

Tek Robottan Çoklu Robotlara Ortam Haritalama Map Building: From Single Robot to Multirobot Systems

Hakan Karaoğuz, Özgür Erkent, Haluk Bayram ve H. Işıl Bozma

Akıllı Sistemler Lab.

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Boğaziçi Üniversitesi, Bebek, İstanbul

Özetçe

Bu makalenin amacı, robotlar için ortam haritalama konusunda yapılmış çalışmalarını, tek robottan başlayarak, çoklu robotlara kadar tarayarak kapsamlı ve güncel bir literatür değerlendirmesi sunmaktır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, ortam haritalama problemlerinin iki önemli kısmı bulunduğu görülmektedir. İlk kısım, ortamda nelerin algılanacağı ve haritanın nasıl bir tanımlama ile oluşturulacağıdır. İkinci kısım ise, seçilen bu model ve robottan gelen bilgiler çerçevesinde, haritanın muhakeme için nasıl kullanılacağına ve güncelleneneğine dairdir. Çoklu robotlar ile ortam haritalama çalışmaları, tek robot için geliştirilen harita ve muhakeme yöntemlerinin çoklu robotlar için geliştirilmesini esas aldığı görülmektedir. Bu çerçevede, seçilen makaleler 3 ana başlık altında sırasıyla incelenmekte ve yapılan uygulamalar genel olarak sunulmaktadır. Makale, genel bir değerlendirme ile sonlanmaktadır.

Abstract

This paper presents a survey of map building with a single robot to multirobot systems. Map building is addressed in two related topics. The first pertains to the map models that have been developed while the second is associated with reasoning methods that are used in updating the constructed maps with the incoming sensory data. While initial work in this area has focused on single robots, recent work has started considering multirobot systems. Most such systems basically extend approaches that have been originally developed for single robots to multirobot scenarios. In this paper, we consider map models, reasoning with maps and multirobot map building one by one. Our attempt is to provide a comprehensive coverage of related work. The paper concludes with a discussion of related applications and a general evaluation.

I.Giriş

Robotların, buldukları ortamı mümkün olduğunca kapsamlı olarak algılamaları ve algı temelli haritalar oluşturarak uzamsal muhakemede kullanabilmeleri önemli bir özelliktir. Çevre tarama ve araştırma, hareket, taşıma gibi farklı görevleri otonom olarak yapabilmeleri önemli ölçüde bu özelliğe bağlıdır. Ortam haritalama çalışmaları, ilk olarak tek bir robot temel alınarak başlamıştır. Bu konudaki araştırma ve uygulamalar belli bir ilerleme kaydedince, tek robotun göreceli olarak kısıtlı olan hareket ve algılama kabiliyetinin, birden fazla robotun aynı anda kullanılmasıyla daha genişletilebileceği öngörülmüştür. Bu çerçevede, çoklu robotlar ile, her robotun kendi sınırlı algılarını, diğer robotlar ile paylaşması hedeflenmiştir. Buna ek olarak, sınırlı bilgilerin paylaşımı ile

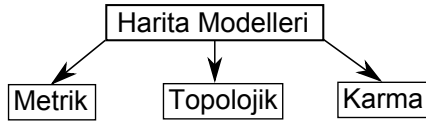
keşfedilen ortamın koordineli ve tümleşik olarak daha kapsamlı algılanmasının mümkün olabileceği düşünülmüştür. Bu makalede, robotlar için ortam haritalama konusunda yapılmış çalışma ve araştırmaları, tek robottan başlayarak, çoklu robotlara kadar tarayan, kapsamlı ve güncel bir literatür değerlendirmesi sunulmaktadır. Literatürde, bu konuda en son yayınlanan tarama makalesi 2002 yılında yapılmış olduğundan [160], çalışmamızda ağırlıklı olarak 2000 yılından sonra yayınlanan makaleler bulunmaktadır. Bu tarama esnasında, incelenen makalelerin seçimi, sunulan yaklaşım, alınan atıflar ve güncellik temel alınarak yapılmıştır. Benzer yaklaşımları kullanan makalelerden bir örnek makale seçilerek liste yaklaşık 75 makaleye indirilmiştir. Çoklu robotlar konusunda yapılan çalışmaların çoğunun, tek robot tarafından yapılan ortam algılama ve haritalama konularındaki çalışmaları temel aldığı görülerek, bu konudaki makaleler de taranarak, yine benzer şekilde yaklaşık 60 makale seçilmiştir. Ayrıca, çoklu robotlar ile yapılan çalışmaların çoğunda, hareket ve iletişim konularının genel olarak ele alındığı belirlendiğinden, keşif, haritalama ve iletişim konularına odaklanan çalışmalar ayrıca taranarak, yaklaşık 65 makale değerlendirme kapsamına alınmıştır. Bu makalelerin bazılarının örtüşmesi nedeni ile çalışmamızın kapsamında yaklaşık 180 makale bulunmaktadır.

Seçilen makaleler incelendiğinde, ortam haritalama problemlerinin iki önemli kısmı bulunduğu görülmektedir. İlk kısım, nasıl bir harita oluşturulacağıdır. Harita modeli, ortamların nasıl tanımlanacağı ile ilintilidir. Bu çerçevede, hangi algılama kiplerinin kullanılacağı, hangi özneliklerin çıkartılacağı ve bu verinin nasıl bir gösterime dönüştürüleceğini içermektedir. İkinci kısım ise, seçilen harita modeli ve ortamdaki gelen algı bilgileri çerçevesinde, haritanın muhakeme amaçlı olarak nasıl kullanılacağına ve nasıl güncelleneneğine dairdir. Çoklu robotlar ve ortam haritalamada yapılan çalışmaların, esas olarak tek robot için geliştirilen harita ve muhakeme yöntemlerinin geliştirilmesini esas aldığı görülmektedir. Bu çerçevede, seçilen makaleler 3 ana başlık altında incelenmektedir. II. bölümde, harita modellerine yönelik çalışmalar sunulmaktadır. III. bölümde ise, tek robot ile haritaların çıkarımı ve kullanımı ile ilgili çalışmalar anlatılmaktadır. Çoklu robotlar ile ortam haritalama ile ilgili çalışmalar ise IV. bölümde açıklanmaktadır. V. bölümde, haritalama uygulamalarından bahsedilmiştir. Makale, özet bir değerlendirme ile sona ermektedir. Kullanımları yeni olan terimlerin, İngilizce karşılıkları Ek VI'da sunulmaktadır.

II.Harita Modelleri

Harita modelleri, robotun uzamsal tanımlamayı nasıl yapacağı ile ilintilidir. Uzamsal gösterim, hem robotun bulunduğu konumdaki ortamı, hem de o anki algısal alanının dışında olup,

önceden ziyaret ettiği veya bir başka kaynaktan alınmış olan farklı ortam bilgisini içerir [94]. Geliştirilen modeller, dünya merkezli veya robot merkezli olabilmektedir [160]. Dünya merkezli haritalar küresel koordinat sistemi içinde oluşturulmaktadır. Robot merkezli haritalar ise ölçüm uzayı içinde tanımlanmaktadır. Geliştirilen modeller, Şekil 1'de gösterildiği üzere üç grupta sınıflandırılabilir: i) Metrik modeller, ii) Topolojik modeller ve iii) Karma modeller. Ancak, topolojik modellerde çeşitli seviyelerde geometrik bilgi içerebildiğinden, metrik modeller ile topolojik modeller arasındaki fark her zaman tam olarak açık olmayabilir.



Şekil 1: Harita Modelleri

A. Metrik Modeller

Metrik modellerde, Kartezyen koordinatlarında bir referans yön sistemi temel alınır ve tüm bilgiler bu sistem içine konumlandırılır. Bu yaklaşımlar, aynı zamanda allosentrik veya dünya merkezli olarak da tanımlanırlar [87]. En çok kullanılan metrik harita, doluluk kafesleridir [46]. Burada, ortam kafeslere bölünerek gösterilir [11], [160]. Kafes tabanlı haritalama yöntemleri, ortamın modellemesini sağlayarak değişik algılayıcılardan gelen verilerin tümeleştirilmesinde kolaylık sağlayıp, yüksek çözünürlükle iyi bir sonuç vermektirler. Ancak, geniş ortamlarda, sabit kafes boyutu nedeniyle, çok fazla sayıda kafes oluşabileceği için, bunların oluşturulması ve planlamada kullanılması hesapsal açıdan oldukça maliyetli olabilir [19], [103]. Dolayısı ile, büyük ölçekli haritalarda döngüleri kapama, haritaları saklama, mevcut yeri önceki yerlerle karşılaştırma ve robotu ilk yeri hakkında bilgilendirmeden genel konumlandırma konularında problemler yaşanmaktadır [128]. Yüksek hesapsal yükü azaltmak için, alt harita tabanlı modeller öne sürülmüştür. Alt haritalar, küçük yerel haritalardır ve bir araya getirilerek büyük harita sistemleri oluşturabilmektedirler. Genellikle çevreyi eşit alt haritalara bölerek çevrenin topolojisini göz ardı ederler [31], [82], [124].

Bu hususlara ek olarak, doluluk kafeslerinin yapısı, kameradan alınan imgeler gibi zengin bilgilerin kaydedilmesine olanak vermemektedir. Buna yönelik olarak, haritaların bilgi içerikleri, çeşitli özniteliklerin yerleri bulunarak ve haritada gösterilerek zenginleştirilmektedir [77], [147]. Burada önemli bir konu, haritaya hangi nirengi noktalarının koyulacağına belirlenmesidir. Yapay işaretler doğal olanlara göre daha karardır. Ancak, yapay işaretler için ortama müdahale gerekir, bu yüzden de daha çok doğal işaretler tercih edilir. Doğal nirengi noktası olarak köşeleri, kapıları ve farklı binaları içeren pek çok farklı öznitelik kullanılmıştır. Ne var ki gerçek zamanlı kullanımda, hangi özniteliklerin kullanılacağı konusundaki çalışmalar devam etmektedir.

B. Topolojik Modeller

Metrik haritalara alternatif olarak topolojik haritalar önerilmiştir [136]. Topolojik haritalar, kaydedilen yerlerin allotetik veya robot merkezli karakterizasyonlarıdır [51], [52]. Topolojik haritada uzamsal bilgi, bitişiklik diyagramları kullanan ve

patikalarla bağlanan yerlerin derlemesi olan bir çizge olarak tanımlanır. Bu çizgenin düğümleri farklı yerleri temsil ederken, kenarlar yerler arasındaki bağıl yönelimleri veya patika uzunluğu gibi bitişiklik ilişkileri temsil ederler. Örnek olarak, [36]'de düğümler haritadaki belli başlı özel noktaları (köşe, kapı, koridor sonu v.s.) temsil ederken, kenarlar, bu düğümler arasındaki geçişlere karşılık gelmektedirler. Burada en önemli husus, yer tanımlarının nasıl yapılacağıdır [94]. Yer tanımları, bağlamsal tabanlı ve görünüş tabanlı olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır.

Bağlamsal tabanlı yaklaşımlar gelen görsel veriyi doğrudan kodlayan yaklaşımlardır. Kullanılan yer tanımları içinde 9×9 , 15×15 piksel gibi bağıl büyük imge parçaları [35], Ayrık Fourier Dönüşümü [127], özimgelere parçalama [80], ana bileşenler analizi [93], dalgacık imge dönüşümü [163] gibi değişen seviyelerde uzamsal entegrasyonlu filtre yanıtlarını kullanılmaktadır. Örneğin, bir çalışmada harita farklı imge kareleri arasında bağıl konum şebekesi olarak tanımlanır [167]. Farklı bir yaklaşımda ise, imge altimgelere bölündükten sonra elde edilen yönlü tekdüze görüntülerin histogramları betimleyici olarak kullanılmaktadır [49].

Diğer yaklaşım olan görünüş tabanlı yaklaşımlarda ise, ilk önce gelen görsel veriden bazı öznitelikler elde edilir ve bu öznitelikler ortamın tanımlanmasında kullanılır [166]. Örneğin, iç mekanların haritalanmasında, tipik olarak düğümler koridor gibi birleşme yerlerini temsil ederken, kenarlar ise bir birleşmeden diğerine olan patikalardır [74]. Bu tip haritalama yöntemlerinde kullanılan özniteliklerden bazıları, köşeler [67], SIFT [147], SURF [14] ve çeşitli filtrelerdir [18]. Örneğin, yer tanımları, [57]'de SIFT öznitelikleri, [119]'da SURF öznitelikleri kullanılarak oluşturulmaktadır. Bu tür öznitelikler, çok kullanılmakla beraber her ortamda istenen başarıyı gösterebilmektedir.

Bu soruna bir çözüm getirmek amacıyla, öznitelikleri farklı dönüşümler ile birlikte kullanarak, daha dayanıklı ve tıkHz tanımlamaların elde edilmesi hedeflenmiştir. Örneğin, kelime çantası yaklaşımında, bir imgedeki ilginç noktalar bulunarak SIFT öznitelikleri ile yüksek boyutlu bir vektör uzayında tanımlandıktan sonra, sayısal olarak nicelenerek bir görsel kelime ile ifade edilir [154]. Bu nicelene sayesinde her bir imge görsel kelimeler histogramı ile gösterilir ve imge eşleme bu histogramlar temel alınarak yapılır [28]. Parmak izinde ise her bir imgedeki ilginç noktalar çıkartılarak farklı bir harf ile gösterilir ve imge bu harflerin dizisi olarak betimlenir [96]. İki farklı imgenin benzerliği ise bu harf dizisinin karşılaştırılması ile hesaplanır. Eğer ortamda küçük değişimler varsa, bundan imgenin sadece bazı noktaları etkileneceğinden, tanımlamada ufak değişimler olacaktır. Dolayısı ile, veritabanındaki arama veya karşılaştırma çok daha dayanıklı olacaktır. Buna yönelik geliştirilen sözlük ağacı, sözcükleri hiyerarşik olarak organize eder [126]. Bir başka yaklaşımda ise, tüm öznitelikleri kullanmak yerine, çok daha küçük bir altkümenin kullanıldığı iskelet modeli önerilmiştir [91], [92]. Ne var ki, görsel sözlüklerin öğretilmesinde, özniteliklerin fazla sayıda olması veya bu sözlükleri oluştururken kullanılan yöntemin görsel bozulmalara karşı dayanıklılığın sağlanması gibi belli zorluklar vardır [29].

