Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1483410
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 025101 (329-340)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 025101 (329-340)

Endüstriyel Temizlik Robotları İçin Geliştirilen Yeni Bir Boustrophedon Tabanlı Kapsama Algoritması: Performans İyileştirmeleri ve Uygulama

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 04.06.2024
Kabul/Accepted: 15.10.2024
Yayımlandı/Published: 11.04.2025

A Novel Boustrophedon-Based Coverage Algorithm for Industrial Cleaning Robots: Performance Improvements and Implementation

Eylül ÖZER*, A. Burak İNNER

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi
© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Endüstriyel temizlik robotları, geniş ve karmaşık ortamlarda, özellikle fabrikalar ve büyük perakende alanlarında kullanılmaktadır. Bu robotların, engellere çarpmadan veya çok yaklaşmadan etkili bir şekilde çalışması kritik öneme sahiptir. Boustrophedon kapsama alanı temelli tam kapsama yol planlama algoritması, robotların bir alanı eksiksiz ve düzenli bir şekilde taramasını sağladığı için endüstriyel uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir. Bu çalışmada, Robot Operating System (ROS) platformunda özelleştirilmiş bir boustrophedon kapsama alanı temelli yol planlama algoritması sunulmaktadır. Önerilen algoritma, klasik boustrophedon algoritmasına kıyasla güvenlik marjı yerine parametrik şişirme yarıçapı kullanarak robotun hareket alanını optimize etmektedir. Bu yöntem, robotun engellere yaklaşmadan alanı daha verimli kapsamasını sağlamaktadır. Gerçekleştirilen testlerde, önerilen algoritma, klasik boustrophedon algoritmasına kıyasla %98,2 kapsama yüzdesine ulaşarak daha yüksek bir kapsama sağlarken, dönüş sayısını %61 oranında azaltmıştır. Seyahat süresi ve yol uzunluğu gibi performans metriklerinde de kayda değer iyileştirmeler gözlemlenmiştir. Testlerde hesaplama süresi 44 saniye, yol takip süresi ise 101 saniye olarak ölçülmüştür. Robotun toplamda kat ettiği mesafe 19,43 metre olup, dönüş miktarı ise 19,56 radyan olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, önerilen algoritmanın hem engelli hem de engelsiz ortamlarda daha kısa sürede daha yüksek kapsama oranıyla çalışabileceğini göstermektedir. Algoritma, endüstriyel temizlik robotları için önemli bir gelişme sunmakta ve geniş çaplı uygulamalarda etkin bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Kapsama Alanı Yol Planlama; Boustrophedon Yol Planlayıcı; Tam Yol Kapsama; Tam Kapsama;*

Abstract

Industrial cleaning robots are used in large and complex environments, especially in factories and large retail spaces. It is critical for these robots to operate effectively without hitting or approaching obstacles. The boustrophedon coverage-based full coverage path planning algorithm is frequently preferred in industrial applications because it enables robots to scan an area completely and regularly. In this study, a customized boustrophedon coverage-based path planning algorithm is presented on the Robot Operating System (ROS) platform. The proposed algorithm optimizes the robot's movement area by using a parametric inflation radius instead of a safety margin compared to the classical boustrophedon algorithm. This method allows the robot to cover the area more efficiently without approaching obstacles. In the tests performed, the proposed algorithm achieved a higher coverage rate of 98.2% compared to the classical boustrophedon algorithm, while reducing the number of turns by 61%. Significant improvements were also observed in performance metrics such as travel time and path length. In the tests, the calculation time was measured as 44 seconds and the path tracking time as 101 seconds. The total distance covered by the robot is 19.43 meters and the rotation amount is determined as 19.56 radians. These results show that the proposed algorithm can work with higher coverage rate in both obstacle and unobstructed environments in a shorter time. The algorithm offers a significant development for industrial cleaning robots and stands out as an effective solution in large-scale applications.

Keywords:*Coverage Path Planning; Boustrophedon Path Planner; Full Path Coverage; Complete Coverage.*

1. Giriş

Temizlik robotları hem ev hem de endüstriyel ortamlarda, temizlik süreçlerini otomatikleştirmek için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Ev temizlik robotları, günlük yaşamı kolaylaştırmak amacıyla tasarlanmıştır. Bu robotlar genellikle vakum ve paspaslama işlevlerine sahip olup, ev içerisindeki toz, kıl ve diğer küçük atıkları temizleyerek insanların günlük temizlik yükünü hafifletir.

Ev tipi robot süpürgelerin tasarımı, ev içerisindeki engellerle etkileşime dayanmaktadır. Bu robotlar, perdeler gibi hafif engelleri iterek veya duvar diplerine çarparak daha etkili bir temizlik yapacak şekilde

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Eylül ÖZER
e-posta/e-mail: eylul.ozer.ee@gmail.com

geliştirilmiştir. Ev ortamında, yere düşen nesnelere çarpmak veya bunları itmenin bir hasara neden olmayacağı kabul edilebilir.

Endüstriyel temizlik robotları, büyük alanların düzenli ve etkili bir şekilde temizlenmesini sağlamak amacıyla fabrikalar, depo alanları ve geniş perakende tesisleri gibi karmaşık ortamlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu robotlar, sürekli olarak engellerle karşılaşılan dinamik ve yoğun trafiğe sahip ortamlarda sorunsuz bir şekilde çalışmalıdır. Fabrikalar, depolar ve büyük perakende alanları gibi yerlerde kullanılan bu robotlar, ev robotlarının aksine engellere çarpmamak üzere geliştirilmektedir. Bu endüstriyel temizlik robotları oldukça büyük ve ağır olduğundan engellere çarptığında genellikle hasarlar meydana gelebilir. Dolayısıyla endüstriyel temizlik robotlarının büyük alanları engellerden kaçacak ve tüm alanı temizleyebilecek şekilde yol planlamasının yapılması gerekmektedir. Böylece işletmelerin temizlik maliyetlerinin azaltılması ve çalışma verimliliğinin artması beklenmektedir.

