

Tasarlanmış Engebeli Ortamda Otonom Mobil Robot Gezinimi Autonomous Mobile Robot Navigation in Structured Rough Terrain

Azad Yaşar, Erkan Uslu, Furkan Çakmak, Nihal Altuntaş, M. Fatih Amasyalı, Sırma Yavuz
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
ceazadyasar@gmail.com, {erkan, furkan, nihal, mfatih, sirma}@ce.yildiz.edu.tr

Özetçe —Robotik çalışmalarında temel problemler: haritalama, konum belirleme, gezinim ve keşif olarak verilebilir. Gezinim problemi, robot konumu, ortama ilişkin kısmi harita ve hedef nokta biliniyorken bu hedef noktaya en iyi yolun çizilmesi ve bu yolun takip edilmesi problemidir. Yol bulma ve yol takibi problemleri; ortamın statik veya dinamik olması, mobil robotun hareket kabiliyeti, mobil robot üzerinde kullanılan sensörlerin özellikleri ve ortamdaki engelerin özellikleri açısından farklı kapsamlarda değerlendirilebilir. Çalışmada Gazebo simülasyon ortamında, oluşturulmuş 4 tekerli, kızaklı yönlendirme sürürlü robot ile lazer mesafe sensörü ve derinlik sensörü kullanılmıştır. Yine Gazebo simülasyon ortamında tasarlanmış statik labirent; 15 derece sürekli rampalar, 15 derecelik süreksiz rampalar, robotun fiziki olarak aşamayacağı çukurlar, duvarlar ve robot lazer hizasının altında kalan süreksiz engeller içermektedir. Çalışma kapsamında 2B eşanlı konum belirleme ve haritalama, 3B haritalama, 3B haritaya göre yol bulma ve yol takibi Robot İşletim Sistemi (ROS) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. A* algoritmasında sezgisel terime, elde edilen 3B haritada düğümler arası yükseklik farkının bir fonksiyonunun katılması ile engebeli ortamda hedefe en iyi yolun çizdirilmesi sağlanmıştır. Çizdirilen yolun takip edilmesinde ise yolu oluşturan her ardışık iki düğüm arasında önce robotun ara hedefe yönelmesi sonrasında ise ara hedefe ilerlemesi sağlanmıştır. Labirent ortamında yapılan testlerde geliştirilen yaklaşımın engel kaçınımı, yol bulma ve yol takibinde başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler—otonom mobil robot; gezinim; engebeli ortam; 3B haritalama; A*; ROS; Gazebo.

Abstract—Main study areas for robotics research can be given as: mapping, localization, navigation and exploration. Given a robot's current position, partial map of the environment and a goal position; navigation problem can be defined as optimal path planning and path following. Path planning and path following problem should be handled according to environment being static or dynamic, robot's mobility capabilities, sensors used on the robot and the roughness of the environment. In the study a four wheeled, skid-steering robot with laser range finder and depth sensor is built for Gazebo simulation environment. Also a statically structured labyrinth that consists of 15 degree continuous ramps, 15 degree discontinuous ramps, amorphous holes that robot cannot autonomously escape from if fallen into, walls and discontinuous obstacles that are below the robot laser height. 2D simultaneous localization and mapping, 3D mapping, path planning and path following with respect to the 3D map are implemented on Robot Operating System (ROS). Optimal path planning in rough terrain is accomplished by combining A* heuristic with a function of height difference of the 3D map nodes.

Path following is carried out by turning-to and moving-towards actions on each sequential path node pairs. Tests performed on the labyrinth shows that obstacle avoidance, path planning and path following can be carried out successfully with the given implementation.

Keywords—autonomous mobile robot; navigation; rough terrain; 3D mapping; A*; ROS; Gazebo.

I. GİRİŞ

Arama kurtarma operasyonlarında robotların kullanımı konusundaki araştırmalar gün geçtikçe artmaktadır. Bu konudaki en büyük iki organizasyon DARPA Robotics Challenge ve 1997 yılından beri her sene düzenlenen Robocup Dünya Robot Olimpiyatları'nın arama kurtarma ligleridir. Afet ortamında robot takımlarının kullanımı çeşitli problemlerin çözümünü gerektirmektedir. Bu problemlere örnek olarak robotların ortamda gezinmesi, ortamın haritasının çıkarılması, robotlar arası haberleşme, robotla yönetim merkezi arası haberleşme, çok sayıda sensörden gelen bilginin gerçek zamanlı işlenmesi, robotların kurbanları tanınması verilebilir.

Engesiz alanlarda keşif ve gezinim, hareket düzlemine dik olan duvar ve benzeri engellerden kaçınım ve bu engellerin sınırlamış olduğu alanlarda en fazla keşif olarak tanımlanabilir. Engebeli alanlarda ise hareket düzlemindeki engelerin hesaba katılması ile gezinim mantığının robot platformunun hareketine olanak sağlayacak yolların da bulunmasını içerecek şekilde güncellenmesi gerekmektedir. Bu güncellenmenin yapılabilmesi için, hareket düzleminin 3 boyutlu olarak modellenmesi yanı sıra uygun hız ve pozisyon kontrollerinin de gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Gezinim için yol planlama bir başlangıç noktasından hedef noktaya engeller arasında optimum bir rota hesaplanması olarak tanımlanır. Optimum çözüm olarak en kısa yol, en kısa zaman, tehlikeli alanlara uzaklık/yakınlık veya kurbanlara yakınlık gibi kriterler dikkate alınabilir.

Bölüm II'de konu ile ilgili literatürdeki çalışmalara yer verilmiştir. Bölüm III ile simülasyon dünyasının, simüle robotun oluşturulmasından bahsedilmiştir. Bölüm IV ile ortama ilişkin 3B haritanın elde edilebilmesi için gerçekleştirilen modüllerden bahsedilmiştir. Bölüm V ile ortamdaki engeleri dikkate alarak optimum yol hesaplama ve yol takibi için önerilen

yönteme yer verilmiştir. Bölüm VI ile deneysel sonuçlara yer verilmiş olup bölüm VII ile çalışma sonuçları verilmiştir.

II. LİTERATÜR ÖZETİ

Literatürde temelde iki tip planlayıcı tanımlanmıştır, bunlar yerel ve global planlayıcılardır. Yerel planlayıcılar mevcut tüm ortamın bir alt kümesini dikkate alarak yol hesaplamasını yapar. Bu hesaplamaların hızlı olmakla birlikte yerel minimumlarda takılıp kalabileceği dikkate alınmalıdır. Global planlayıcılar ise tüm ortamı dikkate aldıklarından çalışma süreleri uzun zaman almasına rağmen optimum yolu bulmada daha başarılıdır. Engibeli alanda gezinimin temelde alan veya engellerin geçilebilir ya da etrafından dolaşılması gereken bir durumda olup olmadığına karar verebiliyor olması beklenir.