Bunlara ek olarak, tüm bu yaklaşımlar, imgenin yapısal bilgisini kaybetme sorunuyla karşı karşıyadır [175]. Yer tanım-

larının uzamsal bilgi içermesi ile bilgi içeriklerinin zenginleşeceği kesin olduğundan, bunu dikkate alan çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan ilki, imgeleri bir küre üzerine izdüşümünün yapıldığı benmerkezi algılama küreleridir [4]. Benzer şekilde, küreyi bir veritabanı yapısı olarak kullanarak verileri saklayan yaklaşımlar önerilmiştir [110], [131]. Tanımlamalar, imgelere küresel bir izdüşüm uygulandıktan sonra, küresel harmonik katsayıları ile yapılarak daha da tıkHz hale getirilmişlerdir [62], [105], [140]. Farklı bir yaklaşım olan baloncuk hafıza modelinde ise, görsel öznitelikler ve aralarındaki uzamsal ilişkiler robot merkezli olarak birlikte kodlanmaktadır [155], [156]. Esasen topolojik temelli olmakla beraber, öznitelikler arasındaki geometrik ilişkiler küresel uzayda kodlandığından, karma bir özelliğe de sahiptir. Baloncuk uzayında ise, baloncuk hafıza modeli, farklı robot konumlarına ve farklı öznitelikleri tanımlayacak şekilde genişletilmektedir [47].

Sonuç olarak, ortak kullanımına karşı, topolojik haritaların tanımına ve nasıl oluşturulduklarına dair bir görüş birliği olmayıp, düğümlemler ile kenarların anlamları kullanılan öznitelikler veya uygulamaya göre değişebilmektedir [136].

C. Karma Modeller

Metrik ve topolojik gösterimlerin karakter olarak birbirinden oldukça farklı olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Metrik haritalar, algısal sınırlar içindeki yapıyı belirttik olarak yakalarken, topolojik haritalar geniş alanın yapısını anlatır. Genel olarak metrik harita, oluşturulduğu her bölgede geometrik olarak çok detaylıken topolojik haritada çevrenin detaylarının eksik olduğunu söyleyebiliriz [160]. Bu sorunları çözmek için küçük ölçekte metrik gösterimin, büyük ölçekte topolojik haritanın kullanıldığı bir melez harita önerilmiştir [16], [94], [164]. Bu yaklaşımda, yerel metrik haritalar doluluk kafesi tabanlıdır. Topolojik haritalar ise düğüm ve kenarlarından oluşan çizgilerdir [40]. Her bir düğüm robot tarafından görülen bir yeri ifade eder ve içinde o bölgeye ait metrik bir yerel harita barındırır. Bu yaklaşımdaki önemli bir sorun, bu bölünmenin tam olarak nasıl yapılacağıdır. Bunun için farklı yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemler, esasen çizge temelli yaklaşımlardır. Örneğin, alt seviyede bir metrik haritadan, izgel topaklama kullanılarak [19] veya çizge bölütleme uygulanarak, üst seviyede görsel tabanlı bir topolojik harita oluşturulmaktadır [182]. Ancak metrik haritalar büyüdükçe bu haritaların oluşturulması gittikçe zorlaşmaktadır. Buna alternatif olarak, ortamın metrik doluluk kafeslerini boş alanın ve ortamın bağlantı yapısının daha tıkHz bir gösterimini sağlayan Voronoi diyagramları önerilmiştir [61]. Ancak pratik uygulamada, bu diyagramların çıkarımları kolay değildir.

III. Harita Oluşturma ve Kullanım

Kendi başına harita oluşturabilme, önceden oluşturulan bir haritada yerini bulabilme veya yeni bir bölgeye girdiğini anlayarak harita güncellemesi yapabilme, robotların otonomisi için gerekli becerilerdendir. Bunun için, robotun sahip olduğu harita modeline uygun muhakeme yapılabilmesi gerekir [160]. Bu muhakemeyi, üzerinde bulunan algılayıcılardan gelen ortam verileri ile, harita modelini kullanarak yapabilir. Bu konuda ilk problem, robotun kendi ortam veya konum bilgilerini, mevcut harita ile nasıl tümleştireceği ve bu tümleştirme çerçevesinde nerede olduğunu nasıl anlayacağıdır.

En basit yaklaşım ile, robotun odometri verisini kullanıp, parekete hesabı yaparak teker devir sayısına göre koordinatlarını belirleyebilir. Teker kayması gibi pek çok sorundan dolayı parekete hesabı kullanarak robot konumlanması düzgün bir şekilde gerçekleştirilemez [26]. Küresel konumlandırma sistemleri gibi mutlak konum sağlayan algılayıcılar ve ataletsel sistemler her ne kadar parekete bir alternatif öneriyor olsalar da, her zaman kullanılamayabilir [103]. Dolayısı ile, robotun kendi ortam bilgilerini çıkarabilmesi pek kolay değildir. Diğer bir husus ise, robotun konum bilgisini kullanmadan bu tümleştirmeyi yapması ve bulunduğu yeri anlamasıdır. Bu yapılırken, önceden hiç bilinmeyen ortamların da anlaşılması ve haritanın yeni bilgiler çerçevesinde güncellenmesi gerekmektedir.

Kullanılan algılayıcı türü ve harita modeline göre birbirinden farklı muhakeme yöntem mevcuttur. Algılayıcı bilgileri odometri, imgeler, uzaklık ölçümleri v.s. gibi verilerdir. Odometri bilgileri, hareket temelli, görsel veya karma olarak sağlanabilir. Yaklaşımlar, kullanılan harita modeline göre, geometrik, topolojik ve karma olarak gruplanabilirler [166]. Geometrik yaklaşımlarda, metrik haritalar ile muhakeme yapılır. Tipik olarak harita gösterimi için iki boyutlu bir doluluk kafesi ve robotun durum dinamiği kullanılır. Robotun konumu, harita koordinatlarına göre kestirilmeye çalışılır. Topolojik yaklaşımlarda ise bitişiklik diyagramı kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde, robotun konumuna tekabül eden diyagram çizgesinin belirlenmesi hedeflenir. Melez yöntemler hem geometrik hem topolojik yöntemleri birleştirirler.

A. Geometrik Haritalar ile Muhakeme

Geometrik yaklaşımlar, metrik haritalar oluşturmaya, kullanmaya veya güncellemeye yönelik yaklaşımlardır. Genel olarak tüm geometrik yaklaşımlar, konumlandırma problemi ile birlikte ele alınır. Konumlandırma, robotun bulunduğu yerin tam olarak belirlenmesi problemi olarak tanımlanır. İkisinin birleşimi eşzamanlı konumlandırma ve haritalandırma (SLAM) sorunu olarak adlandırılır [43]. Gezgin robot konumlandırmasında, çoğu çalışma odometri girdisi kullanarak geometrik konumlandırma yapmaya odaklanmıştır [6], [7]. Önerilen yaklaşımlar, bölgesel ve tümel olarak ikiye ayrılır [146]. Bölgesel teknikler, robotun yön bulması sırasında oluşan odometrik hataları gidermeyi amaçlar. Bu tekniklerin başarımlarından biri robotun ilk konumunun yaklaşık olarak bilinmesi gerekliliğidir. İkinci bir husus ise, robotun konumu kaybedildiğinde tekrar bulunmasının garanti edilememesidir. Bölgesel tekniklere alternatif olarak geliştirilen tümel yöntemlerde amaç, robotun ilk konumu hakkında kesin bir bilgiye sahip olmadan konumunun belirlenmesidir [55]. Örneğin, robotun kendisi tarafından bilinen konumundan alınıp hiç bilmediği, tamamen farklı bir ortama konduğu kaçırılmış robot problemlerinde konumun tekrar bulunmasını mümkün kılar. Buna koşut olarak, bir şekilde harita eşleme ya da nirengi noktası belirlenmesinin yapılması gerekmektedir [59].

Muhakeme sürecinde kullanılan nirengi noktalarının, kamera ile elde edilen imgelerden çıkartılabileceği düşüncesi ile, görsel bilgi tabanlı SLAM yaklaşımları önerilmiştir. Bu yaklaşımları iki ana grupta toplamak mümkündür [104]: i) Öznitelik tabanlı ve ii) Görünüm tabanlı. Öznitelik tabanlı

SLAM'de özniteliklerin yerleri kestirilir ve önceden oluşturulan bir öznitelik gözlemlenerek bir döngü kapama gerçekleştirilir [15]. Öznitelik tabanlı yaklaşımların, özniteliklerin durumlarını kestirme gerekliliği ve hangilerinin seçileceğine karar verilmesi gereksinimi bulunmaktadır. Görünüm tabanlı SLAM'de ise, algılayıcı verisinin alındığı yerlerdeki robot konumları kestirilir. Robotun bağlı konumunun kestirimi, farklı iki zamanda alınan veri kümesi kullanılarak yapılır.

Her iki yaklaşımda da, genel olarak konumu kestirmek için olasılıksal çıkarım yasaları uygulanmaktadır [17]. Bu yasaların uygulanabilmesi için, robot hareketi ve algılayıcı belirsizlikleri modellenir. Ne var ki bu modellerin oluşturulması her zaman mümkün olmayabilir. Buna ek olarak modeldeki gürültünün karakteristiğini belirlemek için otomatik olmayan ölçümlerin yapılması zaman alabilir [17].

Yaklaşımların çoğunda muhakeme yöntemi Bayes filtresi veya türevleri (Kalman, genişletilmiş Kalman, Parçacık filtresi v.b.) temellidir. İlk önerilen muhakeme yöntemlerinden biri, artımlı en büyük olasılırlık temellidir [115], [178]. Bu yöntemde, veri geldikçe, en yüksek olasılıklı robot konumu ve harita Bayes marjinal olasılığının en büyük değeri bulunarak güncellenir. Hesapsal yükü azdır, ancak belirsizlik kavramına sahip değildir. Haritalamada, robotun hareket modelini kullanarak, doğal özniteliklerin seyrek kümesini ve bilgi rehberli aktif ölçüm stratejisini temel alırlar. Ancak tüm bu çalışmalara rağmen, Kalman filtresi ile ilgili aşağıda özetlendiği şekilde bazı sorunlar bulunmaktadır:

- Hesapsal yükün fazla olması nedeni ile gerçek zamanlı uygulamalarda yavaş olabilmektedir. Robot hareket ederken gerçek zamanda ancak sınırlı sayıda öznitelik ele alınabilir. Öznitelik sayısı N olan bir haritada, her yinelemede N^2 parametre içeren matrislerin çarpma ve tersini alma gibi işlemlerin yapılması gerekmektedir [114].

Veri ilişkilendirmesi, Kalman Filtresinin konum kestirimleri için kritik öneme sahiptir. Robotun hareketi sırasında, bir önceki konumda algılanan öznitelikler, yeni konumda algılanan özniteliklerle doğru bir şekilde ilişkilendirilemezse, konum kestirimlerinin başarımı önemli ölçüde düşer. Veri ilişkilendirmesi, ileride III-C nolu kısımda anlatıldığı üzere kendi başına bir alt problemidir.

- Bir başka önemli zorluk ise aynı öznitelikleri farklı yerlerden gözlemlemekten kaynaklanan tutarsız doğrularlardır [53]. Kalman filtresi, mevcut durumun gözlemi hakkında doğrularla yapar. Durum evrildikçe, ölçümlerin doğrularla farklı noktalarla olacaktır. Bu da yinelemenin sonucunda ortaya çıkan haritada tutarsızlıklara yol açar [5].
- Kalman filtresi yaklaşımları gürültü eklenmiş özel durumlara dayanırlar, pratikte ise nadiren bu özel durumlar oluşur.
- Dinamik ortamlarda başarımları oldukça düşüktür [160].

Hesapsal yükün azaltılmasına yönelik olarak geliştirilen yaklaşımlar esasen, robot konum ve nirengi noktaları üzerinden sonsal dağılımı, çarpanlarına ayırıp özyineli olarak hesaplayan yöntemlerdir [114]. Daha yeni çalışmalarda, robotun yörüngesini gösteren bir parçacık kümesi kullanılmakta ve her öznitelik bir küçük genişletilmiş Kalman filtresi ile ilişki-

lendirilmektedir [109].

Bu sorunlardan dolayı geometrik yaklaşımlarda başka muhakeme yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlardan biri beklenti enbüyütme yaklaşımıdır [37]. Bu yaklaşım, Kalman filtresinden farklı olarak, doğrudan veri ilişkilendirme üzerinde odaklanır [38]. Beklenti enbüyütme temelli muhakeme ile, veriler birbirine benzese bile, tutarlı haritalar oluşturulabilir. Bu yaklaşımda, düzleme ve haritalama yaklaşımı, bilgi matrisi temelli olup, döngülü en az kareler eniyilemesi yaparak en optimal robot konum ve özniteliklerin durumlarının kestirimini yapmayı amaçlar [39]. Seyrek genişletilmiş bilgi filtreleri kullanılarak, hesap yükü azaltılmaktadır [7]. Aslında, burada hesaplanan bilgi matrisi, genişletilmiş Kalman filtrelerindeki ortak değişinti matrisinin tersidir [59]. Bilgi matrisi temelli SLAM'deki temel zorluk, tüm veriyi çok defa işleme gereksinimleri olduğundan, Kalman filtrelerinde olduğu gibi haritaları artımlı bir şekilde oluşturamazlar [160]. iSAM filtresi yaklaşımı tüm sistem için bir bilgi filtresi kullanır ve etkili bir çarpanlara ayırma metodu ile filtrenin hızlı artımlı güncellenmesini sağlar [81]. Bilgi matrisinin ayrışmasının güncellenmesinde, sürekli tekrarlanması gereken yüksek maliyetli çarpanlara ayırma işlemi Cholesky çarpanlarına ayırma yöntemi kullanılarak basit hale getirilse de, işlem hala gerçek zamanlı değildir [104].

