{bmatrix} \quad (5)$$

olarak tanımlanır. Burada  $\delta f = [\delta\alpha \ 0]^T$  olur, çünkü yönelim değişimi yatay koordinat dönüşü kadar olacaktır.  $\delta f$ 'in baloncuk yüzeyi üzerindeki tüm noktalar için aynı olduğu unutulmamalıdır. Robotun nesnelere olan uzaklığından bağımsızdır.

### 3.2. Düzlemsel Öteleme

Şimdi de robotun sadece düzlemsel öteleme hareketi yaptığını düşünelim. Bu durumda, taban vektörünün ( $p$  ve  $p'$ ) sadece ilk iki elemanı değişecektir. Bu yüzden taban noktaları arasındaki dönüşüm şu şekilde tanımlanabilir:

$$p' = p + \begin{bmatrix} \delta c \\ 0 \end{bmatrix}$$

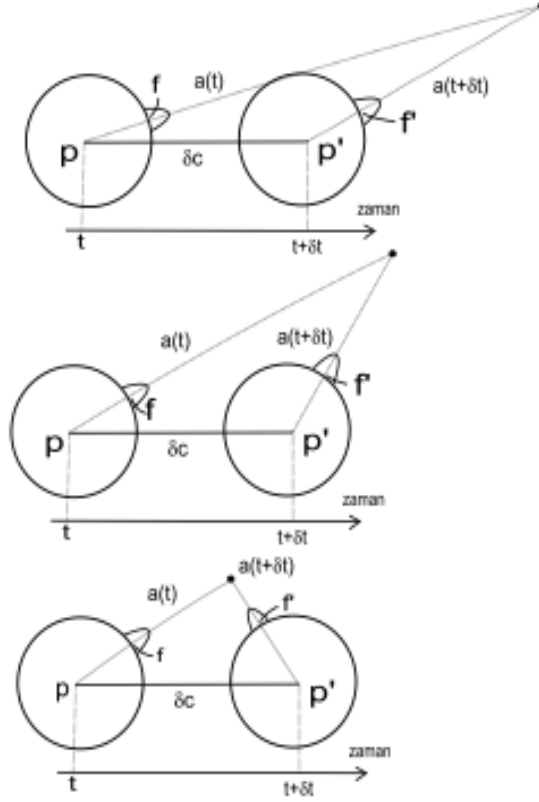
Yine baloncuk yüzeyi üzerinde  $o = [p_o f_o]^T \in Im(h(p))$  noktasını ele alalım. Bu durumda dönüşüm ve çevreye bağlı olarak dönüşüm haritası  $d_{b \rightarrow b'}$  bire-bir, bire-çok veya çok-a-bir olabilir. Hareketin ölçekleme etkisi olabileceği için, yerel komşulukta gözlemlenen bir özellik nesnelerin yakınlığına göre boyut değiştirebilir.

$$d_{b \rightarrow b'}(o) = \begin{bmatrix} p_o + \begin{bmatrix} \delta c \\ 0 \end{bmatrix} \\ f_o + \delta f_o \end{bmatrix} \quad (6)$$

Bu durumda,  $\delta f_o$  bakış yönüne ( $f_o$ ) ve nesnelerin uzaklığına bağlı olacaktır.  $Im(h(p))$  üzerinde  $f_o : Im(h(p)) \rightarrow S^2$  olarak tanımlanan vektör değerli bir işlev olacaktır.  $b$  tabanında  $f$  de görülen uzaktaki bir nesnenin üzerinde bir  $\alpha$  noktası düşünün. Bu noktanın robota olan uzaklığının  $\alpha(t)$  olduğunu varsayalım. Robot  $b'$  noktasına doğru geldikçe robotun  $\alpha(t)$ 'ye olan uzaklığı da  $\alpha(t+\delta t)$  olacaktır ve  $f, f'$ ye hareket edecektir:

$$f' = \arctan \left( \frac{\alpha(t) \sin(f)}{\alpha(t) \cos(f) - \delta c} \right) \quad (7)$$

Şekil 3'te de görüldüğü gibi, gözlemlenen yüzeylerin uzakta olduğu geniş alanlarda  $f' \approx f$  ve dolayısıyla baloncuk dönüşümü asgaridir. Öte yandan, kısıtlı alanlarda, daha küçük hareketler daha büyük baloncuk dönüşümlerine yol açmaktadır.