Yol planlama, genellikle engellerden kaçınma, en kısa ya da en hızlı yolu bulma gibi hedeflerle gerçekleştirilir (Gezer, 2024; Beşkirli & Tefek, 2019). Ancak tam kapsama yol planlama, yalnızca bir hedefe ulaşmayı değil, bir alanın tüm noktalarını ziyaret etmeyi gerektiren daha karmaşık bir süreçtir. Tam kapsama yol planlama algoritmaları (full coverage path planning algorithms), belirli bir alanın ya da bölgenin eksiksiz bir şekilde taranmasını veya ziyaret edilmesini amaçlayan matematiksel yöntemlerdir. Bu algoritmalar, özellikle robotik, insansız hava araçları (İHA) ve diğer otonom sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Endüstriyel temizlik robotlarında tam kapsama yol planlama algoritmaları, robotların geniş ve karmaşık endüstriyel tesislerde, tüm alanı eksiksiz bir şekilde temizleyebilmesi için hayati bir rol oynamaktadır. Bu algoritmalar, robotların belirlenen bölgeyi tararken engellerden kaçınmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda en kısa sürede ve minimum enerji tüketimiyle temizleme görevini tamamlamalarını sağlar (Dönmez & Kocamaz, 2019). Robotların çevresel engelleri algılayarak etkili ve verimli yollar oluşturması, temizlik işlemlerinin daha hızlı tamamlanmasına ve maliyetlerin düşürülmesine katkıda bulunur (Özdemir & Karaman, 2017).

Endüstriyel temizlik robotlarının etkin bir şekilde görevlerini yerine getirebilmesi, yalnızca tüm alanı kapsayarak temizlik yapmaları ile sınırlı değildir; aynı zamanda, çalışma alanında bulunan makineler, duvarlar ve diğer sabit yapılarla çarpışmadan hareket etmeleri de kritik bir gerekliliktir. Bu nedenle, robotların çevresel koşullara göre en uygun yolu bulmasını sağlamak için tam kapsama yol planlama algoritmalarının optimize edilmesi gerekmektedir. Bu optimizasyon, robotların hem engellerden kaçınmasını hem de temizlik görevini minimum enerji ve zaman kullanımıyla tamamlamasını sağlar.

Boustrophedon algoritması, robotların eksiksiz kapsama sağlaması ve enerji verimliliğini artırması açısından diğer yol planlama algoritmalarına kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Diğer kapsama algoritmaları, özellikle büyük ve karmaşık alanlarda uygulandığında, genellikle alanın özelliklerine uygun olmama veya gereksiz dönüşler yapma gibi sorunlarla karşılaşabilmektedir. Bu durum, temizlik süreçlerinde verimliliği olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, özellikle endüstriyel ortamlarda, engellerin etrafında güvenli bir şekilde hareket ederek daha az manevra gerektirir ve robotun geniş alanları kısa sürede etkin bir şekilde temizlemesine olanak tanır. Bu özellikler, endüstriyel temizlik robotlarında operasyonel verimliliği ve enerji tasarrufunu maksimize eden çözümler sunar. Boustrophedon algoritması ise, alanın tamamını minimum boşluk ve minimum çakışma ile tarayarak, robotların hareketlerini optimize eder. Bu sayede, verimsiz hareketler ve zaman kaybı en aza indirilir.

Bu çalışmada, Robot Operasyon Sistemi (ROS) platformu üzerinde geliştirilmiş endüstriyel bir otonom mobil süpürge robotu için boustrophedon algoritmasına dayalı bir tam kapsama yol planlama sunulmaktadır. Algoritma, global planlayıcı (global planner) temel alınarak geliştirilmiş olup, geleneksel güvenlik marjı (safety margin) kullanımı yerine, navigasyon paketindeki şişirme yarıçapı (inflation radius) parametresi ile üretilen maliyet haritası (costmap) üzerinden uygulanmaktadır. Bu yaklaşımla, ROS içerisindeki şişirme yarıçapı parametresi dinamik olarak ayarlanmakta ve robotun engellere yaklaşmadan güvenli bir şekilde hareket etmesi sağlanmaktadır.

Çalışmada, algoritmanın performansını değerlendirmek için yol uzunluğu, dönüş miktarı, seyahat süresi ve kaplama yüzdesi metrikleri kullanılmıştır. Endüstriyel ortamda yapılan testler, önerilen algoritmanın klasik boustrophedon algoritmasına kıyasla daha kısa sürede ve engellerden daha güvenli bir şekilde kaçınmasını sağlayan yol planlaması yaparak temizlik gerçekleştirdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, engelli ve engelsiz ortamlarda kapsama yüzdesinin aynı olması, algoritmanın karmaşık fabrika koşullarında dahi yüksek performansla çalışabileceğini kanıtlamaktadır.

1.1 Literatür İncelemesi

Boustrophedon tam kapsama yol planlama algoritması, robotik alanında etkili bir kapsama stratejisi olarak yer almaktadır. Bu algoritma, ilk olarak Choset ve Pignon tarafından tanıtılan Boustrophedon Hücresel Ayrıştırma yöntemine dayanmaktadır ve bilinmeyen ortamlarda kapsama tabanlı yol planlama için geliştirilmiştir (Xu et al.,

2011). Boustrophedon terimi, "öküz yolu" anlamına gelir ve bu yöntem, alanın en uzun kenarı boyunca ileri geri hareket eden basit bir tarama desenini ifade eder (Fevgas et al., 2022). Boustrophedon algoritması, alanı sistematik bir şekilde tarayarak, robotların her noktayı kapsamasını sağlamakta ve bu sayede temizlik veya keşif gibi görevlerde etkin bir çözüm sunmaktadır (Zhou et al., 2022; Chiang, 2015). Algoritmanın temel prensibi, robotun hareket ettiği alanı küçük alt bölgelere ayırarak, her bir bölgeyi ileri geri hareketle taramaktır. Bu yaklaşım, robotların minimum boşluk ve çakışma ile hareket etmelerini sağlarken, enerji verimliliğini de artırmaktadır (Chang et al., 2010).