B. Topolojik Haritalar - Yer Tanıma

Alternatif olarak topolojik haritalar ile muhakemede, anahtar öge yer tanıma modülüdür [166]. Önceden öğrenilen yer tanımlamalarının yerleri temsil ettiğini varsayarak, yer tanıma modülünün amacının mevcut algılama bilgisine en çok benzeyen, önceden öğrenilmiş yeri bulmak olduğunu söyleyebiliriz [165]. Robot her çevrimde, konumu daha önce kaydedilmiş olan görüntü haritasını kullanır. Konumlama sorunundan farklı olarak, tanıma daha önceki konumu hakkında her hangi bir bilgi verilmeden yapılmaya çalışılır. Bunun için genel olarak eniyileme yöntemleri veya destek vektör makineleri gibi standart bir örüntü tanıma yöntemleri kullanılır.

Görünüş tabanlı yaklaşımlarda ise, daha tıkkız betimleyiciler kullanıldığından, zamansal gereksinimler daha az inebilmektedir. Önerilen yöntemler, kullanılan yer tanımlayıcısına göre değişmektedir. Örneğin, ana bileşenler analizinin kullanıldığı [93]'de, öznitelikler için robot konumuna bağlı olarak olasılıksal yoğunluk işlevi tanımlanarak, bulunulan yer, sonsal yoğunluk işlevinin en büyük olduğu konum olarak tanımlanmaktadır. Kelime çantası kullanan yaklaşımlarda ise harita, görsel kelimelerin oluşumunun yüksek ilintiye sahip olacağı düşüncesi ile, ağaç yapısına sahip bir Bayes ağının Chow Liu algoritması kullanılarak öğrenilmesi ile oluşturulur [28]. Bu yapı, kelime oluşumlarının ikili dağılım kestirimine ek olarak, çok geniş kelime dağarcığına sahip durumlarda, verimli öğrenme ve karar vermeyi sağlar. Bu çerçevede, topolojik SLAM problemi, metrik SLAM problemlerine benzer şekilde, özyineli Bayes kestirim problemi olarak tanımlanmaktadır [28], [29]. Bu yaklaşımın hesapsal olarak çok yüklü olduğu düşüncesi ile, Bayes hesabı yerine, iskelet gösterimi kullanılarak, döngü kapama için kullanılacak görüntü sayısının kısıtlanması sağlanır [91], [92]. Sözlük ağacı, yeni eklenen görüntülerle birlikte binlerce iskelet arasında mümkün olan eşleşmeler için etkili bir filtre oluşturulmasına olanak sağlar [126]. Yer gösterim-

lerinin parmak izi olarak tanımlandığı çalışmalarda ise, dizi eşlemesi minimum enerji optimizasyonu yapılarak gerçekleştirilir [96]. Metrik doluluk kafesi, topolojik bir model olan Voronoi diyagramına çevrildikten sonra, her noktayı, koşullu rastsal bir alanın düğümü olarak tanımlamak sureti ile oluşan Voronoi rastsal alanı, hem haritadan hem de Voronoi topolojisinden gelen öznitelikleri birleştirerek her düğümün hangi yeri tanımladığı kestirilir [61]. Alternatif bir yaklaşımda, AdaBoost makine öğrenme algoritması kullanılarak yapılan bir sınıflayıcı, lazer imzalarından alt harita diyagramlarını çıkartarak yer tanıma için eğitilmiştir [19].

Görüldüğü üzere, topolojik haritalarda muhakeme en önemli husus yer tanıma modülüdür. Sunulan deneysel sonuçlarda, önerilen sistemlerin farklı ışıklandırma ve dinamik ortam durumlarındaki performansları sunulmakta ve başarımın farklı derecelerde etkilendiği gözlenmektedir [165], [176], [170]. Yer tanıma açısından, ölçeklenebilirlik, aydınlatma ve hareketli nesnelere gibi dinamik değişkenlere karşı dayanıklılık halen zorlu sorunlar olmaya devam etmektedir.

C. Veri İlişkilendirme

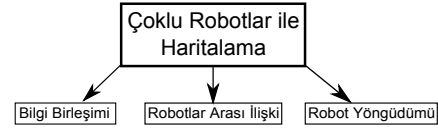
Bütün görünüm veya görünüş tabanlı yaklaşımlarda ortak problem, veri ilişkilendirme sorunudur [158]. Veri ilişkilendirme, mevcut ortamdaki nirengi noktaların haritadaki nirengi noktaları ile eşleştirilmeleridir. Bu şekilde yeni nirengilerin belirlenip haritaya eklenmesi sağlanırken aynı zamanda varolan nirengilerin konumlarının daha iyi kestirilebilmesi de mümkün olur. Veri ilişkilendirmesi için kullanılan ve detayları aşağıda açıklanan üç temel yaklaşım vardır [172].

- Haritadan haritaya olan yaklaşımlarda, iki alt haritanın özniteliklerindeki benzeşme, hem görünümüne hem de bağlı konumlarına bakılarak bulunur. Buradaki problem, olası olmayan ortak özniteliklerin benzer olabilesindedir. Küme kuramsal [42], değişken ölçekli ve geometrik uyumlu dallan ve sınırla algoritması [27] gibi farklı yaklaşımlar önerilmektedir.
- İmgeden imgeye yaklaşımlarda, kameradan alınan son imge ile önceki görülen imgeler arasında bir benzeşme bulunur [28]. Özniteliklerin ayırt edici olmalarına dikkat edilir. Bu yaklaşımdaki sorunlardan en önemlisi, karşılaştırma için oluşturulan imge sözlüğünün önceden iyi bir şekilde öğrenilmesi gerekliliğidir.
- Son olarak, imgeden haritaya olan yaklaşımlarda, kameranın son karesi ile haritadaki öznitelikler arasında bir benzeşme aranır [172]. Örneğin, mevcut imgede harita öznitelikleri ile olası benzeşmeler bulunur ve Ransac tabanlı bir 3 nokta algoritması kullanılarak kameranın haritaya göre konumu belirlenir [104]. Bu yaklaşım yoğun hafıza gerektirdiğinden, gerçek zamanlı uygulamalarda uygulanması zordur.

Tüm bu çalışmalara rağmen, gerçek zamanlı kullanımda, veri ilişkilendirilmesi hala sorunludur ve başarımının artırılması ve hızlandırmaya yönelik çalışmalar devam etmektedir.

IV. Çoklu Robotlar ile Haritalama

Çoklu robotlar ile harita çıkarımı ve kullanımı, birden fazla robotun seçilen model çerçevesinde, bulunulan ortamın haritasını nasıl oluşturacakları, ilgili hareket ve iletişim yöntemleri ile ilintilidir [30], [173]. Bir yerin otonom olarak haritalandırılması, çoklu robot sistemleri kullanılarak ve her bir



Şekil 2: Çoklu robotlar ile haritalama problemleri.

robotun farklı bir bölgede çalışması sağlanarak hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir [54], [160]. Bu alandaki çalışmalar 90'lı yıllardan beri devam etmektedir. Çoklu robotlarda, tek robot ile haritalamadaki gösterim, algılayıcı verileri ve muhakeme problemlerine ek olarak, yeni problemlerin çözülmesi gerekmektedir [85]. Bunlar, Şekil 2'da gösterildiği üzere, bilgi birleşimi, robotlar arası ilişki ve robot yöngüdümlüdür.

A. Bilgi Birleşimi

Bilgi birleşimi, birden çok robottan gelen verilerin birbiriyle uyumlu ve verimli bir şekilde birleştirilip işlenmesidir. Yapılan çalışmalarda genel olarak iki yaklaşım kullanılmıştır [11]: Çoklu robotlarda eşzamanlı konumlama ve haritalama ve harita birleştirme.

A.1 Çoklu Robotlarda Eşzamanlı Konumlama ve Haritalama

Tek robotlarda eşzamanlı konumlama ve haritalama konusundaki gelişmeler ve alınan başarılı sonuçlar, kullanılan yöntemlerin çoklu robotlara aktarılmasına imkan vermiştir [117]. Tekli robotlar için geliştirilen yaklaşımlar genel olarak metrik haritalama ve yorumlama yöntemleri üzerine kuruludur [161]. Ancak, çoklu robotlara özgü, birden çok bilinmeyen robot konumu, harita birleştirme ve ölçeklenebilirlik gibi problemlerin çözülmesi gerekmektedir [31].

Robotların birbirlerine göre olan konumlarının belirlenmesi veya kestirilmesi için, bir robotun diğer bir robotun haritasındaki konumunu veya tümel haritadaki konumunu bulabilmesi gerekmektedir. Bir robotun diğer robota göre olan konumu, açısız, uzaklık, yönelim veya bunların birleşimi şeklinde ölçülebilir [107]. Bunun için, iki farklı yaklaşım uygulanabilmektedir. İlki, her iki harita arasında bir koordinat dönüşümü bulmaktır [135]. Gerekli olan bir diğer bilgi ise, iki harita üzerinde aynı olan nirengi noktalarını belirlemektir.

Çoklu robotlar için eşzamanlı konumlama ve haritalama probleminde ise genel yaklaşım, Bayes filtresi, genişletilmiş Kalman filtresi veya parçaçık filtresi gibi yaklaşımları kullanarak, geometrik yorumlama üzerine kuruludur. İlk çalışmalardan biri olan [63]'de, doluluk kafeslerinin bilgileri, gelen algı bilgilerine dayalı olarak Bayes kuralı ile güncellenir. Yine, [41]'de Kalman filtresi çoklu robot takibi için kullanılmaktadır. Bundan sonra bir dizi çalışmada, genişletilmiş Kalman filtresi yaklaşımı, işbirlik [50], dağıtık karar verme [141], dağıtık işbirlik [22], [103], dağıtık konumlama ve haritalama [159] ve yol tanıma gibi özel durumlarda uygulama [151] gibi farklı çalışmalarda temel alınmıştır. Ancak, çoklu robot uygulamalarında, Kalman filtresi kullanımı ile ilgili önemli sorunlar bulunmaktadır [11]:

- Her bir ölçüm tüm Gaussian parametrelerini etkilediğinden, güncelleştirmeler uzun sürmektedir. Her bir güncelleme adımında, bütün robotlar birbirleriyle iletişim halinde olup kendi haritalarındaki konum güncelleştirmelerini diğerleriyle

paylaşırlar. Eğer robot sayısı N olarak tanımlanırsa, bu $O(N^2)$ kadar ek hesaplama yükü getirmektedir. Robotlar arası konum ölçümü sayısının $N(N - 1)$ mertebesine kadar çıkabileceği düşünülürse, hesaplama yükü $O(N^4)$ olmaktadır. Bu hesaplamalar her bir robota eşit bir şekilde dağıtılsa bile, hesaplama yükü $O(N^3)$ olmaktadır. Bahsedilen hesaplama yükleri, gerçek zamanlı uygulamalar için önemli bir engel teşkil etmektedir [122].

- Çok büyük haritalarda, genişletilmiş Kalman filtresi tabanlı yaklaşımlar için kestirim sapmaları artmaktadır. Doğrusal olmayan sistem ve algılama modellerinin doğrusallaştırılması, bu sapmalara neden olabilmektedir [145].
- Çoklu robotlarda bu filtreleri dağıtık bir şekilde kullanmak kolay değildir.

Çoklu robotlar için eşzamanlı konumlama ve haritalama için ikinci bir yaklaşımda beklenti en büyütme tabanlı algoritmalarıdır [11], [70], [85]. Kalman filtresi metodlarından farklı olarak, beklenti en büyütme tabanlı yöntemlerde en muhtemel harita çıkarılmaktadır. Bu yaklaşım ile haritalamanın avantajlarından birisi, bilgi eşleştirme problemlerine karşı dirençli olmasıdır. Bu sayede, büyük ölçekli haritalar başarıyla oluşturulabilmektedir. Bu yöntemin olumsuz yanlarından biri ise, haritanın artımlı olarak çıkarılamamasıdır. Bu durum, beklenti en büyütme tabanlı yöntemlerin yapısından kaynaklanmaktadır. Buna ek olarak, robotların başlangıç konumlarının birbirlerine göre yaklaşık olarak bilinmesi gerekmektedir. Beklenti en büyütme algoritmasının dağıtık bir versiyonu [145]'de geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda, doğrusal olmayan eniyileme problemi, N tane robot sayısı kadar alt probleme bölünmüştür. Bütün robotlar, belli aralıklarla konum tahminlerini diğer robotlarla paylaşırlar. Buna benzer bir diğer çalışmada, robotların göreceli konum bilgilerini tümleştirmeye yönelik bir ayrık algoritma önerilmiştir [88]. Bu yaklaşımların en önemli eksiği, algoritmanın bir minimuma yakınsama garantisinin olmamasıdır.