**Şekil 3.**  $b$  noktasından  $b'$ 'ye öteleme, ve nesnelerin uzaklığına ve öteleme miktarına bağlı olarak baloncuk dönüşümleri. Üst: Geniş alan; Orta: Göreceli daha az uzak alan; Alt: Dar alan

#### 4. DENEYLER

Bu bölümde baloncuk dönüşümünün matematiksel modelinin değerlendirilmesi için yapılan deney sonuçları anlatılmaktadır. Tüm deneyler pan-tilt kameraya sahip bir gezgin robot üzerinde yapılmıştır. Robot, Şekil 4'de gösterilen ve genişlik açısından değişen dört farklı çevrede hareket ettirilmiştir.



**Şekil 4.** Soldan sağa, açıklık miktarı düşen sırada bir dizi değişik sahne. Çok açık, göreceli daha az açık, göreceli kısıtlı ve çok kısıtlı alan

Çizelge 1. Kestirim hatasının yönelim değişim miktarına bağlı olarak değişimi

Deney #	$\delta\alpha$ °	$\delta\alpha - \hat{\delta\alpha}$ °
1	1.4	0
2	4.0	0
3	6.4	0
4	8.4	1
5	11.4	0
6	14.4	1

#### 4.1. Yönelim Dönüşümü

İlk deneyde, robotun tabanı  $p$ 'den  $p'$ 'ye, yönelimi  $\delta\alpha$  kadar döndürülerek değiştirilmektedir. Bu deneyler aynı zamanda dönüşümün robot gerçek ortamda hareket ederken gürültüye karşı gürbüzlüğüne değerlendirmemizi sağlamıştır. Yüzey şekil değiştirme haritası  $d_{b \rightarrow b'}$ . Denklem 5'te tanımlandığı biçimdedir. Her ne kadar  $\delta f$  biliniyor olsa da (çünkü  $\delta f = [\delta\alpha \ 0]^T$ ) aynı zamanda tüm baloncuk yüzeyi çiftlerinin ( $B_i$  ve  $B'_i$ ,  $i = 1, \dots, N_v$ ) ortalama benzerliğini ölçen hata işlevine dayanarak aşağıdaki gibi kestirimi yapılır:

$$J(\delta f, b) = \frac{1}{N_v} \sum_{i=1}^{N_v} \sum_{o \in Im(h(p))} w_i (\rho_i(d_{b \rightarrow b'}(o), t + \delta t) - \rho_i(o, t))^2$$

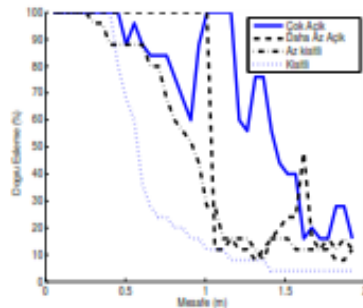
Burada  $w_i$  görsel özellik  $v_i$  için bir ağırlık katsayısıdır. Özelde  $J(\delta f, b)$   $\delta f$  gibi bir kestirim değeri belirlemek için  $\delta f$ 'ye göre optimize edilir:

$$\hat{\delta f} \in \begin{cases} \arg \min_{\delta f} J(\delta, b) & \min_{\delta f} J(\delta f, b) < \tau \\ \emptyset & \text{Diğer durumlarda} \end{cases}$$

Eğer hata işlevi  $J$ , önceden belirlenmiş eşik değeri  $\tau$ 'nun altına düşmezse kestirim yapılamaz. Bu deney altı değişik yerde farklı  $\delta\alpha$  değerleri için tekrarlanmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.1'de gösterilmektedir. Dönüşüm haritası yönelim kestiriminde  $14^\circ$ 'ye kadar yüksek başarımla sağlamıştır. Beklenildiği gibi, orijinal  $B_i$ ,  $B'_i$ 'ye asgari hata ile dönüştürülebilir.

#### 4.2. Öteleme Dönüşümü

İkinci deney setinde, robot düz bir çizgi boyunca hareket ederken kamerasını da  $f = 0$ 'da sabit tutmaktadır. Robotun tabanı  $p$ 'den  $p'$ 'ye hareket ederken, yüzey şekil değiştirme haritası  $d_{b \rightarrow b'}$ ,

Şekil 5. Dört değişik ortam için eşlemenin öteleme miktarı olan  $\|\delta c\|$ 'e bağlı olarak değişimi