Literatürde engibeli alanda gezinim ile ilgili iki yaklaşımdan bahsedilebilir; ilki mobil robotların mekanik olarak engibeli alanlarda gezinimini arttıracak iyileştirmeler, ikincisi ise ortam bilgisinden en uygun yolun hesaplanmasına ilişkin yaklaşımlardır. Mobil robotlar için engibeli alanda gezinim kapasitesini arttırmaya yönelik çalışmalar şu şekilde özetlenebilir:

[1] ile mekanik olarak paletli yapı tekerlekli yapı arasında dönüşüme olanak sağlayan uygulama ile engibeli alan gezinimi ele alınmıştır. [2] ile eklemli 4 bacaklı robot ile engibeli alan gezinimi incelenmiştir. [3]'te rocker-bogie süspansiyon ile engibeli alan gezinimi için mekanik kapasite artırımı incelenmiştir. [4] ile omnidirectional tekerlekler ve active split offset casters (ASOCs) sürücü ile gezinim kapasitesi incelenmiştir.

Ortam bilgisinden hareketle en uygun yol bulunmasına ilişkin çalışmalar ise aşağıda listelenmiştir: [5] ile yol empedansı (path impedance) kavramı tanıtılmıştır. Yol empedansı, engellerin büyüklük ve yükseklikleri, alan eğimi ve engel yoğunluğu hesaba katılarak, alan engibeliği (roughness) ve yol kavisliliği (curvature) cinsinden, hesaplanır. Önerilen yöntem stereo görüntü işleme ve alan büyütme (region growing) algoritmaları ile gezinim için engel büyüklüklerini ve yüksekliklerini hesaplar. Yöntem genetik algoritma ve bulanıklaştırmaya dayanmaktadır. Global bir planlayıcı alan engibellik ve kavisliliğini bulanık olarak ifade edip genetik algoritmalar ile yol seçim optimizasyonunu gerçekleştirir. Yerel planlayıcı ise sensör bilgisine dayanarak, anlık karşılaşılan engellerden kaçınım için yerel yol güncellemesi yapmaktadır.

[6]'da alan engibeliği ve alan eğimi değerleri kullanılarak en küçük kareler yöntemi ile düzlem kestirimleri üzerinden dolaşım yolları belirlenmektedir. Önerilen yöntem dört alt kısımdan oluşmaktadır, bunlar: alan yükselti haritalaması, alan dolaşılabilirliğinin belirlenmesi (Terrain Traversability Analysis -TTA), yol planlama ve hareket kontrolünden oluşmaktadır. TTA işlemi dolaşılabilirlik endeksi (Traversability Index -TI) hesabına dayanmaktadır. TI hesaplaması her bir grid için; kestirilen yerel düzlem normalleri ve yerel yükselti standart sapması ile gerçekleştirilir. Yol planlama vector field histogram (VFH) yönteminin genişletilmiş bir tanımı olan Motion-Context Guided Traversability Field Histogram (MGTFH) ile gerçekleştirilmektedir. MGTFH yönteminde robotun konumundan baktığı açısız dilimler üzerinde, TI değer histogramları hesaplanarak robotu iten sanal kuvvetler oluşturulmaktadır. Bu kuvvetlerin bileşkesinde doğal olarak robot için hareket komutları oluşturulmaktadır.

[7]'de Roughness based Navigation Function (RbNF) yöntemi tanıtılmıştır. Engibellik ölçüsü ortama ilişkin yerel yükselti standart sapması olarak tanımlanmaktadır. Optimum bir çözüm olarak hedef noktadan itibaren genişleyen yerel alanlarda RbNF yayılımı üzerinde Chebyshev mesafe ölçüsü ile optimum yol tespiti gerçekleştirilmektedir.

[8] ile engel uzlaşma (obstacle negotiation) problemi, çeşitli beceri hareket komutlarına (rampa çıkma, merdiven tırmanma gibi) indirgenebilen davranışsal haritalar kapsamında tanımlanır. Davranışsal haritalar yükselti haritalarından hareketle hesaplanmaktadır. Beceri tanımları ise yapısal özelliklerden hareketlerle hesaplanmış bulanık kural sınıflarına göre belirlenmektedir. Önerilen yöntem dört alt adımda tanımlanmaktadır, bunlar: yükselti haritalama, alan sınıflama, beceri planlama, hareket kontrolüdür. [8]'de kullanılan donanımsal altyapı, Tarantula platformuna, kolların açısını bulmak için potansiyometreler ve kolların temasını algılamak üzere dokunma sensörleri ile güncellemesinden ibarettir. Ayrıca 3 serbestlik dereceli IMU ve 2 adet lazer mesafe sensörü (laser range finder - LRF) kullanılmaktadır. LRF'lerden ilki tarama eşleştirme amacıyla hareket düzlemine paralel kalacak şekilde kullanılmaktadır. İkinci LRF ise yere doğru eğimli bakacak şekilde yerleştirilmiş olup yükselti haritalaması için kullanılmaktadır. Robot için poz bilgisi IMU oryantasyonu ve görsel odometri ötelemesi ile oluşturulmaktadır. Önerilen yöntem bulanıklaştırılmış ortam özelliklerini kullanmaktadır. Bulanık özellikler hem ön sınıflamada (düz alanlar, duvar ve karar verilemeyen alanlar) hem de MRF tabanlı karar verilemeyen alanların detaylı sınıflandırılmasında (rampa, merdiven gibi) kullanılmaktadır. Yöntem ile elde edilen beceri ön koşulları ise farklı sınıflar arası geçiş bölgelerini belirleyerek, beceri gerektiren alanlar için ilk başlangıç yerlerini tanımlamaktadır. Özel beceri gerektiren alanların ön tanımlı komut setleri ile geçilebilmesi sayesinde, engibeli alan gezinimi, 2 boyutlu engibesiz alan gezinimine indirgenebilmektedir.

[9]'da Davranış Kopyalama (Behavioural Cloning) yöntemi ile ortamın matematik olarak modellenmesi yerine, uzman arama kurtarma operatörlerinin taklit edilmesi ile engibeli alanda mobil robotların gezinimi sağlanmıştır. Uzman operatörlerin uygulamış olduğu hareket komutları ortam bilgisi ile eşleştirilerek, benzer ölçümlerde hangi komutların otonom uygulanacağı belirlenmektedir.

[10] 3 boyutlu derinlik haritaları ile ortam modelleme, güvenli alanları belirleme ve engel kaçınımını sağlayan ilk çalışmalardandır.

[11] ile engibeli alanlarda bulanık mantık kontrol ile gezinim uygulanmıştır. Ortam yerel eğimi ve alan tipine göre bulanıklaştırma ile hareket komutları üretilmektedir.

[12]'de Dynamic Window Approach (DWA) yaklaşımının genelleştirilmiş bir tanımı olan passivity-based nonlinear model predictive (PB/MPC) kullanılmaktadır. Kapsamlı bir ortam ve robot matematik modeline dayanan bir yöntemdir. Passivity-based control yöntemi sistem denge değerinin global asimptotik olarak ulaşılabilir olmasını garanti eder. Doğrusal olmayan MPC ile herhangi bir kısıt denkleminin optimizasyon problemine dahil edilebilmesi sağlanmaktadır.