Literatürde, boustrophedon algoritmasının çeşitli uygulama alanları bulunmaktadır. Örneğin, Zhou ve arkadaşları, sabit kanatlı insansız hava araçları (İHA) için 3D kapsama yolları tasarlarken boustrophedon yöntemini kullanmışlardır (Zhou et al., 2022). Ayrıca, Chiang, robotların çöp toplama görevlerinde boustrophedon tabanlı bir yol planlayıcı geliştirmiştir (Chiang, 2015). Bu tür uygulamalar, algoritmanın esnekliğini ve farklı senaryolara uyum sağlama yeteneğini göstermektedir. Bununla birlikte, boustrophedon algoritmasının bazı sınırlamaları da bulunmaktadır; örneğin, alt bölgeler arasındaki erişim sırasının dikkate alınmaması, bazı durumlarda verimliliği etkileyebilir (Ma, 2023). Tam kapsama yol planlama algoritmaları, özellikle insansız araçların navigasyonunda ve çevresel verimliliğin artırılmasında önemli bir role sahiptir. İnsansız yüzey araçları (USV'ler) için geliştirilen takviyeli öğrenmeye dayalı bir algoritma, bu alanda önemli bir yenilik olarak öne çıkar. Bu algoritma, kapsanamayacak alanları efektif bir şekilde ele almak için haritayı ön işler ve yol planlama stratejisini geliştirmek için derin Q ağı (DQN) tekniklerini kullanır (Xing et al., 2023). TMSTC* algoritması ise, haritayı minimum tuğlalar halinde bölerek ve bunları bir ağaç oluşturacak şekilde birleştirerek, çoklu robotların dönüşlerini azaltmasına ve böylece kapsama görevlerini daha hızlı tamamlamasına olanak tanır (Zeng et al., 2023).

Bir diğer çalışma, düğüm hareketlerini en aza indirme ve yol kapsama ömrünü maksimize etme problemlerine yenilikçi çözümler sunar. Bu çalışma, problemleri bir dizi alt probleme ayırarak ve bunları ayrı ayrı ele alarak, NP-zorluğunu aşmanın ve en az hareketle çözüm sağlamanın yolunu gösterir (Liu & Zhou, 2023). Tarım alanlarında çoklu robot kapsama yol planlamasına yönelik bir diğer araştırma, verilen alanı çeşitli konveks poligonal hücrelere bölmeyi, her robot için atanmış hücreleri kapsayacak optimal yolları oluşturmayı ve robotların hareket dinamiklerini dikkate alarak yörüngelerini oluşturmayı içeren üç adımlı bir metodoloji önerir (Chowdhury & Prabhakar, 2023).

Çevrimiçi tam kapsama yol planlama görevi için bir Gözlemlenemeyen Kısmi Markov Karar Süreci (POMDP) tabanlı bir Güçlendirme Öğrenimi (RL) algoritması, son K okuma ve eylemler üzerinden bir gözlem alanını tanımlayarak ve Kuzey, Güney, Batı, Doğu gibi yönlerde eylemlerle bir eylem alanını belirleyerek, sezgisel eylemlerle eğitim sürecini hızlandırmayı hedefler (Carvalho & Aguiar, 2023). Düzgün tam kapsama yol planlama algoritması (SCCPP), birbirine dik düz çizgi segmentlerinden oluşan yollar üreten ve bunları düzleştiren, hız profili optimizasyonu yapan ve son olarak da yörünge izleme algoritması içeren dört modüllü bir yapı sunar (Šelek et al., 2022).

Süpürge robotları için tam temizleme alanı yol planlaması, çevresel kompozisyon, alan bölümü, yerel alan yol planlaması ve tam travers yol planlamasını içeren dört aşamalı bir algoritmayı içerir. Bu algoritma, ızgara haritası yöntemi ve genetik algoritma gibi teknikleri kullanarak temizleme görevlerinin verimliliğini artırmayı amaçlar (Guo et al., 2022). No-Fly Zone'ları hesaba katan 2D kapsama planları için geliştirilen bir boru hattı, çokgenler üzerinde hücre ayrıştırması yapar ve bu hücreler için başlangıç süpürme desenleri üretir. Bu desenler, Eşitlik Genelleştirilmiş Gezgin Satıcı Problemi (E-GTSP) çözülerek toplam yol süresini en aza indirir (Bähnemann et al., 2021).

Fotovoltaik (PV) enerji santralleri için Kapsama Yolu Planlama (CPP) üzerine yapılan bir çalışma, Google Haritalar üzerinden alınan uydu görüntüleriyle ilgili bölge rol oluşturur ve Derin Öğrenme (DL) teknikleriyle bu görüntülerden rol çıkarımı yapar. Sonrasında, çeşitli metotlarla CPP'yi gerçekleştirir (Pérez-González et al., 2021). Düzlemsel bir ortamda görsel olarak araştırma yapmak için kapsama odaklı adaptif bir yol planlayıcı geliştirilmiş ve bu algoritma, çok boyutlu belirsizlikleri dikkate alır, gerçek zamanlı çalışır ve yüksek doğruluklu simülasyonlarla doğrulanır (Mahajan & Rock, 2020). Yapay zekâ ve robotik sistemlerdeki gelişmeler, tam kapsama yol planlama algoritmalarının önemini artırmıştır. Bu alanda yapılan bir çalışma, mevcut bir yol planlama mimarisini "konvolve edilmiş kapsama tahmini" (CCE) kullanacak şekilde modifiye ederek, çok boyutlu belirsizlikleri dikkate alabilen ve GPS gibi dış düzeltme yöntemlerine ihtiyaç duymadan gerçek zamanlı çalışan bir adaptif yol planlayıcı geliştirilmiştir. Bu algoritma, yüksek doğruluklu simülasyonlarda ve İnsansız Hava Aracı (UAV) üzerinde yapılan uçuş testlerinde başarıyla doğrulanmıştır (Esfahani et al., 2020).

Bir diğer çalışma, dairesel mobil sensörler için yerel kapsama yolu planlama sunar. Hedef bölgeyi düzenli üçgenlere bölerek ve her üçgen için en uygun gözlemcileri belirleyerek, Seyahat Eden Satıcının En Yakın Komşu algoritması ile temel bir kapsama yolu oluşturur. Bu algoritma, sınırlı algılama aralığına sahip ortamlarda etkin bir şekilde çalışabilmek için tasarlanmıştır (An et al., 2020).