Denklem 6'da tanımlandığı gibidir. Bu durumda,  $\delta f_o$  bakma yönü  $f_o$ 'a ve nesnelerin uzaklığına bağlı olacaktır. Robot kafasını hareket ettirmediği için, baloncuk yüzeyinde şekil değiştirme optik eksen etrafında olacaktır, dolayısıyla  $f_o$  işlevinin hesabı yerel komşuluktaki  $N_k(b) \subset B$  içinde kısıtlanabilir. Bu kestirim, tüm baloncuk yüzeyi çiftlerinin ( $B_i$  ve  $B_{i'}$ ,  $i = 1, \dots, N_v$ ) ortalama benzerliğine bağlı olarak yapılır:

$$J(\delta f_o, b) = \frac{1}{N_v} \sum_{i=1}^{N_v} \sum_{o \in N_k(b)} w_i(\rho_i(d_{b \rightarrow b'}(o), t + \delta t) - \rho_i(o, t))^2$$

$J(\delta f_o, b)$   $\delta f_o$ 'a göre enküçültülerek  $\delta f$  kestirimi yapılır.

$$\hat{\delta f} \in \begin{cases} \arg \min_{\delta f_o} J(\delta_o, b) & \min_{\delta f_o} J(\delta f_o, b) < \tau \\ \emptyset & \text{Diğer durumlarda} \end{cases}$$

Eğer  $\|\delta c\|$  göreceli olarak küçükse, o zaman  $\delta f_o$  tüm  $db \rightarrow b'(o)$ 'lar  $N_k(b)$ 'in içinde kalacak biçimde olmalıdır.  $\|\delta c\|$  büyüdükçe  $\delta f_o$  öyle olacaktır ki bazı  $db \rightarrow b'(o) \notin N_k(b)$ . Dolayısıyla,  $\|\delta f_o\|$  hesaplanır,  $N_k(b)$  içinde kalan noktasal dönüşümlerin yüzdesi hesaplanır ve performans ölçümü olarak alınır. Bu oran %100'e ne kadar yakınsa, performans da o kadar iyidir. Deneyler Şekil 4'te gösterildiği gibi dört değişik ortamda gerçekleştirilmiştir. Farklı açıklığa sahip ortamlar için, eşlemelerin öteleme miktarına bağlı olarak değişimleri Şekil 5'de gösterilmektedir. Çok açık ortamda, robotun önünde herhangi bir engel bulunmamaktadır ve dönüşüm  $\|\delta c\| = 1.5m$  olana kadar geçerlidir.

Dalgalanmalar muhtemelen robotun görev sırasında çevredeki insan yürütmesi, kapı açılması gibi dinamik etkenler sonucunda ortamın açıklığının geçici olarak değişmesiyle oluşmuştur. Çok kısıtlı alanda ise  $\|\delta c\| = 0.5m$  gibi kabul edilebilir bir başarımlı vardır ve sonuçlar ortamın açıklık bilgisi ile örtüşmektedir.

## 5. SONUÇ

Bu makalede etrafta dolaşan bir robotun bulunduğu ortamda topolojik haritalar kullanılarak konumlanabilmesi problemi irdelenmektedir. Bu çerçevede, topolojik harita gösterimi için önceden geliştirilmiş olan baloncuk uzayı kullanılmaktadır. Baloncuk uzayı ve ilintili baloncuk yüzeyi kavramları kullanılarak bakış açısına bağlı olan bir model geliştirilmektedir. Bu modelde, robot etrafta dolaştıkça, baloncuk yüzeyinin hangi dönüşümlere tabii olacağı matematiksel olarak tanımlanmaktadır. Salt yönelim ve düzlemsel öteleme için iki farklı dönüşüm geliştirilmiştir. Baloncuk dönüşümleri, salt yön değişimleri için, yönelim değişiminin miktarına bağlıdır. Bu model çeşitli ortamlarda bir gezgin robot üzerinde uygulanmıştır. Salt döngüsel hareketlerde, oldukça basit bir hesaplamayı içermektedirler ve rahatlıkla yönelimin hesaplanması için kullanılabilirler. Salt düzlemsel öteleme durumunda ise, oluşan dönüşüm bulunulan ortama bağlıdır. Dolayısıyla çevrenin açıklığı dönüşümün tahmin edilmesinde kullanılabilir. İleriki çalışmalar, yaklaşımımızın aynı anda yönelim ve öteleme değişimlerinin olduğu durumlar için genişletilmesine odaklanacaktır.

## Acknowledgments / Teşekkür

Bu çalışma Boğaziçi Üniversitesi BAP Projesi 5720 ve Tübitak EEEAG 111E285 tarafından desteklenmiştir.