[13] ile ortam yükseklik haritasından hareketle hesaplanan bulanık dolaşım haritası, iki farklı reaktif yerel davranışlar ile

birleştirilmiştir. Yerel davranışlar; yerel engel kaçınımı, bölgesel dolaşım ve ara hedefleri ulaşım olarak tanımlanmaktadır. Reaktif davranışlar sensör ölçümlerine dayanırken, bulanık dolaşım haritası ise engelbeli alana ilişkin olarak global bilgiye dayanmaktadır. Global ve yerel davranışların birleştirilmesi tüm davranış kararlarının belirli ağırlıklarla toplanmasından bulunur.

[14] ile ortam modellenmesi çok yönlü olarak yerleştirilmiş olan 8 adet RGB-D kamera ile gerçekleştirilir. Çalışma ROS gezinim paketini, engel maliyet haritaları sürekli değerleri kabul edecek şekilde güncelleyerek kullanmaktadır.

[15] ile iki aşamalı bir yaklaşım ile hızlı ve dengeli bir yol bulunması hedeflenmiştir. İlk aşamada ilkin yol tespiti sadece yol engelbeliliği ve robotun desteklediği komutlar ile sınırlandırılarak yapılır. İkinci aşamada ise ilkin yol çevresiyle sınırlandırılmış fakat robotun tüm durum değişkenlerini dikkate alarak yol iyileştirmesi yapılır. Alana ilişkin yükseklik haritasından hareketle engelbelilik haritası oluşturulur. Sonrasında maksimum filtresi uygulanır. Elde edilen yükseklik değerleri için bir kesim ve [0-1] arası ölçekleme uygulanır. Son olarak 2 boyutlu Gauss filtresi ile alan engelbelilik haritası elde edilmiş olur. Engelbelilik haritası ilkin ve ikincil yol hesaplamalarında kullanılır. İlk yol hesaplaması sadece düşük riskli alanlar içerecek fakat yüksek riskli alanlardan kaçınacak şekilde bir yol hesabı yapar. İkincil ve detaylı yol hesaplaması ise tüm robot durumlarını içeren; ortam riski, robot güvenliği ve komut gerçekleştirme zamanlarını dikkate alarak oluşturulan maliyet fonksiyonu kullanan bir graf yapısı üzerinden gerçekleştirilir.

[16] ile yol arama, gezege üretimi ve gezege takibi adımlarını bütün olarak ele alındığı bir yöntem önerilmiştir. Yol arama, alan engelbeliliği ölçüsüne (ilgililenen dairesel alanın varyansı) ve alan eğimine (bulunulan noktadan tüm yönlerde eğim hesabı) ölçülerinden oluşturulan bir maliyet fonksiyonunun minimizasyonu olarak tanımlanır. Gezege üretimi adımıyla hesaplanan yollardaki kavislilik ve yumuşaklık sağlanır. Gezege takibi adımıyla ise robotun hesaplanan gezinimde ilerlemesi sağlanır.

[17] ile Rapidly Exploring Random Trees (RRT) ile en uygun yol bulunmaktadır. RRT'nin engelbeli alan için uyarlanması, RRT rassallaştırmasının düşük gezinim zorluğu sağlayan alanlara meyillendirilmesi ile sağlanır.

[18]'de engelbeli ortam engellilik (obstacleness) ölçüsü ile ifade edilmiştir. Engellilik ölçüsü alan eğim açısı (terrain inclination), alan fiziki özellikleri (dinamik ve statik sürtünmeler) ve yan eğim açısı (lateral inclination) cinsinden tanımlanmaktadır. RRT algoritması hesaplanan bu alan ölçüsü üzerinden en uygun yolu hesaplamak için kullanılır.

[19]'da gerçek operatörlerin engelbeli alanlarda robotları kumanda edişleri incelenerek, operatörlerin robotu devrilme ve kayma vb. durumlara sokmayacak şekilde kumanda ettiklerini gözlemlemişlerdir. Buradan hareketle engelbeli alanda gezinimde robot için kayma ve yuvarlanma durumları oluşturmayacak komutlar üretecek yolların tespiti hedeflenmiştir. Önerilen yöntem gradyen hesabı (engelbeli alan için gradyen hesabı), düğüm belirleme (alan düz ve engelbeli alanlar olarak etiketlenir ve her bir düz alan bir düğüm olarak atanır) ve yol değerlendirme (mevcut konumdan hedefe giderken düğümlerden geçecek şekilde bulunan yolların puanlanması) adımlarından oluşmaktadır. Alternatif yollar puanlanırken geçilecek düğümler arası toplam yuvarlanma açısı farkı, toplam yalpa açısı farkı ve toplam mesafe cinsinden hesaplanan maliyet fonksiyonu kullanılır.

[20] ile stereo görüntüleme ile görsel olarak öğren ve tekrarla gezinim (visual teach-and-repeat navigation) yaklaşımı kullanılmıştır. Öğrenme aşamasında robot belirli bir rota boyunca kumanda edilirken elde ettiği görüntüleri kaydeder. Görüntülerin işlenmesi ile aynı rotanın farklı yönlerde istenen sayı kadar tekrarlanabilmesi sağlanmaktadır. Görüntü işleme aşamasında SURF yöntemi özellik çıkarımı için kullanılırken, RANSAC yöntemi ise aday yollardan aykırı olanları elemek için kullanılır.

[21] ile kızaklı-yönlendirme (skid-steering) sürürlü, paletli robotlar için tekerlek odometrisinin ortam bilgisine dayanarak iyileştirilmesi incelenmiştir. Geliştirilen yöntemde IMU titreşim verisine ilişkin, zaman boyutundaki istatistiki özellikler, frekans boyutundaki özellikler ve dalgacık dönüşümü boyutu özellikleri hesaplanıp, özellik seçimi uygulanmaktadır. Elde edilen ortam bilgisine dayanarak tekerlek odometrisinin ne şekilde güncelleneceği belirlenir.

[22]'de Parçacık Sürü Optimizasyonu ile (Particle Swarm Optimization - PSO) mobil robotların engelbeli alanlarda doğrusal parçalı yollar seçmesi sağlanarak, geliştirilen kontrol yapısı ile bu yolların takip edilmesi sağlanır.