Adaptive Deep Path (AD Path) adında bir çerçeve öneren bir çalışma, yol uzunluğu ve dönüş sayısını göz önünde bulundurarak, çeşitli yapılandırmalar altında bilinen bir ortamın etkili kapsama yol planlamasını sunmaktadır. Bu metodoloji, dört karmaşık ortamda yapılan testlerde, yol uzunluğunu ve dönüş sayısını önemli ölçüde azaltarak, mevcut temel algoritmaların performansını geçmiştir (Chen et al., 2019).

Otonom sualtı araçları (AUV'ler) için kapsama yol planlamasını ele alan bir çalışma, incelenen hedef yapısının veya bölgesinin B-spline harita temsilini kullanarak çevrimdışı bir planlayıcı sunmaktadır. Bu yöntem, konveks ve konveks olmayan şekiller için uygulanabilir olup, kübik B-spline eğrileriyle tanımlanan kapsama yolu AUV'nin kinodinamik kısıtlamalarına saygı gösterir (Rodrigues & Aguiar, 2018).

Oda büyüklüğündeki birimlerde kapalı alan kapsama yol planlaması için altı popüler çevrimdışı tam kapsama yol planlama yöntemini analiz eden bir makale, mobilyalı ve mobilyasız oda senaryolarında bu algoritmaların performansını karşılaştırmaktadır. Bu çalışma, kapsama yol planlaması problemlerine farklı yaklaşımların değerlendirilmesine katkıda bulunmuştur (Bormann et al., 2018).

Bilinen 2D çevrelerde tam kapsama yol planlama algoritması, bir robotun kapsama aracının iki katı genişliğinde dikdörtgenler olan tuğlalar kullanarak haritayı bölmekte ve bu bölgeleri bir ağaç yapısında birleştirerek yol planlaması yapmaktadır. Çalışmanın sonuçları, TMSTC* algoritmasının diğer popüler STC tabanlı algoritmalar ve en yeni TMC metoduna göre dönüş sayısını ve kapsama süresini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir (Gajjar et al., 2017).

Anizotropik potansiyel alanlar kullanarak 3D nokta bulutlarında oda bölümlemesi için yeni bir yöntem sunan bir çalışma, iç mekânın serbest alanını belirleyerek ve anizotropik potansiyel alan (PF) değerleri hesaplayarak etkili bir bölümleme sağlamaktadır. Bu yöntem, yapısal olmayan 3D nokta bulut verilerini kullanarak alanın etkili bir şekilde bölümlenmesini sağlar (Bobkov et al., 2017).

RoomsSeg adlı yeni bir yöntem, özel evlerde çalışan otonom elektrikli süpürgeler için sistematik oda bazlı temizlik amacıyla, mekân haritalarını bölgelere ayırır. Bu yöntem, ızgara haritalarında otomatik karmaşa giderme ve su bölgesi bölümlemesine dayanmaktadır ve bölümlenmiş bölgeleri semantik karar kuralları kullanarak odalara birleştirir (Kleiner et al., 2017).

Dört rotorlu İnsansız Hava Aracı (UAV) için etkin bir kapsama yolu hesaplayan çevrimdışı bir uçuş planlayıcısı sunan bir çalışma, görev tanımından otomatik yol planlamasına ve yörünge oluşturmaya kadar üç adımdan oluşan bir yaklaşımı içerir. Bu planlayıcı, özel görevler için kapsama yörüngesi tanımlama ve oluşturma süreçlerini kolaylaştırır (Nama et al., 2016). Yaklaşık hücresel ayrıştırma temelli yeni bir robot kapsama algoritması öneren çalışma, sanal düğümler ve kenarlar kullanarak, kısmen işgal edilmiş hücreleri dikkate alan bir kapsama sağlamayı hedefler (Ranjitha & Guruprasad, 2016).

Bilinen bir ortamda temizlik robotu için A* algoritmasına dayalı tam kapsama yol planlama algoritması, robotun U-dönüşleri kullanarak temizlik alanını temizlemesini, ölü düğümlere girdiğinde A* algoritması ile temizlenmemiş alana en kısa yolu planlamasını ve bu yol boyunca temizlik yapmasını önerir (Cai et al., 2022).

Tam kapsama ve engel kaçınma için özel bir algoritma olan Tam Kapsama İçin Gezinme Algoritması (TRACC), önerilen alanın her hücresini hissederek ve engellerden kaçınarak güvenli bir yolu izlemeyi hedefler. Bu algoritma, bölgeyi sonlu hücrelere böler ve her hücreyi ziyaret ederek engellerin olmadığını garantiler (Thiayagarajan & Balaji, 2012).

CCD* algoritmasını kullanarak yol planlaması yapan ve sonrasında yolu değişikliklere göre ayarlayan bir algoritma, bir mobil robot ile statik ve hareketli bilinmeyen engelleri içeren bir alanı temizlemek için etkili bir şekilde kullanılabilir (Dakulović et al., 2011).

Son olarak, yapısal olmayan düzlemlerde tam kapsama sağlamak için geliştirilen bir sensör tabanlı çevrimiçi tam kapsama yol planlama algoritması, spiral doldurma kuralını ve harita koordinat atama şemasını kullanarak, dönüş sayısını azaltır ve etkili bir kapsama yolunu belirler (Choi et al., 2009).