Bu alandaki çalışmaların bir çoğu için geçerli olan bir diğer husus, robotların birbirlerine göre konumlarının hesaplanmasında bazı varsayımların yapılmasıdır [89]. Bazı çalışmalar, başlangıçta göreceli konumların verildiği varsayımını yapmaktadır [20], [50], [121], [153]. Diğer bir yaklaşımda ise, robotların başlangıç konumlarının bilinmediği ancak herhangi bir robotun kesinlikle başka bir robotun görüş alanında konumlandırıldığı varsayılmıştır [85]. Bu sayede, robotlar arası ilk karşılaşmanın konum bulmaya yeterli olacağı ve bundan sonraki karşılaşmaların önemli olmadığı belirtilmiştir [73]. Robotların tamamen bilinmeyen yerlerde başladıkları ve haritalarında hiç kesişen bölge olmayabileceği varsayıldığı, az sayıda da olsa, çalışmalar bulunmaktadır. Bu tip bir başlangıç koşulunda, bir robotun kendi haritasında parçacık süzgeci filtresi ile diğer robotların konumlarını bulması [89], Gaussian Markov rastgele alan temelli seyrek genişletilmiş bilgi filtreleri [161] ve karekök bilgi düzlemesi kullanılarak haritalar arasındaki eşleştirmenin yapılması [5] gibi yaklaşımlar önerilmektedir. Ancak, tümel haritalar eksikli olabileceğinden ve robotların bireysel haritaların kesişmesi garanti edilmediğinden, mekanların bilinmeyen kısımları ön bilgilere dayalı olarak kestirilmesi durumu oluşmakta ve bu da sorun yaratabilmektedir.

İkinci bir problem, haritalar arasında veri eşleştirmedir. Bunun

için robotların ortak referans noktaları belirlenmesi gerekir. Bu noktalar insan eliyle verilmekte veya yerel imge tanımlayıcıları kullanarak belirlenmektedir. Eğer bu ortak referanslar dikkate alınmaz ve robotlar haritalarının birbirinden bağımsız olduğunu varsayarsa, haritaların üst üste binen yerlerinde kaymalar olmaktadır [74]. Oluşabilecek bu tutarsızlıkları önleyebilmek için, 2 boyutlu haritalar yerine manifold temelli harita gösterimi önerilmiştir [72], ancak manifoldun gösteriminde zorluklar bulunmaktadır.

Sınırlı iletişim durumunda iletişim ağının yönetilmesi ve grup içinde yapılacak işlemlerin paylaşılması da düşünülmesi gereken diğer hususlardır. İletişim ve karşılıklı bilgi paylaşımı, müşterek robot takımları için önemlidir. Ancak bu konuda yapılan çalışmalar, özellikle de durum kestirimi konusunda, son derece sınırlıdır [83].

Mevcut yaklaşımların, varsayımlar çerçevesinde, başarılı sonuçlarına rağmen, bazı durumlarda bu yaklaşımlar hızlı bir şekilde sonuca ulaşamamaktadırlar [125]. Haritalanacak olan alanın büyümesi veya algılamalardaki gürültü sonuç almayı geciktirmekte ve bazen sonuç alınmasını engellemektedir.

A.2 Harita Birleştirme

Harita birleştirme problemi, akademik çalışmaların yoğunlaştığı bir diğer konudur. Bu problemde, eşzamanlı konumlama ve haritalama problemlerinden farklı olarak robotlar, kendi başlarına ve diğer robotların konumu hakkında bilgi sahibi olmadan yerel haritalarını oluşturmaktadırlar. Buradaki amaç, robotların çalışma alanlarında oluşan bu haritalardaki kesişen bölgeleri bulup haritaları birleştirmektir [90]. Bu problem, kesişen birden çok imgenin düzenlenmesini içeren imge dikileme problemlerine benzemektedir. Bu konudaki sınırlı sayıdaki çalışmaları, haritanın gösterim yöntemine göre iki gruba ayırabiliriz. Birinci grup yaklaşımlar doluluk kafesi ile haritalama veya öznitelik tabanlı haritalama gibi geometrik tabanlı yöntemlerdir [113]. Doluluk kafesi haritalarında harita birleştirme problemi, haritayı bir imge gibi diğer haritalar üzerinde kaydırarak ortak noktaların tespit edilmesi şeklinde tanımlanmaktadır [11]. Benzerlik ölçümü için, eşleştirilen yerlerin Öklid uzaklığı ortalaması, Hausdorff uzaklığı veya diğer başka metrikler kullanılabilir. Yaklaşımlardan bir kısmı ise, imge tescilleme problemlerinde sıkça kullanılan dürümsel enyakin nokta yaklaşımından esinlenerek geliştirilmişlerdir. Dürümsel enyakin nokta yaklaşımında, verilen iki veri seti arasındaki benzer noktaların arasındaki farkın karesini minimize eden dönüşüm parametreleri bulunur [10], [180]. Bulunan parametreler kullanılarak tekrar birbiriyle aynı olan noktalar kestirilir ve yeni bir parametre seti elde edilir. Algoritma, parametrelerdeki değişim belli bir eşğin altına düşene kadar bu işlemi sürdürür. Öznitelik tabanlı haritalamalarda ise iki haritadaki aynı özniteliklerin ve sabit işaretlerin bulunması için, benzer yöntemler kullanılmaktadır [11].

Geometrik tabanlı yöntemlere alternatif olarak geliştirilen topolojik yaklaşımlarda ise, harita birleştirme problemi, birden fazla çizgenin eşleştirilmesi problemlerine benzer [130]. Topolojik harita birleştirme yöntemleri, temel olarak, birbiri ile eşleşmiş düğüm veya düğümleri kullanarak iki harita arasındaki dönüşümü hesaplar. Bunun için, hipotez reddi üzerine kurulu [74] ve buluşsal [11], [36] gibi farklı yaklaşımlar vardır. Ancak çoğu çalışmada, farklı iki haritanın büyük

oranda kesiştiği ve haritalarda fazla oranda belirsizlik olmadığı varsayımları yapılmıştır. Bunlara ek olarak, yapısal öznitelikler kullanılarak geliştirilen alt çizge eşleştirme yöntemleri de mevcuttur [74]. Eğer bir robotun topolojik haritası, geometrik ve görsel bilgiler içeriyorsa, bu bilgi, robotun kendi referans koordinatlarına göre düğümlerin yerlerinin tahmin edilmesinde kullanılabilir. Bu durum, harita birleştirme probleminin daha önce belirtildiği gibi imge tescilleme yöntemleri kullanılarak çözülebileceğini gösterir.

Bu konuda üçüncü bir yaklaşım da, karma haritalar kullanılarak bilginin birleştirilmesidir. Robotların, metrik harita kapsamlarının örtüşmediği varsayılarak, her robotun yerel haritası bir çizge düğümü olarak düşünülür ve bunlar arasındaki kenar etiketleri ile olan dönüşümler ve ilintili belirsizlikler, bir eniyileme problemi olarak çözülmektedir [31].

B. Robotlar Arası İlişki

Çok robotlu sistemler için önemli diğer bir husus, robotlar arasındaki ilişkidir. Örneğin, birden çok robottan sağlanan haritaların birleştirilmesi, robotlar arası ilişkiler vasıtasıyla yapılabilir. Bu husus, hangi bilgilerin nasıl paylaşılacağı konusunda içermektedir. Robotların birbirleriyle olan ilişkileri, olası karşılaşmalarda birbirlerini algılamalarına [54], iletişim kullanarak haberleşmelerine veya hem algılama hem de iletişim kullanmalarına [145] bağlı olarak farklılaşmaktadır.

Robotların birbirleri ile karşılaşması, doğrudan veya dolaylı bir şekilde olabilir. Bir robotun, diğer bir robotu algılayıcıları vasıtasıyla görmesi ve tanınması, doğrudan karşılaşma olarak tanımlanmaktadır [85]. Bu durumda, karşılaşan robotlar birbirlerini kendi haritalarında konumlamaya çalışırlar. Bunun gerçekleşebilmesi için robot üzerinde metrik konum ölçülebilen algılayıcılar (lazer, sonar, v.s.) bulunmalıdır. Dolaylı karşılaşmalar ise, robotların birbirlerini görmeden ortamdaki ortak bir noktayı gözlemlemesi durumunda olur. Bu gözlemler farklı zamanlarda gerçekleşmiş olabilir. Bu durumda, konum kestirimi için bazı metrik koşullar oluşmuş olur ve bu sayede robotlar birbirlerinin konumunu göreceli olarak kestirebilirler.

Aslen birçok çalışmada, robotlar arasındaki karşılaşmalar için özel bir strateji belirlenmeyip, bilgi paylaşımı, robotların rastlantısal karşılaşmalarında yapılmaktadır. Örneğin bazı yaklaşımlarda, bir robot, diğer bir robotun konumunu kamera ve lazer algılayıcısı ile belirledikten sonra iletişim kurulmakta ve bilgi paylaşımı yapılmaktadır [54], [75]. Bir başka çalışmada ise, robotlar birbirinin görüş sahası içine girdiklerinde uzaklık ölçümü yaparak, bu bilgiyi diğer tüm robotlara yayımlarlar [71]. Bazı çalışmalarda ise, robotlar bir randevu stratejisi ile kendileri için ortak olduğunu düşündükleri noktalarda karşılaşmayı amaçlarlar [45], [138]. Bu yaklaşımlarda, robotlar diğer robotların kendi haritalarındaki konumları hakkında hipotezler üretirler. Bu hipotezlerin doğruluğunu kanıtlamak için robotlar arasında randevu noktaları seçilir. Eğer bu randevu noktalarında başarılı bir şekilde buluşurlarsa, haritalarını birleştirip ortam keşfini birlikte sürdürmeye devam ederler. Bu yaklaşımlardaki kısıtlayıcı unsurlardan biri, robotların birbirleriyle konum hipotezlerini paylaşmak için sürekli iletişimde olma zorunluluğudur. Bu durum, yüksek bant genişliği gereksinimi ortaya çıkarmaktadır. Dolayısı ile daha çok kısa menzilli iletişimin olduğu durumlar için uygundur. Bir diğer unsur

ise, robotların, hipotezlerin doğruluğunu sağlayamaması durumunda devamlı olarak yeni hipotezler üretip asıl görevden sapma durumunun oluşmasıdır. Bir başka çalışmada, robotlar iki gruba ayrılıp birbirleri için taşınabilir nirengi işlevi görmektedirler [95]. Bu işlevde, bir grup robot hareket ederken diğer grup sabit durup nirengi olmaktadır. Bu işlem görev tamamlanmaya kadar sürdürülmektedir. Bu yöntemin avantajı, robotların başlangıç konumları ve haritalardaki kesişen bölgelerinin olmaması gibi varsayımlara gerek duymamasıdır. Ancak, robotların nirengi görevi görmesi onların hareketlerini kısıtlamaktadır.

Robotların elde ettikleri bilgileri paylaşabilmeleri için birbirleriyle iletişimde olmaları gerektiğinden, robotlar arası iletişim de bir diğer önemli husustur [56]. İletişim yapısı, merkezi, dağıtık veya karma olabilir [100]. Merkezi yaklaşımlarda, robotlar bilgilerini bir bilgi birleştirme merkezine iletirler. Bu merkezde, gelen bütün bilgiler işlenerek, ortak yapı oluşturulur. Dağıtık yöntemlerde ise merkezi birleştirme birimi olmaksızın tüm robotlar bilgi üzerindeki işlemleri kendileri yaparlar [41], [50], [111], [122]. İletişimde bir diğer önemli husus, robotlar arasındaki iletişim stratejisi ve buna dayalı olarak oluşan iletişim ağıdır. Yapılan çalışmaların çoğunda, iletişimin bir şekilde sağlandığı varsayılmıştır. Fakat, genel olarak varsayılan, herkes ile sürekli iletişimde olma yaklaşımı, çok fazla kanal kapasitesi gerektirmesi nedeniyle veya başka bir takım sınırlamalardan dolayı her zaman mümkün olmayacağından, gerçekçi bir varsayım değildir [98]. Bu çerçevede, robotların kimler ile nasıl ve ne zaman iletişime gireceği ve hangi bilgileri paylaşacağı, üzerinde çalışılması gereken önemli bir konudur [168]. İletişim ağlarındaki son gelişmeler, birbirlerine uzak mesafelerde bulunan dinamik sistemlerin veya robotların oluşturduğu ağ üzerinden koordineli olarak dinamik görevleri yerine getirmeye olanak vermektedir [24]. Bu perspektifte, çoklu robot sistemleri karma yapıya sahiptirler. Bu karma yapının sürekli kısmı robotların durumları ile ilgilidir. Ayrık kısım ise robotların birbirleriyle olan etkileşimleriyle tanımlanmaktadır [23], [101], [102]. Karma sistemler için önerilen bu modeller önemli ölçüde sistem gereksinimlerinin tipine bağlıdır [132], [174]. Sürekli durumlar ile ayrık etkileşimler arasındaki ilişki çizge ağlara dayandırılmaktadır [112], [118], [144]. Robotların durumlarının ve ilgili ağın ayrı fakat bağlı olarak geliştiğinde, ağ gelişimiyle ilgili stratejiler dikkate alınmaktadır [169]. Eşzamanlı kontrol ve iletişim yapan robotlar için zaman ve iletişim karmaşıklığı tanımları geliştirilmiştir [108].