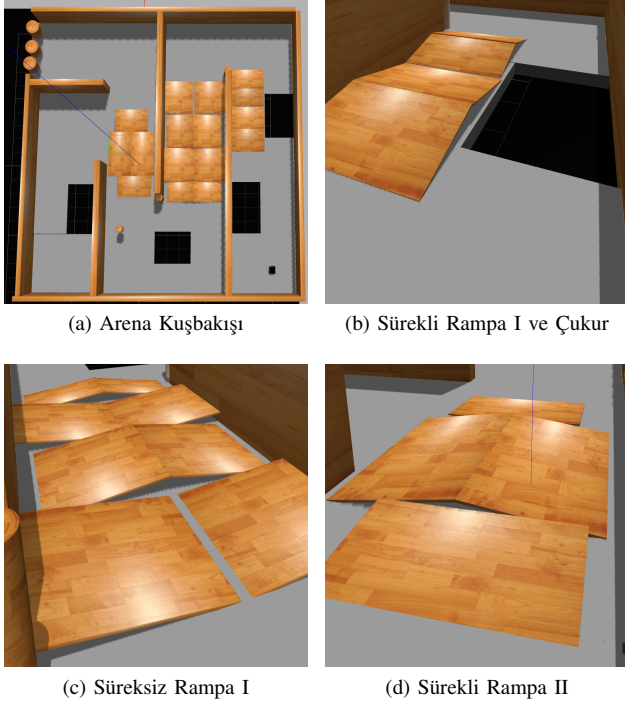
[23]'de Parçacık Sürü Optimizasyonu ile (Particle Swarm Optimization - PSO) mobil robotların engelbeli alanlarda doğrusal parçalı yollar seçmesi sağlanarak, geliştirilen kontrol yapısı ile bu yolların takip edilmesi sağlanır.

[23] ile Robocup Arama Kurtarma ligi Keşif-4 yarışma alanı için negatif engellerden kaçınarak gezinim ve keşif amacıyla 2B eşanlı konum belirleme ve haritalama ve 3B haritalama yöntemleri birlikte kullanılarak gezilebilir yer haritası çıkarılarak kullanılmıştır.

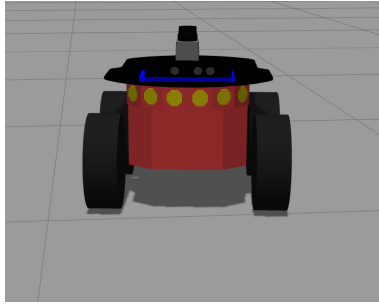
III. SİMÜLASYON DÜNYASI VE ROBOTUN OLUŞTURULMASI

Robotun engelbeli ortamda gezinimini test edebilmek için Robocup 2016 Almanya Gerçek Robot Arama Kurtarma Ligi, keşif 5 yarışması baz alınarak Gazebo simülasyon ortamında bir labirent oluşturulmuştur. Bu alan robotun düştüğünde kendisini otonom olarak kurtaramayacağı çukurlar, geçilemez duvarlar, 15 derece sürekli rampalar, 15 derece süreksiz rampalar, alçak yükseklikte ayırık engeller içermektedir. Şekil 1 ile Gazebo simülasyon ortamında oluşturulan test alanına ilişkin (a) kuşbakışı görünüş, (b) 15 derecelik sürekli rampalar ile çukur ve (c, d) 15 derecelik süreksiz rampa versiyonları verilmiştir.

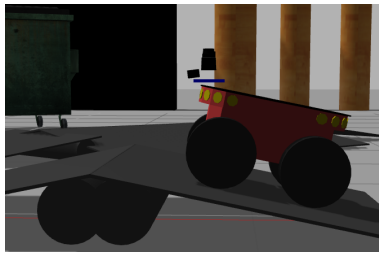
Gazebo simülasyon ortamında kullanılmak üzere SDF [24] formatında bir mobil robot tasarlanmıştır. İlk olarak robotun gövdesi, 4 tekerlek ve tekerlek ile gövde bağlantıları için SDF formatında eklem (joint) adı verilen bağlantılar oluşturulmuştur. Daha sonra robotun engelbelilerden geçerken sensörlerinin yere paralel olarak kalmasını sağlamak amacıyla bir raf yapısı eklenmiştir. Gerçeklenen eklenti (Gazebo plug-in) ile robot oryantasyonuna göre rafın her zaman için yer düzlemine paralel kalması sağlanmıştır. Robot için 270 derece görüş açısında, 640 noktadan, 30 m'ye kadar ölçüm yapan lazer mesafe sensörü ile yatayda 62,8 derece görüş açısında, 640×480 çözünürlükte, renkli görüntü ve aynı çözünürlükte 10 m'ye kadar derinlik bilgisi sağlayan derinlik sensörü kullanılmıştır. Şekil 2 ile oluşturulan simülasyon robotun önden görünüşü ve raf yapısının çalışması gösterilmiştir.



Şekil 1. Arena Görselleri



(a) Robot'un Önden Görseli



(b) Robot Rafi

Şekil 2. Robot Görselleri

IV. ENGEBELİ ORTAMDA HARİTALAMA VE KONUM BELİRLEME

Ortamda bulunan engeller ve engebeler üç eksen de değişim gösterdiğinden dolayı, robot oluşturulan ortamda gezerken üç eksen de oryantasyon ve pozisyonu değişimi göstermektedir. Gerek ortamın 3B yapısından gerekse robotun 3B konumundan dolayı ortamı anlamlandırmak ve verilen bir hedefe optimum yoldan gezinim yapabilmek için 3B ortam harita bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde 3B eşanlı konum belirleme

ve haritalama yöntemleri mevcut olmak ile birlikte [25], [26] bu yöntemler görüntü ve derinlik temelli özellik çıkarımları kullandıkları için yüksek işlem yükü gerektirmektedir. Çalışma ile tanımlanmış problemin sınırları ve gereksinimleri doğrultusunda 2B eşanlı konum belirleme ve haritalama ile elde edilen konum kestiriminin bir 3B haritalama yöntemi ile birlikte kullanılmasının başarısı incelenmiştir.

A. 2B Eşanlı Konum Belirleme ve Haritalama

Eşanlı konum belirleme ve haritalama (Simultaneous Localization and Mapping - SLAM) robotun çevresi ile etkileşimine göre robotun konumunu çıkarsamaya çalışan aynı zamanda ortamın 2B haritasını çıkaran bir sistemdir. Eşanlılık robotun konumunu bulabilmesi için bir harita bilgisine ihtiyaç duymasından, haritalama yapabilmesi için ise konum bilgisine ihtiyaç duymasından kaynaklanmaktadır. Yinelemeli olarak konum ve harita bilgisinin güncellenmesi ile SLAM yaklaşımı gerçekleştirilmektedir.