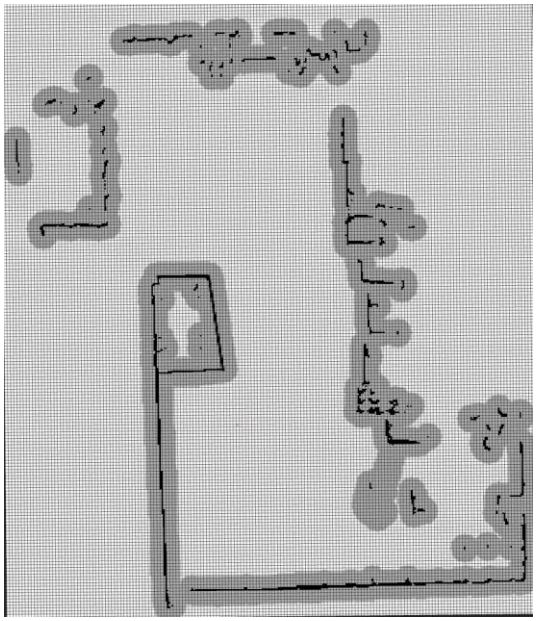
2. Materyal ve Metot

Boustrophedon algoritması genellikle doğrudan yerel sensör verileri veya basit hedef koordinatları ile navigasyon yapma eğilimindedir. Bu durum, geniş ve karmaşık alanların verimli bir şekilde kapsanmasında bazı sınırlılıklar oluşturabilir. Bu çalışmada, robotun büyük ve fazla engellerin bulunduğu alanları etkili bir şekilde kapsamasını sağlamak için hücresel dekompozisyon ve boustrophedon yöntemi kullanılmaktadır. Önerilen yöntem, diğer uygulamaların aksine robotun global planlayıcının ürettiği maliyet haritasını (global costmap), bölgesel hücrelere ayırarak her bir hücrede sistemli bir şekilde boustrophedon uygular. İki temel aşamadan oluşan bu metodoloji, global maliyet haritası üretimi, hücresel dekompozisyon ve boustrophedon içerir.

2.1 Global Maliyet Haritası

Bir global maliyet haritasının kullanılması, robotun daha bilinçli navigasyon kararları almasına olanak tanıyarak boustrophedon yaklaşımını uygular ve potansiyel olarak tehlikeli alanlardan güvenli bir mesafe korumasını sağlar. Global planlayıcı, robotun maliyet haritasını oluştururken,

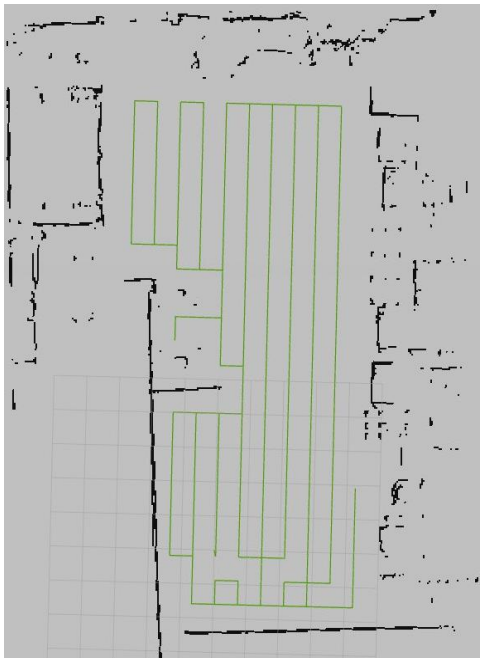
çevredeki engelleri sadece fiziksel sınırları ile değil, bir miktar "şişirilmiş" bir şekilde işler. Bu işlem, engellerin etrafına bir güvenlik tamponu ekleyerek, robotun engellere çarpmadan güvenli bir şekilde hareket etmesini sağlamak amacıyla yapılır. Global maliyet haritasındaki her hücre, o noktadaki engel olasılığını ifade eder, böylece planlayıcı, güzergahı engellerden kaçınacak şekilde düzenleyebilir. ROS2'de kullanılan global maliyet haritası Şekil 1'de gösterilmiştir. Engellerin şişirilmesi, global planlayıcı tarafından kullanılan harita üzerinde engel hücrelerinin etrafına ekstra "işgal edilmiş" alanlar eklenmesi işlemidir. Şekil 1'de siyah ile belirtilen alanlar engelleri temsil etmektedir. Bu engeller şişirilerek gri ile belirtilen alanlar elde edilmiştir. Bu şişirilmiş alanın genişliği, süpürme alanına, robotun boyutlarına ve manevra kabiliyetine bağlı olarak ayarlanabilir. Genellikle, robotun en geniş noktasının yarısı kadar veya daha fazla bir alan engel olarak işaretlenir.



Şekil 1. Global Maliyet Haritası

2.2 Hücresel Dekompozisyon ve Boustrophedon

Klasik Boustrophedon algoritması, bir alanı sistematik bir biçimde kaplamak için kullanılan bir robotik yol planlama stratejisidir. Bu yöntem, antik Yunan'da bir tarlanın sürülme stilinden esinlenmiştir; burada bir öküz sabanı bir tarlanın bir ucundan diğerine, ardından çevrilip karşı yönde geri getirilerek sürekli bir ileri geri hareketle sürülür. Robotik uygulamalarda, bu, robotun bir çizgiden diğerine yatay olarak hareket etmesi, her bir dönüşte bir sonraki paralel çizgiye geçmeden önce biraz ileri veya geri gitmesi şeklinde uygulanır. Robotun ayak izi (footprint), yani temas alanı, bu algoritmanın uygulanmasında kullanılan önemli bir parametredir. Robot, engelleri ve çevresel sınırları hesaba katmak zorunda olduğundan, her bir dönüş sırasında yeterli alanın bırakılması gerekmektedir. Genellikle, bu algoritma, engelsiz ortamlarda etkilidir ve alan kaplama veya çim biçme robotları gibi görevler için kullanılır; ancak engelli alanlar için değişiklik veya farklı stratejiler gerektirebilir. Bu, robotun fiziksel boyutunun yanı sıra, engeller arasında ve çevresel sınırlar içinde güvenli bir geçiş sağlaması gerektiği anlamına gelir. Test ortamında klasik boustrophedon algoritması kullanılarak üretilen yol Şekil 2'de gösterilmektedir. Bu görselde, algoritmanın ufak engellerin etrafına nasıl yol planladığı dikkat çekicidir. Algoritma, robotun fiziksel boyutları ve güvenlik marjları dikkate alınarak, iki engel arasında güvenli bir geçiş yolu planlamıştır. Bu, algoritmanın engeller arasındaki boşlukları değerlendirerek, robotun geçebileceği kadar geniş bir yol hesaplaması anlamına gelir. Bu süreç, robotun etrafındaki güvenlik marjını ve robotun kendisinin boyutlarını temel alır; böylece robot, engeller arasında kalan dar alanlarda bile hareket edebilirken, engellere çarpmadan, etkili bir şekilde navigasyon yapabilir.