Alandaki çalışmaların birçoğu, daha önce bahsedildiği üzere, robotlar arasında tam bağlı bir ağ olduğunu ve robotların birbirleriyle karşılaştıklarında, dolaylı veya doğrudan, aralarındaki iletişimin yüksek bant genişlikli ve iki yönlü olduğunu varsayar [148]. Bu durum iletişimin kısıtlı olduğu durumların göz ardı edilmesine neden olmaktadır [85], [152]. Halbuki, sınırlı iletişime sahip robot sistemleri daha gerçekçidir [60], [116], [149]. Buna yönelik olarak, iletişimde uzaklık tabanlı modülasyon önerilerek, robot çiftleri aralarındaki uzaklıkla doğru orantılı olan bir frekansta iletişim kurmaktadır [86]. Uzaklık bilgilerinin bilinemediği durumlarda, farklı bir yaklaşım uygulanarak az sayıdaki robotlara hareket ve iletişim yapmalarına izin verilirken, diğer robotlar hareketsiz durmaktadır. Bir başka yaklaşım ise, oyun kuramsal yaklaşımdır [76],

[171]. Çoklu üstlenici ağlarda, her bir üstlenicinin kazanç ve maliyet arasındaki çatışma doğal olarak oyun kuramsal formülasyona götürmektedir [79]. Mevcut araştırmalardaki temel yaklaşım, oyuncuların kendi stratejilerini diğer oyuncularından bağımsız olarak ele aldıkları, işbirlikçi olmayan oyunlardır [142]. Alternatif olarak, işbirlikçi oyun kuramı da oyuncuların bağlantı kurma ve koparma kararının ortak verildiği ağ formasyonları için kullanılmaktadır [66], [142]. Birçok koalisyon oyununda, oyuncular birbirlerine bağlı ve bir çizgedeki ikili bağlantılar üzerinden iletişim yaptıklarından, bağlı çizgelerde her bir koalisyonun değeri çizge yapısına bağlı olmak üzere koalisyonlar üzerine haritalanmaktadır [76], [120]. Koalisyon oyunlarının ortamsal değişimlere maruz kalabildikleri bilinmesine rağmen [142], muhtemelen model ve objektiflere bağlı olmasından dolayı dinamik koalisyonlar daha az çalışılmıştır. Ancak, ağ oyunlarının çoğu oyuncuların dinamik yapısını dikkate almamaktadır. Oyuncuların görev dinamiği ile ağ dinamiği arasındaki ilişkiler hala az çalışılmış bir konudur. Grubumuzun bu konudaki çalışmaları öncü olup, robotların kendi işlerini yaparken, aynı zamanda diğer robotlar ile iletişimlerini tanımlanan son kazanç açısından optimize edebilmek için oyun kuramsal bazı yaklaşımlar geliştirilmiştir [8], [9]. Ancak, ortamın keşfi ve haritaların paylaşımı daha farklı stratejiler gerektirecektir. Zira robotlar hareket ederken, iletişim kararları, alınan bilginin en fazla olması, hareket kurgusuna uygunluk ve robotlar arasındaki girişimin en aza indirilmesi gibi farklı kriterler içerecektir.

C. Robot Yöngüdümü

Ortam algılama ve haritalama üzerine yapılan çalışmalarda odaklanılan diğer bir husus, robotun nasıl hareket edeceğidir. Robot yöngüdümü, robotların haritalama görevini verimli bir şekilde tamamlamaları için ne şekilde hareket edeceklerine odaklanmaktadır. Tek veya çok robotlu sistemlerde harita ile ilgili yapılan birçok çalışmada, hareket, önceden belirlenen patikalar doğrultusunda veya sistem dinamiğine göre yapılmaktadır. Halbuki, harita uygulamalarında çözülmesi gereken önemli bir problem, robotların buldukları ortamda etkin bir şekilde hareket etmeleri ve etrafı keşfedebilmeleridir. Bu çerçevede, iki alt problem robotların nereye ve nasıl gidecekleridir. Yaklaşımlar, eşgüdümsüz ve eşgüdümlü olarak sınıflandırılabilir. Eşgüdümsüz yaklaşımlarda, her robot kendi başına, örneğin en yakın mesafe gibi kriterlere göre hedefini tespit eder. Eşgüdümlü yaklaşımlarda ise, merkezi bir eşgüdümlü veya iletişim ile, her bir robota atanacak keşif bölgeleri belirlenerek, robotların eşzamanlı olarak farklı bölgeleri taramaları sağlanmaktadır [21]. Hedeflerin robotlara dikkatlice atanması önemlidir, zira hem gereksiz iş yükü azaltılır hem de robotlar arasındaki çakışma en aza indirgenebilir [157]. Sıkça kullanılan yaklaşımlardan birinde, robotlara keşfedilmiş ve keşfedilmemiş bölgeler arasındaki sınırlar bildirilmektedir [179]. Robotlara atanacak potansiyel hedef noktalar dizisini seçmek amacıyla açık artırma tabanlı yaklaşımlar da önerilmiştir [150], [183]. Bir başka yaklaşımda hedefler, diğer robotlar tarafından görülebilirliğine dayanan yararlılığı ile bu hedefe varabilmek için gidilmesi gereken mesafeye dayalı maliyet arasındaki ödünleşimi, eniyileştirmeye dayalı olarak belirlenmektedir [21]. Ortamın yapısının bilindiği durumlarda, robotlara hudut hedefleri yerine alan bölümleri atanmaktadır

[177].

Her robotun kendisine atanan alanı kapsayabilmek için kullanıldığı yaklaşımlar, tek robotlu yaklaşımlara benzer bir şekilde, buluşsal ve rastlantısal tabanlı [115], tam hücresel ayrışım tabanlı [1], [2] ve yaklaşık hücresel ayrışım tabanlı olarak sınıflandırılabilir. Yapılan çalışmaların neredeyse tamamı, yöngüdümlü problemi, hedef kararlaştırma probleminden ayrı olarak ele almaktadır. Dikkate değer istisnalar [139], [143]'dür. İlk çalışmada, takipçi robotların gizilgüç alan formülasyonuna göre hareket ettikleri lider takip metoduna dayanan bir yaklaşım önerilmiştir. Buna paralel olarak, hareket ve keşif konusunun yine genel olarak metrik harita bazlı yaklaşımlar çerçevesinde yapıldığı görülmektedir [44]. Yine, dinamik alanların takibi konusunda yapılan bir çalışma ile, farklı alan tarama şekilleri mümkün olmaktadır [69]. Çoklu robotlar ile ortam keşfinde önemli ilerlemeler sağlanırken, daha öncede bahsedildiği üzere robotlar arası iletişim konusuna daha az ilgi gösterilmiştir [129]. Bu alandaki çalışmaların çoğu tam ve sınırsız iletişimi varsayımlardır. Ancak, pratikte robotlar sınırlı iletişimin üstesinden gelmek zorundadırlar. Sınırlı iletişim, robotların iletişim yeteneğini azalttığından problemi daha da zorlaştırmaktadır [21], [129]. Örneğin, robotlar arası uzaklık iletişim kurulamayacak kadar uzak ise veya bir ağ hatası oluşmuş ise, robotlar diğer bir robotun daha önceden keşfetmiş olduğu alanı tekrar keşfedebilir. Bu durum, verimliliğin düşmesine sebep olmaktadır.

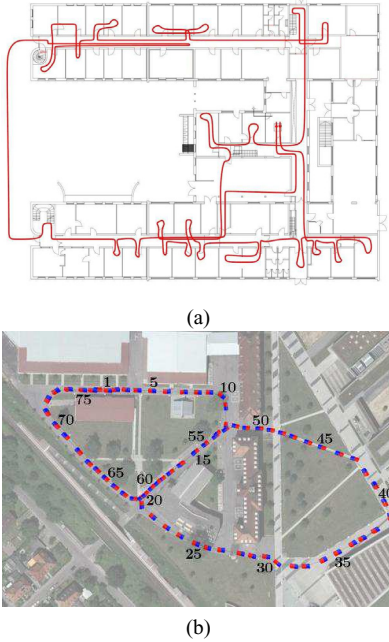
V. Haritalama Uygulamaları

Haritalama üzerine yapılan çalışmalar, farklı birçok ortamda uygulanmıştır [15], [34], [25]. Uygulamalar, 2B ofis, laboratuvar gibi basit iç mekan senaryolarından, dış mekanlara ve hatta sualtı ortamlarına doğru ilerlemiştir [33]. Bu uygulamalarda genel olarak kamera, 2B/3B lazer tarayıcı gibi algılayıcılardan gelen ortam bilgileri kullanılmaktadır [141]. Bazı çalışmalarda ise, bu algılayıcılara ek olarak, kodlayıcı, pusula, ataletsel ölçüm ünitesi gibi robotun hareketine dair bilgiler sağlayan algılayıcılar da kullanılmıştır.

Bu alandaki ilk çalışmalarda, lazerden gelen 2B uzaklık bilgilerinin kullanıldığı görülmektedir [65]. Örneğin, lazer tabanlı eş zamanlı konumlama ve haritalama, dış ortamlarda [64], [123], sualtında [123] ve havada [84], [158] uygulanmıştır. Yine dış ortamda, lazer tarayıcıdan gelen geometrik bilgiler ile, hem özneliklerin yerel duruşlarının betimlendiği, hem de öznelikler arasındaki tümel bağlantıların tanımlandığı melez bir harita yapısı oluşturulmuştur [53].

Bazı çalışmalarda ise sadece kameralardan gelen görsel veri kullanılarak, harita oluşturmaya odaklanılmıştır [78], [99], [106]. Örneğin, çift stereo kameralardan gelen öznelikler, Ransac algoritmasıyla geometrik olarak eşleştirilerek, yine dış ortamlarda harita oluşturmada kullanılmıştır [91], [109], [145], [147], [175]. Hatta bu çalışmalar, sualtında da uygulanmıştır [104]. Kamera bazlı eş zamanlı konumlama ve haritalandırma temelli başka araştırmalarda ise, görsel bilgiler kullanılarak, dış ortamlarda kaçırılan robot ve önceden hiç gidilmemiş yerler gibi durumlarda ne yapabileceğini bilen robotlar geliştirilmektedir [28], [29], [162]. Bu tip durumlarda, öznelik haritaları büyürken, gerçek zamanlı bir uygulamayı gerçekleştirebilmek önemli bir husustur. Birçok araştırma, bahsedilen bu sorunları da ele almaya başlamış ve bunları gidermek üzere yaklaşım-

lar önerilmiştir. Buna örnek olarak, günümüz yöntemlerinin kentsel bir dış ortamda, kendini tekrarlayan ve hareketli nesnelere gibi zorlayıcı durumlardaki başarımını değerlendiren bir çalışma yapılmıştır [3]. Bu çalışmada hedeflenen nokta, zamansal açıdan sabit gereksinimleri olan bir yaklaşım ile gezgin robotun ortamı sonlu zaman içinde haritalayabilmesini sağlamaktır. Günümüzde, özellikle 3B lazerlerin geliştirilmesi ile birlikte, kamera ve 3B lazerler birlikte kullanılarak metrik eş zamanlı konumlandırma ve haritalama [133] ve topolojik [96] temelli haritalama uygulamaları yapılmıştır. Bu konudaki çalışmalar devam etmekte olup, farklı algılama şekillerinin de denendiğini gözlemlenmektedir. Örneğin, iki standart kamera ve bir atalet ölçü ünitesi kullanılarak, uçabilen bir robot ile dış ortamların harita çıkarımı uygulaması sunulmaktadır [158].



Şekil 3: Haritalama senaryo örnekleri. Üst: İç ortamda alanların tanımlanması [134]. Alt: Bir dış ortamda alanların tanımlanması [58].

Haritalama uygulamaları için geliştirilen yöntemlerin sınırlanabilmesi için birçok veritabanı mevcuttur [134][137]. Bunların bazıları iç ortamda, bazıları da dış ortamda alınmış verilerdir. Her veritabanı, iç, dış veya karma bir ortamda alınan odometri, görsel, uzaklık gibi farklı bilgileri içermektedirler. Şekil 3'de, birer iç ve dış ortam kapsamı örnek olarak sunulmaktadır. Zaman içinde, geliştirilen yaklaşımlar bu veriler üzerinde uygulandığından, başarımları açısından karşılaştırma yapmak mümkündür.

VI.Sonuç

Robotik ve yapay zeka alanlarının hedeflerinden biri, gezgin robotların iş yapma becerilerini arttırmaktır. Geliştirilen ilk gezgin robotlardan biri olan Shakey'den itibaren, bir robotun harekete başlamadan önce veya hareket halinde iken, kendi eylemleri hakkında muhakeme yapmasını sağlayacak algoritmalar üzerinde çalışılmaktadır. Robotik ve yapay zeka alanında yapılan araştırma ve geliştirmeler, bu vizyona yönelik çok

önemli katkılar sağlamıştır. Ancak, bu ümit verici gelişmelere rağmen, mevcut ticari ve askeri robotların çok nadiren tamamen özerk bir görev ve hareket planlama yeteneklerine sahip oldukları görülmektedir. Buna sebep olarak, robotların buldukları ortamı algılayarak, ortam haritası oluşturmalarındaki yetersizlikler ve bu haritaların görev planlarına tümleştirilmeleri konusundaki eksikleri sayabiliriz. Daha detaylı olarak açıklamak gerekirse:

- Gerçek dünya uygulamaları, dinamik ortamlar, gerçek zamanlılık ve sürekli operasyon gibi son derece karmaşık gereksinimlere sahiptirler.
- Algılama, harita oluşturma ve kullanma, kontrol gibi son derece farklı yöntemleri içeren alanların birleştirilmesinde tam olarak çözülememiş sorunlar vardır.

Tüm bu zorluklara rağmen, yine de otonom gezgin robotların, farklı iç ve dış ortamlarda, gittikçe artan bir eğilim ile kullanıldıklarını gözlemlemekteyiz. Mevcut durum itibarı ile, endüstri veya askeri amaçlı kullanılan robotların genel olarak önceden hesaplanmış hareketlere ve statik, önceden oluşturulmuş planları temel aldığını biliyoruz. Bu çerçevede, ilgili ticari ve askeri şirketler, hem robotik görevlerde, hem de hareket planlamada henüz çok az seviyede olan otonominin artırılmasına son derece önem vermektedirler. Bu bağlamda önemli bir nokta, robotların buldukları ortamı mümkün olduğunca kapsamlı olarak algılamaları ve hafızalarında bu algılar temelli haritalar oluşturabilmeleridir. Bu haritalar kullanılarak, uzamsal muhakeme yapabilmeleri ve otonom olabilmeleri; dolayısıyla çevre tarama, keşif, hareket, taşıma gibi farklı işleri kendi başlarına güvenilir bir şekilde yapabilmeleridir.