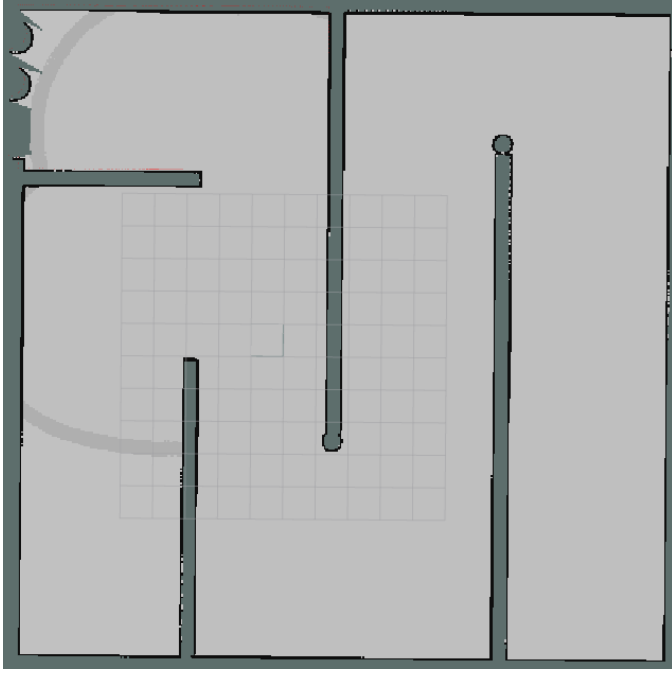
gMapping [27] Rao-Blackwellized Parçacık Filtresi (RBPF) temelli, parçacık kullanan ızgara (grid) tabanlı bir yöntemdir. Her bir parçacık kendine ait robot pozisyonu (konum ve oryantasyon) ve ortam haritası inancına sahiptir. Her yeni gelen sensör bilgisi ile parçacıkların inançları güncellenir. gMapping yöntemi, odometri güncellemesine göre bir noktadan başlayarak, Tepe Tırmanma temelli lazer-harita eşlemesi ile robot konumunu en iyi şekilde tahmin etmeye çalışır (optimizasyon adımı). Lazer ölçümü ile harita en uygun şekilde eşleştirildikten sonra haritada güncelleme yapılır (kayıtlama adımı).

Çalışmada gMapping yönteminin optimizasyon adımlarının iyileştirildiği [28] ile verilen 2B SLAM yöntemi kullanılmıştır. [28] ile haritalama için ihtiyaç duyulan odometri bilgisi yöntem tarafından içsel olarak üretilmektedir, ayrıca optimizasyon ile harita güncelleme adımları paralel olarak çalışabilecek şekilde iyileştirme yapılmıştır. İyileştirme adımları sayesinde tek parçacık kullanımı yeterli olmuştur.

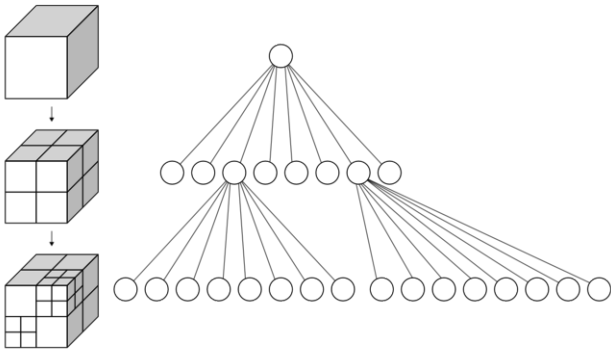
Şekil 3 ile oluşturulan test ortamına ilişkin gMapping haritalama sonucu verilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere robotun lazer seviyesinde olmayan (çukurlar, sürekli-süreksiz rampalar) herhangi bir engel 2B haritalamada görülememektedir.

B. 3B Haritalama

Bu ızgara tipindeki harita robotun her zaman için yere paralel olan lazerinden alınan veri ile oluşturulduğu için çukur, engebe ve kesik alçak duvarlar gibi engelleri tespit edemeyecektir. Bu durumda robotun çevresini daha iyi analiz edebilmek için 3B bir haritaya ihtiyaç vardır. Bu amaçla OctoMap [29] 3B haritalama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem tam 3B haritalama, güncellenebilirlik, esneklik ve verimli alan kullanımı özelliklerini karşılayacak şekilde geliştirilmiştir. OctoMap, tam 3B haritalama özelliği ile, haritalanacak alana ilişkin bir ön bilgiye ihtiyaç duyulmadığını dolayısıyla keyfi ortamların haritalanabileceğini ifade eder. Güncellenebilirlik, özelliği, ortam bilgisinin olasılıksal olarak saklandığı ve harita güncellemesinin mümkün olduğunu ifade eder. Esneklik özelliği dinamik olarak değişebilen harita boyutunu ifade eder. Aynı zamanda esneklik ile bir minimum çözünürlük sınırı olmak şartıyla farklı çözünürlüklerde haritalama mümkündür. Verimli alan kullanımı harita bilgisinin disk ve hafızada verimli



Şekil 3. Alana ilişkin olarak elde edilen gMapping haritalama sonucu

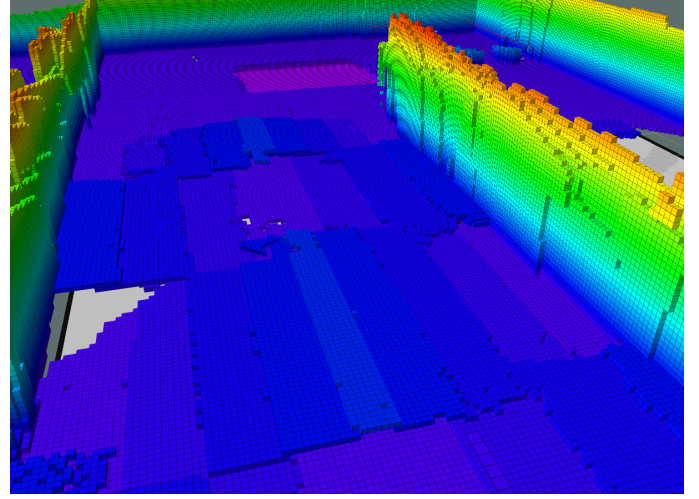


Şekil 4. Octree veri yapısının gösterimi

bir şekilde erişilebilir ve saklanabilir olduğunu ifade etmektedir. OctoMap yöntemi robotun üzerinde bulunan derinlik kamerasından gelen nokta kümesi ve gMapping yönteminden üretilen konum bilgisine göre ortamın 3B haritasını Octree veri yapısı ile saklamaktadır. Octree veri yapısının gösterimi Şekil 4 ile verilmektedir. Şekilde Octree ile 3B uzayın dolu hacimlerde alt düğümlere bölünerek ifade edildiği görülmektedir.

OctoMap ile bir p hacim doluluk olasılığı, Denklem 1 ile verilen logit fonksiyonu yardımıyla, $t = \text{logit}(p)$ olmak üzere Denklem 2 ile tutulur. Bu yaklaşım güncelleme adımlarının toplama işlemleri ile yapılabilmesini sağlar. Her bir yaprak üst düğüme en büyük çocuk düğüm logit doluluk değerleri aktararak kök düğüme kadar yayılır.

$$\text{logit}(p) \triangleq \log\left(\frac{p}{1-p}\right) = \log(p) - \log(1-p) \quad (1)$$



Şekil 5. OctoMap haritalama sonucu: süreksiz rampalar, çukur ve duvarların 3B gösterimi

$$\text{probability}(t) \triangleq \left(\frac{1}{1 + e^{-t}}\right) \quad (2)$$

Şekil 5 ile test ortamında 3B OctoMap haritalama sonucu süreksiz rampalar, duvarlar ve çukura ilişkin elde edilen 3B gösterime yer verilmiştir. Bu bakış açısı simülasyon ortamındaki Şekil 1c ile verilen bakış açısına denk gelmektedir.