Şekil 2. Klasik Boustrophedon Yol Planı

Bu çalışmada ROS 2 global planlayıcısının kullanılarak temizlik robotlarının daha verimli bir şekilde çalışmasını sağlayacak Boustrophedon algoritmasını temel alan bir algoritma geliştirilmiştir. Algoritma, ROS2 ortamında Python programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Algoritmanın temel amacı, robotun navigasyon sistemine entegre edilerek, temizlik robotlarının daha az dönüş yaparak daha yüksek kaplama yüzdesi elde etmelerini sağlamaktır. Geliştirilen algoritma, global bir harita üzerinde, robotun fiziksel boyutlarını hesaba katmayan ve ekstra marj gerektirmeyen pozisyonlar üretmektedir.

Bu çalışmada, Şekil 3'te gösterilen Birfen Elektrik Elektronik San. Tic. Ltd. Şti. tarafından geliştirilen endüstriyel bir temizlik robotu üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Robot, karmaşık endüstriyel alanları taramak için gerekli olan donanımlarla donatılmıştır. Robotun sensör donanımları arasında, çevresel verilerin toplanması ve navigasyonun hassas bir şekilde yapılabilmesi için kullanılan LIDAR (Light Detection and Ranging) sensörü ve derinlik kamerası yer almaktadır. Bu sensörler, robotun çevresindeki engelleri algılayarak güvenli bir navigasyon yapmasını sağlar. Ayrıca, robotun navigasyon sistemleri, ROS2 platformu ile uyumlu donanımlar kullanılarak kontrol edilmektedir.

Şekil 3. Temizlik Robotu

Robotun alanı kapsama kabiliyeti, ayak izi parametreleriyle belirlenmiştir. Ayak izi, robotun fiziksel boyutlarını (uzunluk, genişlik) ifade eder ve alanın hangi bölümlerine erişebileceğini gösterir. Testlerde kullanılan robotun ayak izi değerleri 0.8 metre uzunluk ve 0.6 metre genişliktir. Robotun ayak izi, çevresel sınırlarla olan güvenlik mesafesini hesaplamada da rol oynar ve şişirme yarıçapı (inflation radius) ile engellerden kaçınma stratejilerinin etkin bir şekilde uygulanmasını sağlar.

Önerilen algoritmanın testleri hem engelsiz hem de engelli olmak üzere iki farklı ortamda gerçekleştirilmiştir. Engelli ortam, çeşitli boyutlarda sabit engeller içeren bir alan olarak tasarlanmıştır. Her iki ortamda da robotun hareketi, algoritmanın kaplama yüzdesi, hesaplama süresi, seyahat miktarı, dönüş sayısını ölçmek için izlenmiştir.

Her bir test çalışması sırasında, robotların kaplama yüzdesi, seyahat süresi, dönüş sayısı, hesaplama süresi metrikleri kaydedilmiştir. Elde edilen veriler, klasik boustrophedon algoritmasıyla karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Algoritmanın performansı, kaplama yüzdesi, dönüş sayısı ve engellerle etkileşim kabiliyeti açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca, algoritmanın engelsiz ve engelli ortamlarda gösterdiği tutarlı performans, Ros Navigation 2 paketi ile entegre edilerek dinamik engel kaçınma yeteneği test edilmiştir.

2.3 Algoritma

Hücresel dekompozisyon, çalışma alanını küçük hücrelere bölerek her bir hücrenin robot tarafından kapsanmasını sağlar. Çalışma alanı, R ile ifade edilir ve bir dizi küçük hücreye bölünür:

$$R = \bigcup_{i=1}^{n} C_i \tag{1}$$

Denklem 1'de C_i $i.$ hücreyi temsil eder. n toplam hücre sayısıdır. Her bir hücreyi ziyaret etmek için bir yol planlanır.

$$Yol = \{C_1, C_2, \dots, C_n\} \tag{2}$$

Bu yol, robotun her bir hücreyi en az bir kez ziyaret etmesini sağlayacak şekilde optimize edilmelidir.

Robotun hareket alanını temsil eden harita, engel ve serbest alanları içeren piksel bazında bir matris olarak sağlanır. Her bir piksel, alanın bir bölümünü temsil eder ve bu piksellerin durumu (engelli veya serbest) yol planlamasının temelini oluşturur.

Önerilen algoritma global maliyet haritası üzerindeki her pikseli değerlendirerek hücreler oluşturur. Her bir hücre, robotun ileri hareket ederek kapsayacağı alanı temsil eder.

$$R = \bigcup_{j=1}^{m} B_j \tag{3}$$

Denklem 3'te B_j, j. Boustrophedon hücresini temsil eder ve m toplam hücre sayısıdır. Robotun her bir Boustrophedon hücresinde izleyeceği yolu belirlenir.

$$Yol_j = \{(x_1, y), (x_2, y), \dots, (x_k, y)\} \tag{4}$$

Denklem 4'te x yatay eksen boyunca robotun pozisyonlarını ve y sabit bir yükseklik seviyesini temsil eder.

$$Tam\ Yol = \bigcup_{j=1}^{m} Yol_j \tag{5}$$

Denklem 5 robotun tüm boustrophedon hücrelerini kapsayacak şekilde izlemesi gereken yolu temsil eder. Bu hücreler, robotun hareket edeceği koridorları belirler. Her hücre için tavan ve taban noktaları belirlenir. Tavan noktaları, bir hücre içinde, bir önceki pikselin boş (geçilebilir) olduğu ve mevcut pikselin dolu (engel) olduğu durumlar tarafından tanımlanır. Bu, bir hücrenin üst sınırının belirlenmesi için kullanılır. Tavan noktaları, yeni bir hücre başlatıldığında veya mevcut bir hücrenin üst sınırını genişletirken kullanılır. Hücrenin üst sınırı, robotun

bu hücre içinde hareket edebileceği en üst noktaları ifade eder. Taban noktaları, bir hücre içinde, bir önceki pikselin dolu (engel) olduğu ve mevcut pikselin boş (geçilebilir) olduğu durumlar tarafından tanımlanır. Bu, bir hücrenin alt sınırının belirlenmesi için kullanılır. Tavan ve taban noktalar arasında komşuluk ilişkileri kurularak hücreler arası geçişler tanımlanır.