Harita modelleri ve kullanım yöntemleri açısından, yapılan çalışmaların ağırlıklı olarak metrik haritalar ve geometrik bazlı kullanım yöntemleri çerçevesinde olduğu görülmektedir. Metrik haritalar ile muhakeme genel olarak, Bayes tabanlı filtreler veya beklenti en büyüme gibi klasik kestirim ve istatistik kuramı temelli yaklaşımlar ile sağlanmaktadır. Her ne kadar geometrik kafes tabanlı haritalama, ortamın detaylı bir şekilde haritalandırılmasını ve değişik algılayıcılardan gelen verilerin tümleştirilmesini sağlar. Ancak, sabit kafes boyutu nedeniyle, geniş ortamlarda çok sayıda kafes oluşturulması gerekmektedir. Buna bağlı olarak yüksek hesaplama yükü, yüksek hafıza gereksinimi gibi kısıtlayıcı durumlar ortaya çıkar. Bu yaklaşıma alternatif olarak geliştirilen topolojik yaklaşımlar, esasen çizge bazlı yaklaşımlar olup, düğümlerin ve kenarların ne anlama geldiği uygulamaya göre değişebilmektedir. En güncel çalışmalarda, imgelerden oluşturulan görsel sözcükler düğümleri oluşturmakta ve imgeler arası ilişkilere dayalı olarak, düğümler arasındaki kenarlar oluşturulmaktadır. Ancak bu çalışmalara rağmen, topolojik haritaların tam olarak ne olduğu ve nasıl oluşturulduklarına dair bir görüş birliği yoktur.

Çoklu robotlar ile harita çıkarımı ve kullanımı konusu ise, birden fazla robotun seçilen harita modeli çerçevesinde, bulunan ortamın haritasını nasıl oluşturacakları, ilgili hareket ve iletişim yöntemleri ile ilintilidir. Bu çerçevede, çoklu robotlar ile yapılan çalışmaların genelde metrik harita temelli geometrik yaklaşımlar olduğu görülmektedir. Az sayıda topolojik harita temelli, çoklu robot haritalama çalışmalarında, düğümler yerel yapıyı tam olarak yansıtamamakta veya dikkörtgensel harita-

lar gibi varsayımlar yapılmaktadır. Yine çok az sayıda olan karma harita temelli çalışmalarda düğümler, metrik haritalardan oluştuğundan, bu tür haritalar ile ilişkilendirilen sorunlara sahiptirler. Hareket ve keşif konusunda ise, yine metrik harita bazlı yaklaşımların çoğunlukta olduğu görülmektedir. Topolojik veya karma haritalar ile keşif konusunu ele alan çalışmalar çok daha az sayıdadır.

Çoklu robotlarda önemli ikinci bir husus ise robotlar arasındaki iletişim stratejisi ve buna dayalı olarak oluşan iletişim ağıdır. Yapılan çalışmaların çoğunda, iletişimin bir şekilde sağlandığı varsayılmıştır. Halbuki robotların, kimler ile nasıl ve ne zaman iletişime gireceği ve hangi bilgileri paylaşacağı, üzerinde çalışılması gereken ayrı bir konudur ve bu konuda yapılan yayınların göreceli olarak yeni tarihli olduğu görülmektedir. Herkes ile sürekli iletişime girmek ve sahip olunan tüm bilgileri paylaşmak, çok fazla iletişim kanalı kapasitesi gerektireceğinden veya sınırlı güç, uzaklık gibi fiziksel nedenlerden dolayı mümkün olmayabilir. Robotlar hareket ederken, iletişim kararları, alınan bilginin en fazla olması, hareket kurgusuna uygunluk ve robotlar arasındaki etkileşimin en aza indirgenmesi gibi farklı kriterler içerecektir. Dolayısıyla bağlantılar bu kriterlere göre belirlenir.

Sonuç olarak, yukarıda anlatılan hedefler ile bilimsel ve teknolojik olarak gerçekleştirilen ilerlemeler çerçevesinde, ortam haritalama, yapılmış olan tüm çalışmalara rağmen, hala önemli bir konu olmaya devam etmektedir. Makalede anlatıldığı üzere, alanda büyük ilerlemeler kaydedilmiş olmasına rağmen, tüm sorunların çözüldüğünü söylemek mümkün değildir. Nitekim, robotik alanının en önemli konferanslarından biri olan "IEEE International Conference on Robotics and Automation" konferansının son yıllarda yapılan etkinliklerinde, günlük sunuşlar dilimini oluşturan oturumlardan en az bir veya ikisinin, bu konularda yapılması, konunun güncelliğinin devam ettiğinin önemli bir göstergesidir. Bu çalışmamız, robot camiasında bu alana ilgi duyanlar için bir başlangıç kaynağı olması amacı ile sunulmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma kısmi olarak Boğaziçi Üniversitesi BAP Projesi 2010-5720, kısmi olarak ta Tübitak EEEAG 111285 kodlu proje tarafından desteklenmiştir.

Ek: Karşılıklı Türkçe & İngilizce Terimler

Bu kısımda, makalede kullanılan çeşitli terimlerin İngilizce karşılıkları alfabetik olarak sunulmaktadır.

Alt çizge ↔ Sub-graph
 Ana bileşenler analizi ↔ Principal component analysis
 Artımlı en büyük olasılırlık ↔ Incremental maximum likelihood
 Bağlamsal tabanlı ↔ Context-based
 Beklenti en büyüme ↔ Expectation maximization
 Bilgi birleşimi ↔ Data fusion
 Buluşsal ↔ Heuristic
 Çizge bölütleme ↔ Graph partitioning
 Çoklu üstlenici ↔ Multi-agent
 Değişinti ↔ Covariance
 Dışsal ↔ Extroceptive

Doluluk kafesi ↔ Occupancy grid
 Destek vektör makineleri ↔ Support vector machines
 Doğrudan karşılaşma ↔ Direct encounter
 Düğümler ↔ Nodes, vertices
 Dünya merkezli ↔ World-centric
 Dürümsel enyakin nokta ↔ Iterative Closest Point
 Düzleme ↔ Smoothing
 En muhtemel harita ↔ Most Likely Map
 Eşzamanlı konumlandırma ve haritalandırma ↔ Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)
 İçsel ↔ Proprioceptive
 İkili oyunlarda ↔ Pairwise games
 İmge dikişleme ↔ Image stitching
 İmge tescilleme ↔ Image registration
 İskelet ↔ Skeleton
 İşbirlikçi ↔ Cooperative
 İzgel toplama ↔ Spectral clustering
 Kare Kök Bilgi Yumuşatması ↔ Square Root Information Smoothing
 Karma ↔ Hybrid
 Kazanç ↔ Payoff
 Kelime çantası ↔ Bag of words
 Kenarlar ↔ Edges
 Küme kuramsal ↔ Set-theoretic
 Nirengi ↔ Landmark
 Optimal altı ↔ Suboptimal
 Özimgelere parçalama ↔ Decomposition into eigenimages
 Özyineli ↔ Recursive
 Parekete hesabı ↔ Dead reckoning
 Parmak izi ↔ Fingerprint
 Robot merkezli ↔ Robot-centric
 Seyrek genişletilmiş bilgi süzgeçleri ↔ Sparse extended information filters
 Sözlük ağacı ↔ Vocabulary tree
 Taşınabilir işaretler ↔ Portable beacons
 Tümyönlü ↔ Omnidirectional
 Veri ilişkilendirme ↔ Data association
 Yaklaşık hücresel ayrışım tabanlı ↔ Approximate cellular decomposition based

Kaynakça

- [1] Acar, E.U. ve H. Choset, Sensor-based Coverage of Unknown Environments. *Int. J. of Rob. Research*, Cilt 21(4), ss. 345-366, 2002
- [2] Acar E.U., H. Choset, Y. Zhang, M.J. Schervish: Path Planning for Robotic Demining: Robust Sensor-based Coverage of Unstructured Environments and Probabilistic Methods. *Int. J. of Rob. Research*, Cilt 22(7-8), ss. 441-466, 2003
- [3] Achar S., C.V. Jawahar ve K.M. Krishna, Large Scale Visual Localization in Urban Environments. *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 5642-5648, 2011
- [4] Albus J.S. , Outline for a Theory of Intelligence. *IEEE Trans. on Sys., Man, and Cybern.*, Cilt 21(3), ss. 473-509, 1991
- [5] Andersson L. ve J. Nygard, C-sam: Multi-robot slam using square root information smoothing, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 2798-2805, 2008
- [6] Bailey T. ve H. Durrant-Whyte, Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part I. *IEEE Rob. & Aut. Magazine*, ss. 99-107, 2006
- [7] Bailey T. ve H. Durrant-Whyte, Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II. *IEEE Rob. & Aut. Magazine*, ss. 108-117, 2006
- [8] Bayram H. ve H.I.Bozma, Multi-robot Navigation with Limited Communication-Deterministic vs Game-Theoretic Networks, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, ss. 1825-1830, 2010
- [9] Bayram H. ve H.I.Bozma, Pairwise vs Coalition Game Networks for Multi-Robot Systems, *Proc. of IFAC 18th World Congress*, ss. 13750-13755, 2011

- [10] Besl P. ve H. McKay, A method for fegristration of 3-d shapes, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Cilt 14(2), ss. 239-256, 1992
- [11] Birk A. ve S. Carpin, Merging occupancy grid maps from multiple robots, *Proc. of the IEEE*, Cilt 94(7), ss. 1384-1397, 2006
- [12] Biswas R., B. Limketkai, S. Sanner ve S.Thrun, Towards object mapping in dynamic environment with mobile robots, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, ss. 2002.
- [13] Blaer P. ve P. Allen. Topological mobile robot localization using fast vision techniques, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 1031-1036, 2002.
- [14] Bay H., Herbert, T. Tuytelaars ve L. Van Gool, Speeded-up robust features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*, Cilt 110, ss. 346-359, 2008
- [15] Bosse M., P. Newman, J. Leonard ve S. Teller, Simultaneous localization and map building in large-scale cyclic environments using the atlas framework *Int. J. of Rob. Research*, Cilt 23(12), ss. 1113-1139, 2004
- [16] Bosse M. ve J. Roberts, Histogram matching and global initialization for laser-only slam in largeunstructured environments, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 4820-4826, 2007
- [17] Bowling M., D. Wilkinson, A. Ghodsi ve A. Milstein, Subjective localization with action respecting embedding, *Rob. Research*, Springer, Cilt 28, ss. 190-202, 2007
- [18] Bozma H.I. , G. Çakiroglu ve Ç. Soyer, Biologically inspired Cartesian and non-Cartesian filters for attentional sequences. *Pat. Rec. Letters*, Cilt 24(9-10), ss. 1261-1274, 2003
- [19] Brunskill E., T. Kollar ve N. Roy, Topological mapping using spectral clustering and classification, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, ss. 3491-3496, 2007
- [20] Burgard W., M. Moors, D. Fox, R. Simmons ve S. Thrun, Collaborative multi-robot exploration, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, Cilt 1, ss. 476-481, 2000
- [21] Burgard W., M. Moors, C. Stachniss ve F. Schneider, Coordinated multi-robot exploration, *IEEE Trans. on Rob.*, Cilt 21(3), ss. 376-378, 2005
- [22] Caglioti V., A. Citterio ve A. Fossati, Cooperative, distributed localization in multi-robot systems: a minimum-entropy approach, *IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications*, ss. 25-30, 2006
- [23] Cao Y.U, A.S. Fukunaga ve A. Kahng, Cooperative mobile robotics: antecedents and directions, *Auton. Rob.*, Cilt 4(1), ss. 7-27, 1997
- [24] Casavola A., M. Papini, ve G.Franze, Supervision of networked dynamical systems under coordination constraints, *IEEE Trans. on Aut. Contr.*, 51 (3), ss. 421-437, 2006
- [25] Chong K.S. ve L. Kleeman, Feature-based mapping in real, large scale environments using an ultrasonic array, *Int. J. Rob. Res.*, Cilt 18(1), ss. 3-19, 1999
- [26] Choset H. ve K. Nagatani, Topological simultaneous localization and mapping (slam): Toward exact localization without explicit localization, *IEEE Trans. on Rob. and Aut.*, Cilt 17, ss. 125-137, 2001
- [27] Clemente L., A. Davison, I. Reid, J. Neira, ve J.D. Tardos. Mapping large loops with a single hand-held camera. *In Robotics Science and Systems*, 2007
- [28] Cummins M. ve P. Newman, Fab-map: Probabilistic localization and mapping in the space of appearance, *Int. J. Rob. Res.*, Cilt 27, ss. 647-665, 2008
- [29] Cummins M. ve P. Newman, Appearance-only SLAM at large scale with fab-map 2.0, *Int. J. Rob. Res.*, Cilt 30(9), 2010
- [30] Cohen W. W., Adaptive mapping and navigation by teams of simple robots, *Rob. and Autonomous Systems*, Cilt 8(4), ss. 411-434, 1996
- [31] Chang H., C. Lee, Y. Hu ve Y.-H. Lu, Multi-robot slam with topological/metric maps, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, ss. 1467-1472, 2007
- [32] Davison A., Real-time simultaneous localisation and mapping with a single camera, *Int. Conf. on Computer Vision*, ss. 1403-1410, 2003
- [33] Davison A., Modelling the World in Real Time: How Robots Engineer Information *Phil. Trans. R. Soc.*, Cilt 361(1813), ss. 2875-2890, 2003
- [34] Davison A., Y.G. Cid ve N. Kita, Real-time 3D SLAM with wide-angle vision, *Proc. IFAC/EURON Symp. Intelligent Auton. Vehicles*, 2004
- [35] Davison A., I. Reid, N. Molton ve O. Stasse, Monoslam: Real-time single camera slam, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Cilt 29(6), ss. 1052-1067, 2007
- [36] Dedeoglu G. ve G. S. Sukhatme, Landmark based matching algorithm for cooperative mapping by autonomous robots, *Distributed Autonomous Robotic Systems*, Cilt 4, ss. 251-60, 2000
- [37] Dempster A.P., A.N. Laird ve D.B. Rubin. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, Cilt 39(1), ss. 1-38, 1977
- [38] Dellaert F., S.M. Seitz, C. Thorpe ve S. Thrun, EM, MCMC, and Chain flipping for structure from motion with unknown correspondence, *Machine Learning*, Cilt 50(1-2), ss. 45-71, 2003
- [39] Dellaert F. ve M. Kaess, "Square root SAM: Simultaneous localization and mapping via square root information smoothing," *Int. J. Robot. Res.*, Cilt 25(12), ss. 1181-1203, 2006
- [40] Desai J. P., A graph theoretic approach for modeling mobile robot team formations, *J. Robot. Syst.*, 19(11), ss. 511-555, 2002.
- [41] Diel M., J.S. Gutmann ve B. Nebel, Cooperative sensing in dynamic environments, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, Cilt 3, ss. 1706-1713, 2001
- [42] Di Marco M., A. Garulli, A. Giannitrapani ve A. Vicino, Simultaneous localization and map building for a team of cooperating robots: a set membership approach, *IEEE Trans. on Rob. and Aut.*, Cilt 19(2), ss. 238-249, 2003
- [43] Dissanayake G., P. Newman, S. Clark, H.F. Durrant-Whyte ve M. Csorba. An experimental and theoretical investigation into simultaneous localisation and map building (SLAM). Editörler: P. Corke and J. Trevelyan, *Lecture Notes in Control and Information Sciences: Experimental Robotics VI*, ss. 265-274, Springer Verlag, 2000
- [44] Dong W. ve J.A. Farrell, Cooperative Control of Multiple Nonholonomic Mobile Agents, *IEEE Trans. on Aut. Contr.*, Cilt 53(6), ss. 1434-1448, 2008
- [45] Dudek G., M. Jenkin, D. Milos ve E. Wilkes, Topological exploration with multiple robots, *Proc. of the 7th Int. Symposium on Rob. with Applications*, 1998
- [46] Elfes A. Sonar-based real-world mapping and navigation. *IEEE Trans. on Rob. and Aut.*, Cilt 3(3) ss. 249-265, 1987
- [47] Erkent Ö. ve H.I. Bozma, Place Representation in Topological Maps Based on Bubble Space, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 3497-3502, 2012.
- [48] Franz M. O., B. Scholkopf, H. A.Mallot ve H. H. Bulthoff, Where did I take that snapshot? Scene-based homing by image matching, *Biological Cybernetics*, Cilt 79, ss. 191-202, 1998
- [49] Fazl-Ersi E. ve J.K. Tsotsos, Histogram of Oriented Uniform Patterns for robust place recognition and categorization, *Int. J. Rob. Res.*, Cilt 31(4), ss. 468-483, 2012.
- [50] Fenwick J., P. Newman ve J. Leonard, Cooperative concurrent mapping and localization, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, Cilt 2, ss. 1810-1817, 2002.
- [51] Filliat D. ve J. Meyer, Map-based navigation in mobile robot: I. a review of localization strategies, *Cognitive Systems Research*, Cilt 4, ss. 243-282, 2003
- [52] Filliat D. ve J. Meyer, Map-based navigation in mobile robot: Ii. a review of map-learning and path-planningstrategies, *Cognitive Systems Research*, Cilt 4, ss. 283-317, 2003
- [53] Folkesson J. ve H. Christensen, Graphical slam-a self-correcting map, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, Cilt 1, ss. 383-390, 2004
- [54] Fox D., W. Burgard, H. Kruss. a ve S. Thrun, A probabilistic approach to collaborative multi-robot localization, *Auton. Rob.*, Cilt 8, ss. 325-344, 2000
- [55] Fox D., J. Ko, K. Konolige ve B. Stewart, A hierarchical bayesian approach to the revisiting problem in mobile robot map building, *Int. J. Rob. Res.*, Cilt 15, ss. 60-69, 2005
- [56] Franchi, A., L. Freda, G. Oriolo ve M.Vendittelli, The sensor-based random graph method for cooperative robot exploration, *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Cilt 14(2), 163-75, 2009