V. GEZİNİM

Gezinim problemi, bu çalışmada ele alındığı şekliyle, kısmen haritalanmış bir ortamda verilen bir hedefe en uygun yolun çizilmesi ve çizilmiş olan bu yolun takip edilmesi problemidir. Yol planlaması ile elde edilecek yolun geçilemeyecek engelleri ve sadece belirli bölgelerden geçişe izin veren engebeleri dikkate alması beklenir.

Çukur, engebe, kesik alçak duvar ve labirent duvarlarının bulunduğu ortamlarda robotun gezinimini sağlamak için gezilecek yerlerin çukur, kesik alçak duvar ve labirent duvarlarından belirli bir uzaklıkta olması gerekmektedir. Bu sayede robotun güvenli yol çizebilmesi için bir maliyet haritası oluşturularak, optimum yolların engellerden belirli bir uzaklıktan geçmesi sağlanmıştır.

A. Yol Planlama

OctoMap'ten alınan 3B harita 2B indirgenmiştir ve 2B bir graf oluşturulmuştur. Düğümlerin temsil ettiği 3B harita hücrelerinin yükseklikleri ise düğümlerde, daha sonra kullanılmak üzere saklanmıştır. Robotun bulunduğu düğümden hedef olarak verilen düğüme en kısa yolu bulabilmek için A* algoritması kullanılmıştır. Fakat A* ortamı 2B olarak ele aldığı için maliyet fonksiyonuna sadece bulunan düğüm ile test edilen düğüm ve test edilen düğüm ile hedef düğüm arasındaki mesafeyi katmaktadır. Bu maliyet fonksiyonu 2B, diğer bir deyişle robotun z -ekseninde hareketi bulunmayan ortamlarda ideal sonuçlar vermektedir. Fakat tasarlanan haritada engeller bulunmakta ve robotun bu engellerden geçerken kendi fiziksel sınırlarını çok zorlamaması gerekmektedir. Örneğin rampaya çıkarken; çıkış noktasının zemin ile yükseklik farkını

da hesaba katması gerekmektedir. Bu şekilde yükseklik farkı da geleneksel A* maliyet fonksiyonuna katılarak Denklem 3 ile verildiği gibi yeni bir maliyet fonksiyonu oluşturulmuştur.

$$f = \mathbf{g_cost} + \mathbf{h_cost} + a \times fark \quad \{a|a > 0\} \quad (3)$$

Bulunan yolların duvar ve engellerin yakınından geçmesini engellemek için 2B graf yapısında, engellerden robot genişliğinin yarısına denk gelen sayıdaki düğümleri kopartılarak yol planlanmaktadır. Bu sayede örneğin arasında boşluk olan fakat robotun geçemeyeceği darlıkta olan süreksiz alçak engellerin arasından yol planlanmamaktadır. Verilen hedef noktanın 3B olarak haritalanmış alanın dışında olması durumunda ise yol planlama verilen hedef noktaya en yakın düğümde bitirilmektedir.

B. Yol Takibi

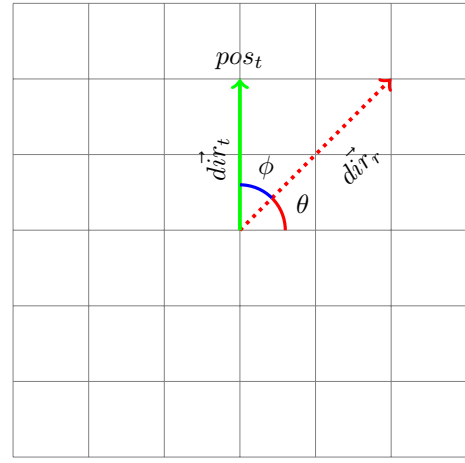
En kısa yol bulunduktan sonra robotun bulunduğu düğüm-den bir sonraki düğüme ulaşması gerekmektedir. Daha genel olarak robotun çizilen yolu en az sapma yaparak takip etmesi gerekmektedir. Robotun hareketini sağlayabilmek için doğrusal- x ve açısal- z değerleri değiştirilmektedir. Robotun yolu takip edebilmesi için robotun odometrisi, hedef konum (pos_t) ve robotun yaw (z -ekseninde ki) açısı kullanılmıştır. yaw açısı aracılığıyla robotun doğrultu vektörü bulunabilir bu vektörü dir_r olarak isimlendirelim. Hedef konumdan robot konumu çıkarılarak ise hedef doğrultu vektörü hesaplanabilir bunu da dir_t olarak isimlendirelim. Robotun dönüş yapıp yapmayacağını ve yapacak ise ne kadar keskin dönüş yapacağını dir_r ve dir_t vektörleri arasındaki açı vermektedir. Bu iki vektör arasındaki açıyı bulabilmek için Denklem 4 ile verildiği gibi kosinüs teoreminden yararlanılmıştır. Şekil 6 ile bu teorem ve problemle ilgili görsel verilmiştir.

$$\cos(\phi) = \frac{\vec{dir}_t \cdot \vec{dir}_r}{\|\vec{dir}_t\| \|\vec{dir}_r\|} \quad (4)$$

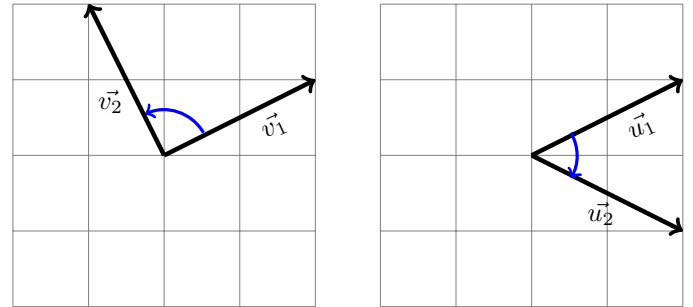
$$\phi = \arccos\left(\frac{\vec{dir}_t \cdot \vec{dir}_r}{\|\vec{dir}_t\| \|\vec{dir}_r\|}\right)$$

Bu açı dönüşün büyüklüğü ile ilgili bilgi vermektedir ama robotun saat yönünde mi veya saat yönünün tersinde mi dönüş yapması gerektiği bilgisi bulunmamaktadır. Bunu öğrenebilmek için vektör çarpımı kullanılabilir. İki vektörün vektör çarpım sonucu birbirlerine göre konumları ile ilgili bilgi vermektedir. Vektör çarpımı Denklem 5 ve 6 ile verildiği gibi hesaplanabilir, işlemci kullanımı ve verimlilik açısından Denklem 6 implement edilmiştir. Şekil 7 ile her iki durum için görseller bulunabilir. Şekillerde robotun verilen hedeflere yönelmesi için hangi taraftan dönüşünün daha uygun olduğu çıkarılabilmektedir.

$$\vec{v}_1 \times \vec{v}_2 = \|\vec{v}_1\| \|\vec{v}_2\| \sin(\alpha) \quad (5)$$