Algoritmaya ait akış diyagramı Şekil 3' de verilmiştir. Bu akış diyagramında çeşitli olayları tanımlanarak hücreler arasındaki ilişkiler yönetilir. Tavan Olayı, hücrenin tavan noktalarını belirleyen olaydır. Bu, örneğin bir hücrenin tavanını bir önceki hücreden devralarak genişletme işlemidir. Taban Olayı, hücrenin taban noktalarını belirleyen olaydır. Bu, örneğin bir hücrenin alt sınırına bir nokta ekleyerek tabanını genişletme işlemidir. Olaylar arasında hücre başlangıçları, bitişleri ve iç hücre olayları bulunur. Bu olaylar, hücrelerin nasıl genişletileceği veya sonlandırılacağı üzerinde belirleyici rol oynar. Hücre başlangıçları, bir hücrenin başlangıcını işaret eder ve yeni bir hücre oluşumunun başladığı noktadır. Algoritma, bir engelin kenarını (dolayısıyla bir hücrenin başlangıç sınırını) tespit ettiğinde bir Hücre başlangıç olayı gerçekleşir. Hücre başlangıç olayı, algoritmanın geçerli pikselin önceki pikselinden dolu (engel) olmadığı halde dolu olduğunu tespit ettiği durumlarda tetiklenir. Yani, bir hücrenin üst kenarı bu olayla belirlenir. Bir önceki piksel boş, mevcut piksel ise dolu ise hücre başlangıç olayı başlatılır. Eğer bir hücre zaten açıksa, bu hücre kapatılır ve yeni bir hücre açılır. Bu, önceki hücrenin üst sınırının tamamlandığı anlamına gelir. Yeni hücrenin tavan noktası olarak mevcut pikselin konumu eklenir. Bu, yeni hücrenin üst sınırını oluşturur. Bir önceki piksel dolu, mevcut piksel ise boş ise hücre bitiş olayı başlatılır. Eğer bir hücre açıksa, bu hücre kapatılır. Bu, hücrenin alt sınırının tamamlandığı anlamına gelir. Kapanan hücrenin taban noktası olarak önceki pikselin konumu eklenir. Bu, hücrenin alt sınırını oluşturur. Eğer önceki ve mevcut pikseller uygun koşulları sağlıyorsa, mevcut hücre kapatılır ve ardından hemen yeni bir hücre açılır. Bu, engel kenarları boyunca hücrelerin sıralı bir şekilde oluşturulmasını sağlar.

Hücreler arası geçişler sırasında, algoritma gereksiz yinelemeleri ve verimsiz yolları filtreler. Hücrelerin tavan ve taban noktaları belirlenirken, ardışık noktaların eğimleri hesaplanır. Eğer üç ardışık nokta aynı doğrultuda (yani eğimleri aynı) ise, ortadaki nokta gereksizdir ve çıkarılabilir. Bu işlem, hücrelerin sınırlarını daha basit ve temsil edici hale getirir. Bu, özellikle uzun düz çizgiler üzerinde çok sayıda nokta oluşturulduğunda önemlidir. Bir hücreyle bitişik olan hücreler arasındaki geçişler sırasında, hücrelerin komşuluk ilişkileri dikkatlice yönetilir. Eğer bir hücre zaten bir diğerinin komşusu olarak işaretlenmişse, bu ilişki tekrar eklenmez. Hücre içindeki yol planlaması yapılırken, hücrenin tavan ve taban noktaları arasında en kısa yolu bulacak şekilde bir planlama yapılır. Bu, özellikle geniş hücrelerde robotun hücre içinde gereksiz yere gidip gelmesinin önüne geçer. Eğer bir başlangıç noktası verilmişse, sadece bu noktadan ulaşılabilir hücreler hesaba katılır. Bu, engeller tarafından tamamen çevrelenmiş ve erişilemeyen bölgelerin planlamada dikkate alınmamasını sağlar. Bu süreç, hücrelerin daha verimli bir şekilde oluşturulmasını sağlar ve robotun gereksiz yere aynı alanı birden fazla kez kaplamasının önüne geçer.

Son olarak, oluşturulan hücreler ve bunların iç yolları değerlendirilir ve robotun o yolu izlemesi için verilir. Yolu izlemesi için verilen noktalar yol noktaları olarak kaydedilir. Bu yol, robotun algoritma tarafından hesaplanan en etkili kaplama stratejisini uygulamasını sağlar. ROS 2'de var olan Nav 2 kullanılarak yol noktaları takip edilir.

Klasik Boustrophedon algoritmasında, engellerin etrafından güvenli geçiş sağlamak amacıyla daha fazla sayıda yol noktası üretilmektedir. Ancak, önerilen yaklaşımda, global maliyet haritası kullanılarak engellere yaklaşılmayacağı garanti altına alındığı için yol noktası sayısı azaltılmıştır. Bu sayede, robotun kapsama alanı genişletilmiş, dönüş sayısı minimize edilmiş ve operasyon süresi kısaltılarak verimlilik artırılmıştır.