- [57] Fraundorfer F., C. Engels ve D. Nister, Topological mapping, localization and navigation using image collections, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, ss. 3872-3387, 2007
- [58] Freiburg Campus 360 degree 3D scans, <http://ais.informatik.uni-freiburg.de/projects/datasets/fr360/>
- [59] Frese U., A Discussion of Simultaneous Localization and mapping, *Auton. Rob.*, Cilt 20, ss. 25-42, 2006
- [60] Fredslund J. ve M.J. Mataric, A general algorithm for robot formations using local sensing and minimal communication, *IEEE Trans. on Rob. and Aut.*, 18(5), ss. 837-846, 2002.
- [61] Friedman S., H. Pasula ve D. Fox, Voronoi random fields: Extracting topological structure of indoor environments via place labeling, *Proc. of the Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence* ss. 2109-2114, 2007
- [62] Friedrich H., D. Dederscheck, K. Krajssek ve R. Mester, View-based robot localization using illumination-invariant spherical harmonics descriptors, *Proc. of Int. Joint Conf. on Computer Vision and Computer Graphics Theory and Applications*, Cilt 2, ss. 543-550, 2008
- [63] Grabowski R., L. E. Navarro-Serment, C. J. Paredis ve P. K. Khosla, Heterogeneous teams of modular robots for mapping and exploration, *Auton. Rob.*, Cilt 8, ss. 293-308, 2000
- [64] Guivant J.E. ve E.M. Nebot, Optimization of the simultaneous localization and map-building algorithm for real-time implementation, *IEEE Trans. on Rob. and Aut.*, Cilt 17(3), ss. 242-257, 2001
- [65] Gutmann J.-S. ve K. Konolige, Incremental mapping of large cyclic environments, *Proc. of Int. Symp. on Comp. Intelligence in Rob. and Aut.*, ss. 318-325, 1999
- [66] Hajdukova, J., Coalition formation games: A survey, *Int. Game Theory Review*, Cilt 8(4), ss. 613-641, 2006
- [67] Harris C. ve M. Stephens, A combined corner and edge detector, *AVS88*, ss. 147-151, 1988
- [68] Hartley R. ve A. Zisserman, Multiple view geometry in computer vision, *Cambridge University Press*, 2000
- [69] Hou S. P., C.C. Cheah ve J.J.E. Slotine, Dynamic region following formation control for a swarm of robots, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 1929-1934, 2009
- [70] Howard A., M. Mataric ve G. Sukhatme, Localization for mobile robot teams using maximum likelihood estimation, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, Cilt 1, ss. 434-439, 2002.
- [71] Howard A., M. Mataric ve G. Sukhatme, Putting the 'i' in 'team': an ego-centric approach to cooperative localization, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, Cilt 1, ss. 868-874, 2003
- [72] Howard A., Multi-robot mapping using manifold representations, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, Cilt 4, ss. 4198-4203, 2004
- [73] Howard A., Multi-robot simultaneous localization and mapping using particle filters, *Int. J. Rob. Res.*, Cilt 25(12), ss. 1243-1256, 2006
- [74] Huang W. H. ve K. R. Beevers, Topological map merging, *Int. J. Rob. Res.*, Cilt 24(8), ss. 601-613, 2005
- [75] Indelman V., P. Gurfil, E. Rivlin ve H. Rotstein, Distributed vision-aided cooperative localization and navigation based on three-view geometry, *IEEE Aerospace Conf.*, ss. 1-20, 2011
- [76] Jackson M.O. ve A. Wolinsky, A strategic model of social and economic networks, *J. Economic Theory*, Cilt 77, ss. 44-74, 1996
- [77] Jaulin L., Range-only slam with occupancy maps: A set-membership approach, *IEEE Trans. on Rob.*, Cilt 27(5), ss. 1004-1010, 2011
- [78] Jensfelt P., D. Kragic, J. Folkesson ve M. Björkman. A framework for vision based bearing only 3D SLAM. *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 1944 -1950, 2006
- [79] Jiang T. ve J.S. Baras, Fundamental tradeoffs and constrained coalitional games in automatic wireless networks, *Proc. of 5th Int. Symp. on Modeling and Opt. in Mobile, Ad Hoc & Wireless Networks*, 2007
- [80] Jogan M. ve A. Leonardis, Robust localization using panoramic view-based recognition, *Int. Conf. on Pattern Recognition*, Cilt 4, ss. 136-139, 2000
- [81] Kaess M., A. Ranganathan ve F. Dellaert, isam: Incremental smoothing and mapping, *IEEE Trans. on Rob.*, Cilt 24(6), ss. 1365-1378, 2008
- [82] Ni K. ve F. Dellaert, Multi-level submap based slam using nested dissection, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, ss. 2558-2565, 2010
- [83] Keith Y. K. Leung, Timothy D. Barfoot, H. Hugh ve T. Liu. Distributed and Decentralized Cooperative Simultaneous Localization and mapping for Dynamic and Sparse Robot Networks, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 3841-3847, 2011
- [84] Kim J. ve S. Sukkarieh, Airborne simultaneous localization and map building, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 406-411, 2003
- [85] Kim B., M. Kaess, L. Fletcher, J. Leonard, A. Bachrach, N. Roy, ve S. Teller, Multiple relative pose graphs for robust cooperative mapping, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 3185-3192, 2010
- [86] Klavins E., Communication complexity of multirobot systems, in *Algorithmic Foundations of Robotics V.*, Springer-Verlag, Cilt 7, ss. 275-292, 2003
- [87] Klatzky R.L., Allocentric and egocentric spatial representations: Definitions, distinctions, and interconnections, *Spatial cognition- An interdisciplinary approach to representation and processing of spatial knowledge (Lecture Notes in Artificial Intelligence 1404)*, ss. 1-17, Springer-Verlag, 1998
- [88] Knuth J. ve P. Barooah, Distributed collaborative localization of multiple vehicles from relative pose measurements, *47th Annual Allerton Conf. on Communication, Control, and Computing*, ss. 314-321, 2009
- [89] Ko J., B. Stewart, D. Fox, K. Konolige ve B. Limketkai, A practical, decision-theoretic approach to multi-robot mapping and exploration, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, ss. 3232-3238, 2003
- [90] Konolige K., D. Fox, B. Limketkai, J. Ko ve B. Stewart, Map merging for distributed robot navigation, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, Cilt 1, ss. 212-217, 2003
- [91] Konolige K., M. Agrawal, R. Bolles, M. Cowan, Creggand Fischer ve B. Gerkey, Outdoor mapping and navigation using stereo vision, *Experimental Rob.*, Cilt 39, ss. 179-190, 2008
- [92] Konolige K., J. Bowman, J. Chen, M. Mihelich, Patrick and Calonder, V. Lepetit, ve P. Fua, View-based maps, *Int. J. Rob. Res.*, Cilt 29(8), ss. 941-957, 2010
- [93] Krose B., N. Vlassis, R. Bunschoten ve Y. Motomura, A probabilistic model for appearance-based robot localization, *Image and Vision Computing*, Cilt 19, no. 6, ss. 381-391, 2001
- [94] Kuipers B., J.J. Modayil, P. Beeson, M. MacMahon ve F. Savelli, Local Metrical and Global Topological Maps in the Hybrid Spatial Semantic Hierarchy, in *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 4851-4845, 2004
- [95] Kurazume R., S. Nagata ve S. Hirose, Cooperative positioning with multiple robots, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, Cilt 2, ss. 1250-1257, 1994
- [96] Lamon R., I. Nourbakhsh, B. Jensenl ve R. Siegwart, Deriving and matching image fingerprint sequences for mobile robot localization, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, ss. 1609-1610, 2001
- [97] Leung K., T. Barfoot ve H. Liu, Decentralized cooperative simultaneous localization and mapping for dynamic and sparse robot networks, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, ss. 3554-3561, 2010
- [98] Leung K., T. Barfoot ve H. Liu, Distributed and decentralized cooperative simultaneous localization and mapping for dynamic and sparse robot networks, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 3841-3847, 2011
- [99] Levin A. ve R. Szeliski, Visual odometry and map correlation, *Proc. of the 2004 IEEE Int. Conf. on Comp. Vision and Patt. Recog.*, Cilt 1, ss. 611-618, 2004
- [100] Li X. ve Y. Xi, Distributed Formation Algorithm for Multi-agent Systems with a Relaxed Connectivity Condition, *Proc. 17th IFAC World Congress*, ss. 5137-5142, 2008
- [101] Lygeros, J., K. H. Johansson, S.N. Simic, J. Zhang ve S.S. Sastry, Dynamical properties of hybrid automata, *IEEE Trans. on Aut. Contr.*, Cilt 48(1), ss. 2-17, 2003
- [102] Lynch N. A., R. Segala ve F. Vaandrager, Hybrid I/O automata, *Inform. Comput.*, Cilt 185(1), ss. 105-157, 2003