Şekil 6. Dönülmesi gereken açı



Şekil 7. Hedefin robota göre konumu

$$\vec{v}_1 \times \vec{v}_2 = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ x_1 & y_1 & 0 \\ x_2 & y_2 & 0 \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \vec{v}_1 \times \vec{v}_2 &= x_1 \hat{i} x_2 \hat{i} + x_1 \hat{i} y_2 \hat{j} + y_1 \hat{j} x_1 \hat{i} + y_1 \hat{j} y_2 \hat{j} \\ &= x_1 y_2 - y_1 x_2 \end{aligned}$$

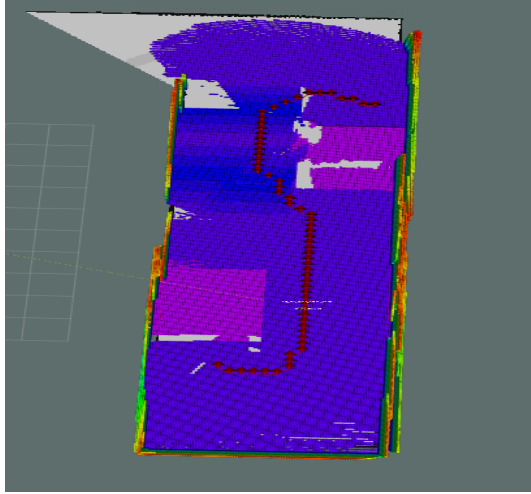
Robot, hesaplanmış olan optimum yolu düğüm düğüm tüketmektedir. Robot sıradaki hedef düğüme yukarıda bahsedilen mantıkta yönelmekte sonrasında da hedefe ilerlemektedir. Adım adım yol takibi yapılırken bir yandan da eşanlı olarak 2B SLAM ve 3B haritalama yürütülmektedir. Çukur veya rampalara ilişkin 3B gösterimlerin yol takibi sırasında tam olarak inşa edilmemiş olduğu anlarda (örneğin çukur kenarının 3B sensör görüş alanında gölge oluşturduğu bir durum), robot için ileri bakışlı yükseklik farkına dayanan engel kaçınımı gerçekleştirilmiştir. Bu sayede çukur ve duvarlar için engel kaçınımı sağlanmıştır.

VI. DENEYSEL SONUÇLAR

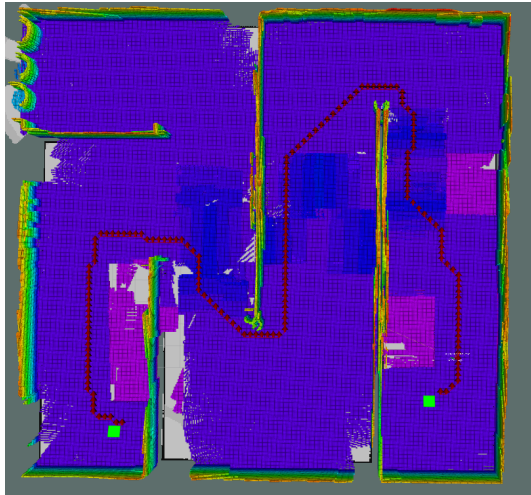
Bahsedilen gezinim yaklaşımı ile elde edilen yol bulma sonuçları Şekil 8 ile verilmiştir.

- (a)'da iki çukur arasında çizilen yol çukurlara belirli bir mesafe uzaklıkta ve sürekli rampadan geçecek şekildedir.

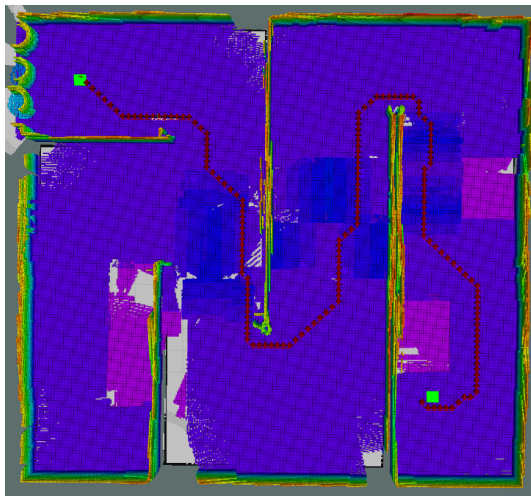
- (b, c)'de alanın iki ucu arasında verilen hedefte çukurlardan ve labirent duvarlarından uzakta, süreksiz rampalarda ise kesişim noktasında yol çizilmiştir.



(a) İki çukur arasında



(b) Başlangıç ve bitiş noktası arasında - I



(c) Başlangıç ve bitiş noktası arasında - II

Şekil 8. Yol bulma sonuçları

Süreksiz rampalardaki gezinim¹ ve alanın tamamındaki gezinim² ilişkin sonuçlar çevrimiçi videolar olarak verilmiştir.

Robotun performansı çeşitli harita boyutlarında test edilmiştir. Harita boyutuyla doğru orantılı olarak büyüyen düğüm ve bağlantı sayılarının sonuca etkisi aşağıdaki tabloda verilmiştir. OctoMap olarak alınan ortam haritasından düğümlere ve bağlantılara dönüştürme işlemi en çok zaman alan işlem olduğu için robot yol planlaması yaparken arkada çalışacak şekilde thread olarak kullanılmıştır. Düğümler arası bağlantı oluşturulurken düğümler birbirinden bağımsız ele alındığı için yine birden fazla thread ile bu işlem gerçekleştirilmiştir. Tablo I ile düğüm sayısına karşılık yol hesaplama süreleri verilmiştir.

Tablo I. DÜĞÜM SAYISINA GÖRE YOL HESAPLAMA PERFORMANSI

Düğüm Sayısı (n)	Hesaplama Süresi
$n < 750$	0-5 sn
$750 < n < 1250$	5-10 sn
$1250 < n < 1750$	12-18 sn
$1750 < n < 2750$	18-35 sn

VII. SONUÇLAR

Gazebo simülasyon ortamında oluşturulmuş tasarlı bir alanda, lazer ve derinlik sensörü taşıyan robot ile ortamın 3B özelliklerini dikkate alarak gezinim gerçekleştirmek istenmiştir. Bu amaçla robotun geçemeyeceği çukur ve duvarlar ile robotun sadece belirli noktalardan geçişine izin veren sürekli ve süreksiz rampalar içeren ortamda en iyi yol bulma, A* algoritmasında sezgisel terime yol düğümleri arasındaki yükseklik farkının uygun şekilde eklenmesi ile sağlanmıştır. Duvarlara ve çukurlara robotun yarıyı genişliğindeki düğümler dikkate alınmadan yol planlaması yapılmaktadır. Bu sayede ard arda elle verilen hedeflere robotun ortamın 3B özelliklerini dikkate alarak yaptığı otonom gezinim ile ortamın tamamı haritalanıp gezilebilmiştir. Uygulamanın, farklı tasarlanmış alanlara genelleştirilebilmesi, zemin yüksekliği, düğümler arası yükseklik kesim değeri, düğüm çözünürlüğü, hedefe ulaşma mesafe eşik değeri, odometri yineleme frekansı ve OctoMap yineleme frekansı gibi parameterlerin uygun şekilde verilmesi ile sağlanabilmektedir.