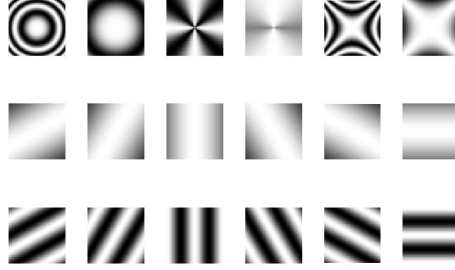


## KAYNAKLAR / REFERENCES

- [1] B. Kuipers, J. Modayil, P. Beeson, M. MacMahon, and F. Savelli, "Local metrical and global topological maps in the hybrid spatial semantic hierarchy," in Proc. IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut (ICRA 2004), 2004, pp. 4851–4845.
- [2] L. Jaulin, "Range-only slam with occupancy maps: A set-membership approach," IEEE Trans. on Robotics, vol. PP, no. 99, pp. 1–6, 2011.
- [3] S. Se, D. Lowe, and J. Little, "Vision-based global localization and mapping for mobile robots," IEEE Trans. on Robotics, vol. 21, no. 3, pp. 364–375, 2005.
- [4] U. Frese, "Treemap: An algorithm for indoor simultaneous localization and mapping," Autonomous Robots, vol. 21, pp. 103–122, 2006.
- [5] E. Remolina and B. Kuipers, "Towards a general theory of topological maps," Artificial Intelligence, vol. 152, no. 1, pp. 47–104, 2004.
- [6] I. Ulrich and I. Nourbakhsh, "Appearance-based place recognition for topological localization," in IEEE Int. Conf. on Robot., vol. 2, 2000, pp. 1023–1029.
- [7] A. Torralba, K. P. Murphy, W. T. Freeman, and M. A. Rubin, "Context-based vision system for place and object recognition," Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision, vol. 1, p. 273, 2003.
- [8] A. Murillo, C. Sagüés, J. Guerrero, T. Goedemé, T. Tuytelaars, and L. V. Gool, "From omnidirectional images to hierarchical localization," Robotics and Autonomous Systems, vol. 55, no. 5, pp. 372–382, 2007, from Sensors to Human Spatial Concepts.
- [9] K. Konolige, J. Bowman, J. Chen, M. Mihelich, Patrick and Calonder, V. Lepetit, and P. Fua, "View-based maps," The Int. J. of Robotics Research, vol. 29, no. 8, pp. 941–957, 2010.
- [10] R. Lamon, I. Nourbakhsh, B. Jensenl, and R. Siegwart, "Deriving and matching image fingerprint sequences for mobile robot localization," in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. IROS 2001, 2001, pp. 1609–1610.
- [11] F. Li and J. Kosecka, "Probabilistic location recognition using reduced feature set," in Proc. IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut. (ICRA 2006), 2006, pp. 3405–3410.
- [12] F. Fraundorfer, C. Engels, and D. Nister, "Topological mapping, localization and navigation using image collections," in Proc. of IEEE/RSJ Conf. on IROS, 2007, pp. 3872–3387.
- [13] M. Cummins and P. Newman, "Appearance-only slam at large scale with fab-map 2.0," The International Journal of Robotics Research, vol. 30, no. 9, pp. 1100–1123, 2011.
- [14] C. Soyer, H. I. Bozma, and Y. I Stefanopoulos, "Apes - biologically motivated attentive robot," Auton Robot, vol. 20, pp. 61–80, 2006.
- [15] O. ErKent and H. I. Bozma, "Place representation in topological maps based on bubble space," in IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut. (ICRA 2012), 2012, pp. 3487–3502.
- [16] J. L. Gallant, C. E. Connor, S. Rakshit, J. W. Lewis, and D. C. Essen, "Neural responses to polar, hyperbolic, and cartesian gratings in area v4 of themacaque monkey," J. Neurophysiology, vol. 76, pp. 2718–2739, 1996.

### **A. Görsel Özellikler**

Dikkati çeken görsel özellikler olarak makak maymunlarının V4 hücrelerindeki yanıt karakteristiklerini yansıttığı bulunan Kartezyen ve Kartezyen olmayan filtrelere dayandırılmıştır [16]. Filtreler değişik frekanslar kullanılarak elde edilmiştir. Filtrelerin matematiksel olarak elde edilme detayları [16] makalesinde bulunabilir. Baloncukların oluşturulmasında, Şekil 6'de gösterilen toplam 18 adet filtre kullanılmıştır.



**Şekil 6.** Bir grup ilgi özellik filtreleri