- [103] Madhavan R., K. Fregene ve L. E. Parker, Distributed cooperative outdoor multirobot localization and mapping, *Auton. Rob.*, Cilt 17, ss. 23-39, 2004
- [104] Mahon I., S. Williams, O. Pizarro ve M. Johnson-Roberson, Efficient view-based slam using visual loop closures, *IEEE Trans. on Rob.*, Cilt 24(5), ss. 1002-1014, 2008
- [105] Makadia A. ve K. Daniilidis, Rotation recovery from spherical images without correspondences. *IEEE Trans. on Patt. Anal. and Machine Int.*, Cilt 28(7), ss. 1170-1175, 2006
- [106] Mariottini G.L., F. Morbidi, D. Prattichizzo, N. Vander Valk, N. Michael, G. Pappas ve K. Daniilidis, Vision-Based Localization for Leader Follower Formation Control, *IEEE Trans. on Rob.*, 25(6), ss. 1431-1438, 2009
- [107] Martinelli A., F. Pont ve R. Siegwart, Multi-robot localization using relative observations, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 2797-2802, 2005
- [108] Martinez S., F. Bullo, J. Cortes ve E. Frazzoli, On synchronous robotic networks Part I: Models, tasks, and complexity, *IEEE Trans. on Aut. Contr.*, 52(12), ss. 2199-2213, 2007
- [109] Marks T., A. Howard, M. Bajracharya, G. Cottrell ve L. Matthies, Gamma-slam: Using stereo vision and variance grid maps for slam in unstructured environments, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 3717-3724, 2008
- [110] Meilland M., A.I. Comport ve P. Rives, A spherical robot-centered representation for urban navigation, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, ss. 5196-5201, 2010
- [111] Merino L., J. Wiklund, F. Caballero, A. Moe, J. Ramiro, E. Forssen, K. Nordberg ve A. Ollero, Vision-Based Multi-UAV Position Estimation, *IEEE Rob. and Aut. Magazine*, ss. 53-62, 2006
- [112] Mesbahi M., On State-dependent dynamic graphs and their controllability properties, *IEEE Trans. on Aut. Contr.*, Cilt 50(3), ss. 387-392, 2005
- [113] Miklic D., S. Bogdan ve R. Fierro, Decentralized grid-based algorithms for formation reconfiguration and synchronization, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 4463-4468, 2010
- [114] Montemerlo M., S. Thrun, D. Koller ve B. Wegbreit. Fast-SLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem *Proc. of the AAAI Nat. Conf. on Artif. Intelligence*, ss. 593-598, 2002
- [115] Moravec, H. ve A. Elfes, High resolution maps for wide angles sonar, *Proc. IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, Cilt 2, ss. 116-121, 1985
- [116] Mostofi Y., Communication-aware motion planning in fading environments, *Proc. IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 3170-3174, 2008
- [117] Mourikis A. I. ve S. I. Roumeliotis, Predicting the performance of cooperative simultaneous localization and mapping (c-slam), *Int. J. Rob. Res.*, Cilt 25, ss. 1273-1286, 2006
- [118] Muhammad A. ve M. Egerstedt, Connectivity graphs as models of local interactions, *Appl. Math. Comput.*, Cilt 168(1), ss. 243-269, 2005
- [119] Murillo A., J. Guerrero ve C. Sagues, Surf features for efficient robot localization with omnidirectional images, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 3901-3907, 2007
- [120] Myerson R., Graphs and cooperation in games, *Math. Oper. Res.*, Cilt 2(3), ss. 225-229, 1977
- [121] E. W. Nettleton, H. F. Durrant-Whyte ve A. H. Goktogan, Multiple-platform localization and map building, *Proc. SPIE* Cilt 4196, ss. 337-347, 2000
- [122] Nerurkar E. D., S. I. Roumeliotis ve A. Martinelli, Distributed maximum a posteriori estimation for multi-robot cooperative localization, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 1375-1382, 2009
- [123] Newman P.M. ve J.J. Leonard, Pure range-only subsea SLAM, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 1921-1926, 2003
- [124] Ni K., D. Steedly ve F. Dellaert, Tectonic sam: exact, out-of-core, submap-based slam, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 1678-1685, 2007
- [125] Ni K. ve F. Dellaert, Multi-level submap based slam using nested dissection, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, ss. 2558-2565, 2010
- [126] Nistér, D. ve H. Stewénius. Scalable recognition with a vocabulary tree. *Proc. of the 2004 IEEE Int. Conf. on Comp. Vision and Patt. Recog.*, Cilt 2, ss. 2161-2168, 2006
- [127] Oliva A. ve A. Torralba, Modeling the Shape of the Scene: A Holistic Representation of the Spatial Envelope. *Int. J. of Computer Vision*, Cilt 42(3), ss. 145-175, 2001
- [128] Paskin M. A., Thin junction tree filters for simultaneous localization and mapping, *Proc. of Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, ss. 1157-1164, 2003
- [129] Pei Y., M. W. Mutka ve N. Xi, Coordinated Multi-Robot Real-Time Exploration With Connectivity and Bandwidth Awareness, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 5460-5465, 2010
- [130] Pereira G. A. S., V. Kumar ve M. F. M. Campos, Closed loop motion planning of cooperating mobile robots using graph connectivity, *Robot. Auton. Syst.*, Cilt 56, ss. 373-384, 2008
- [131] Peters R.A., E.K. Hambuchen, K. Kawamura ve D.M. Wilkes, The Sensory Ego-Sphere as a Short-Term Memory for Humanoids. *Proc. of the IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, 2001
- [132] Piovesan J.L., C.T. Abdallah ve H.G. Tanner, Modeling Multi-agent Systems with Hybrid Interacting Dynamics, *Proc. American Control Conf.*, ss. 3644-3649, 2009
- [133] Posner I., M. Cummins ve P. Newman, A generative framework for fast urban labeling using spatial and temporal context, *Auton. Rob.*, Cilt 26, ss. 153-170, 2009
- [134] *Radish: The Robotics Data Set Repository*, <http://radish.sourceforge.net/>
- [135] Rekleitis I. M., G. Dudek ve E. E. Miliotis, Multi-robot cooperative localization: A study of trade-offs between efficiency and accuracy, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, ss. 2690-2695, 2002.
- [136] Remolina E. ve B. Kuipers, Towards a general theory of topological maps, *Artificial Intelligence*, Cilt 152(1), ss. 47-104, 2004
- [137] *Robotic 3D Scan Repository*, <http://kos.informatik.uni-osnabrueck.de/3Dscans/>
- [138] Roy N. ve G. Dudek, Collaborative robot exploration and rendezvous: Algorithms, performance bounds and observations, *Auton. Rob.*, Cilt 11, ss. 117-136, 2001
- [139] Renzaglia A. ve A. Martinelli, Potential Field based Approach for Coordinate Exploration with a Multi-Robot Team, *IEEE Int. Workshop on Safety, Security and Rescue Rob.*, ss. 1-6, 2010
- [140] Rossi F., A. Ranganathan, F. Dellaert ve E. Menegatti, Toward Topological Localization with Spherical Fourier Transform and Uncalibrated Camera. *Omnidirectional Robot Vision Workshop, Int. Conf. Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots*, ss. 319-330, 2008
- [141] Roumeliotis S. ve G. Bekey, Distributed multirobot localization, *IEEE Trans. on Rob. and Aut.*, Cilt 18(5), ss. 781-795, 2002.
- [142] Saad, W., Z. Han, M. Debbah, A. Hjørungnes ve T. Basar, Coalitional Game Theory for Communication Networks, *IEEE Signal Process. Mag.*, ss. 77-97, 2009
- [143] Sabattini L., C. Secchi ve C. Fantuzzi, Arbitrarily shaped formations of mobile robots: artificial potential fields and coordinate transformation, *Auton. Rob.*, Cilt 30(4), ss. 385-397, 2011
- [144] Saber R. ve R. Murray, Agreement problems in networks with directed graphs and switching topology, *Proc. IEEE Conf. Decision & Control*, Cilt 4, ss. 4126-4132, 2003
- [145] Schmitt T., R. Hanek, M. Beetz, S. Buck ve B. Radig, Cooperative probabilistic state estimation for vision-based autonomous mobile robots, *IEEE Trans. on Rob. and Aut.*, Cilt 18(5), ss. 670-684, 2002.
- [146] Se S., D. Lowe, ve J. Little, Local and Global Localization for Mobile Robots using Visual Landmarks. *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, ss. 414-420, 2001
- [147] Se S. , D. Lowe ve J. Little, Vision-based global localization and mapping for mobile robots, *IEEE Trans. on Rob.*, Cilt 21(3), ss. 364-375, 2005
- [148] Sepulchre R., D.A. Paley ve N.E. Leonard, Stabilization of Planar Collective Motion: All-to-All Communication, *IEEE Trans. on Aut. Contr.*, 52(5), ss. 811-824, 2007
- [149] Sepulchre R., D.A. Paley ve N.E. Leonard, Stabilization of Planar Collective Motion with Limited Communication, *IEEE Trans. on Aut. Contr.*, Cilt 53(3), ss. 706-719, 2008

- [150] Sheng W., Q. Yang, J. Tan ve N. Xi, Distributed multi-robot coordination in area exploration, *Rob. and Autonomous Systems*, Cilt 54(12), ss. 945-955, 2006
- [151] Smaili C., M. El Najjar ve Francois, Multi-sensor fusion method using bayesian network for precise multi-vehicle localization, *IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems*, ss. 906-911, 2008
- [152] Sharma R. ve C. Taylor, Cooperative navigation of maps in gps denied areas, *IEEE Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, ss. 481-486, 2008
- [153] Simmons R. G., D. Apfelbaum, W. Burgard, D. Fox, M. Moors, S. Thrun ve H. L. S. Younes, Coordination for multi-robot exploration and mapping, *Proc. of the AAAI Nat. Conf. on Artif. Intelligence and Twelfth Conf. on Innovative Applications of Artificial Intelligence*, ss. 852-858, 2000
- [154] Sivic J. ve A. Zisserman, Video Google: A text retrieval approach to object matching in videos. *Int. Conf. on Computer Vision*, Cilt 2, ss. 1470-1477, 2003
- [155] Soyer C., H. I. Bozma ve Y. I Stefanopoulos, A new memory model for selective perception systems, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, ss. 2304-2309, 2000
- [156] Soyer C., H. I. Bozma ve Y. I Stefanopoulos, Apes-biologically motivated attentive robot, *Auton. Rob.*, Cilt 20, ss. 61-80, 2006
- [157] Stachniss C., O. Martinez Mozos ve W. Burgard, Speeding up multi-robot exploration by considering semantic place information, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 1692-1697, 2006
- [158] Steder B., G. Grisetti, C. Stachniss ve W. Burgard, Visual slam for flying vehicles, *IEEE Trans. on Rob.*, Cilt 24(5), ss. 1088-1093, 2008
- [159] Stipes J., R. Hawthorne, D. Scheidt ve D. Pacifico, Cooperative localization and mapping, *IEEE Int. Conf. on Networking, Sensing and Control*, ss. 596-601, 2006
- [160] Thrun S., Robotic mapping: A survey, *Exploring Artificial Intelligence in the New Millennium*, 2002.
- [161] Thrun S. ve Y. Liu, Multi-robot slam with sparse extended information filters, *Robotics Research*, Cilt 15, ss. 254-265, 2005
- [162] Thrun S. ve M. Montemerlo, The graph slam algorithm with applications to large-scale mapping of urban structures, *Int. J. Rob. Res.*, Cilt 25(5-6), ss. 403-429, 2006
- [163] Torralba A., K. P. Murphy, W. T. Freeman ve M. A. Rubin, Context-based vision system for place and object recognition, *IEEE Int. Conf. on Computer Vision*, Cilt 1, ss. 273, 2003
- [164] Tomatis N., I. Nourbakhsh, K. Arras ve R. Siegwart, A hybrid approach for robust and precise mobile robot navigation with compact environment modeling, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, Cilt 2, ss. 1111-1116, 2001
- [165] Ullah M., A. Pronobis, B. Caputo, J. Luo, H. Jensfelt ve R. Christensen, Towards robust place recognition for robot localization, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 530-537, 2008
- [166] Ulrich I. ve I. Nourbakhsh, Appearance-based place recognition for topological localization, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, Cilt 2, ss. 1023-1029, 2000
- [167] Unnikrishnan R. ve A. Kelly, A constrained optimization approach to globally consistent mapping, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, Cilt 1, ss. 564-569, 2002.
- [168] van Schuppen J.H., Control of distributed stochastic systems- Introduction, problems, and approaches, *Proc. of IFAC 18th World Congress*, ss. 4446-4452, Milan, Italy, Aug 2011
- [169] Vig L. ve J.A. Adams, Multi-robot coalition formation, *IEEE Trans. on Rob.*, 22(4), ss. 637-649, 2006
- [170] Wang M. ve H. Lin., An extended-HCT semantic description for visual place recognition, *Int. J. Rob. Res.*, Cilt 30, ss. 1403-1420, 2011
- [171] Watts A., A Dynamic Model of Network Formation, *Games and Econ.Behav.*, 34, ss. 331-341, 2001
- [172] Williams B., M. Cummins, José Neira, Paul Newman, Ian Reid ve Juan Tardós, A comparison of loop closing techniques in monocular SLAM, *Rob. and Aut. Systems*, 2009
- [173] Williams S., G. Dissanayake ve H. Durrant-Whyte, Towards multi-vehicle simultaneous localisation and mapping, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, Cilt 3, ss. 2743-2748, 2002.
- [174] Wisniewski R., Towards Modelling of Hybrid Systems, *Proc. of the 45th IEEE Conf. Decision & Control*, ss. 911-916, 2006
- [175] Wolf J., W. Burgard, ve H. Burkhardt, Robust vision-based localization by combining an image-retrieval system with monte carlo localization, *IEEE Trans. on Rob.*, Cilt 21(2), ss. 208-216, 2005
- [176] Wu J. ve J. Rehg, Where am I: Place instance and category recognition using spatial PACT, *Proc. of the 2004 IEEE Int. Conf. on Comp. Vision and Patt. Recog.*, ss. 1-8, 2008
- [177] Wurm K.M., C. Stachniss ve W. Burgard, Coordinated multi-robot exploration using a segmentation of the environment, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, ss. 1160-1165, 2008
- [178] Yamauchi B. ve R. Beer, Spatial learning for navigation in dynamic environments, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, Special Issue on Learning Autonomous Robots*, Cilt 26(3), ss. 496-505, 1996
- [179] Yamauchi B., Frontier-based exploration using multiple robots, *Int. Conf. on Autonomous Agents*, ss. 47-53, 1998
- [180] Zhang Z., Iterative point matching for registration of free-form curves, *Int. Journal of Computer Vision*, Cilt 13(2), ss. 119-152, 1992
- [181] Zhou X. ve S. Roumeliotis, Multi-robot slam with unknown initial correspondence: The robot rendezvous case, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, ss. 1785-1792, 2006
- [182] Zivkovic Z., B. Bakker ve B. Krose, Hierarchical map building and planning based on graph partitioning, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, ss. 803-809, 2006
- [183] Zlot R. , A. Stentz, M. Dias ve S. Thayer, Multi-robot exploration controlled by a market economy, *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, Cilt 3, ss. 3016-3023, 2002