YAZAR KATKILARI

Tüm yazarlar çalışmaya eşit oranda katkı sağlamamıştır. İkinci Yazar çalışmanın sorumlu yazarıdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu TÜBİTAK (EEEAG-113E212 Projesi) ve Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü YTÜ-BAPK (2015-04-01-GEP01 ve 2015-04-01-KAP01) tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Y. G. Kim, J. H. Kwak, J. Kim, J. An, K. D. Lee, "Adaptive driving mode control of mobile platform with wheel-track hybrid type for rough terrain in the civil environment," in Control Automation and Systems (ICCAS), 2010 International Conference on, 2010.

¹<https://youtu.be/IX1P8gxMo-g>

²<https://youtu.be/wxhSxQDH4U>

- [2] M. Zucker, J. Bagnell, C. Atkeson, J. Kuffner, "An optimization approach to rough terrain locomotion," in *Robotics and Automation (ICRA)*, 2010 IEEE International Conference on, 2010.
- [3] M. Jaradat, M. BaniSalim, F. Awad, "Autonomous navigation robot for landmine detection applications," in *Mechatronics and its Applications (ISMA)*, 2012 8th International Symposium on, 2012.
- [4] M. Udengaard, K. Iagnemma, "Kinematic analysis and control of an omnidirectional mobile robot in rough terrain," in *Intelligent Robots and Systems*, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on, 2007.
- [5] M. Tarokh, "A Genetic Robot Path Planner with Fuzzy Logic Adaptation," in *Computer and Information Science*, 2007. ICIS 2007. 6th IEEE/ACIS International Conference on, 2007.
- [6] C. Ye, J. Borenstein, "A method for mobile robot navigation on rough terrain," in *Robotics and Automation*, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on, 2004.
- [7] A. Tahirovic, G. Magnani, Y. Kuwata, "An approximate of the cost-to-go map on rough terrains," in *Mechatronics (ICM)*, 2013 IEEE International Conference on, 2013.
- [8] C. Dornhege, A. Kleiner, "Behavior maps for online planning of obstacle negotiation and climbing on rough terrain," in *Intelligent Robots and Systems*, 2007 (IROS 2007) IEEE/RSJ International Conference on, 2007.
- [9] R. Sheh, B. Hengst, C. Sammut, "Behavioural cloning for driving robots over rough terrain," in *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2011 IEEE/RSJ International Conference on, 2011.
- [10] Y. Niwa, S. Yukita, H. Hanaizumi, "Depthmap-based obstacle avoidance on rough terrain," in *Intelligent Robots and Systems*, 2004. (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on, 2004.
- [11] D. Elayaraja, S. Ramabalan, "Fuzzy logic based motion control of mobile robot in a rough terrain," in *Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM)*, 2012 International Conference on, 2012.
- [12] A. Tahirovic, G. Magnani, "General Framework for Mobile Robot Navigation Using Passivity-Based MPC," *Automatic Control*, IEEE Transactions on, vol. 56, no. 1, pp. 184-190, Jan 2011.
- [13] A. Howard, B. Werger, H. Seraji, "Integrating terrain maps into a reactive navigation strategy," in *Robotics and Automation*, 2003. Proceedings. ICRA '03. IEEE International Conference on, 2003.
- [14] M. Schwarz, S. Behnke, "Local Navigation in Rough Terrain using Omnidirectional Height," in *ISR/Robotik 2014; 41st International Symposium on Robotics; Proceedings of*, 2014.
- [15] M. Brunner, B. Bruggemann, D. Schulz, "Motion planning for actively reconfigurable mobile robots in search and rescue scenarios," in *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, 2012 IEEE International Symposium on, 2012.
- [16] Y. Guo, L. Parker, D. Jung, Z. Dong, "Performance-based rough terrain navigation for nonholonomic mobile robots," in *Industrial Electronics Society*, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE, 2003.
- [17] A. Ettlin, H. Bleuler, "Randomised Rough-Terrain Robot Motion Planning," in *Intelligent Robots and Systems*, 2006 IEEE/RSJ International Conference on, 2006.
- [18] A. Ettlin, H. Bleuler, "Rough-Terrain Robot Motion Planning based on Obstacle-ness," in *Control, Automation, Robotics and Vision*, 2006. ICARCV '06. 9th International Conference on, 2006.
- [19] T. Ohki, K. Nagatani, K. Yoshida, "Safety path planning for mobile robot on rough terrain considering instability of attitude maneuver," in *System Integration (SII)*, 2010 IEEE/SICE International Symposium on, 2010.
- [20] P. Furgale, T. Barfoot, "Stereo mapping and localization for long-range path following on rough terrain," in *Robotics and Automation (ICRA)*, 2010 IEEE International Conference on, 2010.
- [21] M. Reinstein, V. Kubelka, K. Zimmermann, "Terrain adaptive odometry for mobile skid-steer robots," in *Robotics and Automation (ICRA)*, 2013 IEEE International Conference on, 2013.
- [22] N. Zakerinejad, A. Bakhtiary, M. Motlagh, "Use of Particle Swarm Optimization in path planning for rough terrain," in *Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD)*, 2010 IEEE 19th International Workshop on, 2010.
- [23] N. Keskin, E. Uslu, F. Çakmak, N. Altuntaş, M. F. Amasyalı, S. Yavuz, "Autonomous Mobile Robot Exploration in Negative Obstacle Environment," 25th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU2017), Antalya, 2017.
- [24] O. S. R. Foundation. (2017). Sdf format, [Online]. Available: <http://sdformat.org/> (visited on 04/01/2017).
- [25] M. Labb, F. Michaud, "Appearance-based loop closure detection for online large-scale and long-term operation," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 29, no. 3, pp. 734-745, June 2013.
- [26] T. Whelan, M. Kaess, H. Johannsson, M.F. Fallon, J.J. Leonard, J.B. McDonald, "Real-time Large Scale Dense RGB-D SLAM with Volumetric Fusion," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 34 no. 4-5, pp. 598-626, 2014.
- [27] G. Grisetti, C. Stachniss, W. Burgard, "Improved Techniques for Grid Mapping with Rao-Blackwellized Particle Filters," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, pp. 34-46, 2007.
- [28] E. Uslu, F. Çakmak, N. Altuntaş, S. Marangoz, M. F. Amasyalı, S. Yavuz, "An architecture for multi-robot localization and mapping in the Gazebo/Robot Operating System simulation environment," *SIMULATION*, doi: 10.1177/0037549717710098, 2017.
- [29] A. Hornung, K. M. Wurm, M. Bennewitz, C. Stachniss, W. Burgard, "OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees," *Autonomous Robots*, vol. 34, no. 3, pp. 189-206, 2013.