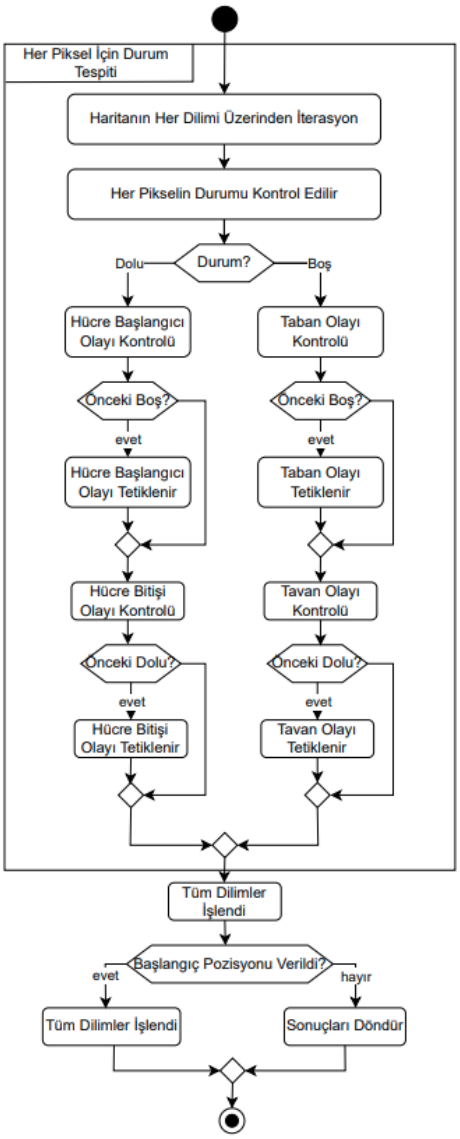
3. Bulgular

Önerilen algoritma, global maliyet haritası, hücresel dekompozisyon ve boustrophedon kullanılarak ROS2 ortamında uygulanmıştır. Algoritmanın etkinliğini göstermek için karmaşık bir fabrika haritası üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Karmaşık harita üzerinde poligon ile sınırlar Şekil 5'te gösterildiği gibi kırmızı renkte belirlenmiştir. Harita üzerinde seçilen 4 noktadan oluşan bir poligon, robotun hareket alanının sınırlarını belirlemek için kullanılmıştır. Bu işlem sonucunda, endüstriyel süpürge robotunun takip etmesi gereken yol, verilen poligon içerisinde oluşturulur. Yol, poligonun en alt noktasından başlayarak hareket eder.

Bu çalışmada, klasik boustrophedon ve önerilen boustrophedon algoritmasında üretilen yol noktalarının takibi için Nav 2 kullanılmıştır. Her yol noktaları arasında engellerden kaçınabilecek şekilde yol planlamasını takip eder. Bu sayede, poligonun tüm alanını taranmış olmalıdır.

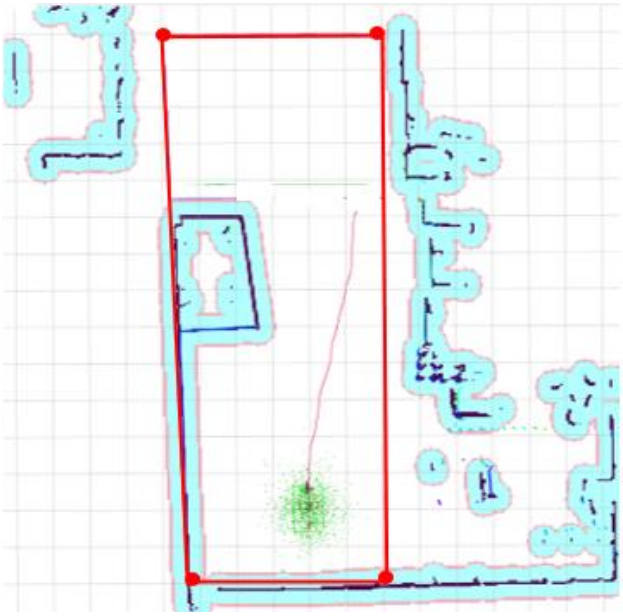
Bu çalışmada ilk olarak, klasik boustrophedon algoritması kullanılarak üretilen yollar incelenmiştir. Bu yollar, algoritmanın engelleri etkin bir şekilde yönetme

konusunda sınırlamalarını göstermektedir. Klasik boustrophedon algoritması, robotun ayak izi temel alındığından, engellere yakınlaşması istendiği durumda haritada ve güvenlik marjlarında ekstra optimizasyonlar gerektirmektedir. Engellere yaklaşmaması istendiği durumda ise kaplama verimliliğini düşürmektedir. Bu durum, özellikle engellerin yoğun olduğu alanlarda daha belirgin hale gelmekte ve algoritmanın kapsama oranını olumsuz etkilemektedir.

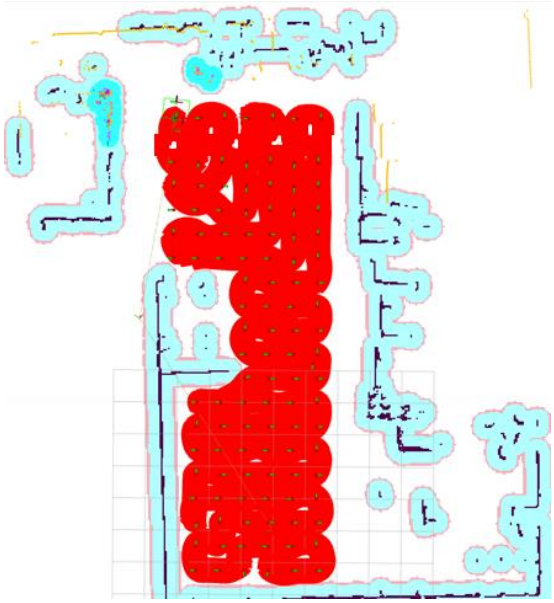


Şekil 4. Hücresel Dekompozisyon Algoritması

Robot, ilk olarak klasik boustrophedon algoritması tarafından belirlenen yol noktalarını sırasıyla takip edecek şekilde bir test gerçekleştirmiştir. Bu teste ait görsel Şekil 6'te sunulmuştur. Klasik boustrophedon algoritmasının ürettiği yol noktaları, yeşil noktalar ve oklar ile gösterilmiştir. Robotun Nav 2 kullanarak her bir yol noktası arasında engellerden kaçınarak izlediği rota kırmızı renkle gösterilmiştir. Kırmızı çizgi, robotun izlediği yolu temsil ederken, aynı zamanda robotun temizlik yaptığı alanları da ifade etmektedir. Robotun ayak izi nedeniyle bu çizgi, temizlik yapılmış bölgelerle örtüşmektedir. Ancak, robotun dönüş yaptığı noktalarda küçük boşluklar oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu boşluklar, robotun dönüş manevralarının alanı eksiksiz bir şekilde kaplamasına engel olmuştur. Klasik boustrophedon algoritmasının bu dezavantajı, endüstriyel robot süpürge gibi büyük robotlar için dar geçişler ve karmaşık alanlara yol planladığından temizlik verimliliğini düşürmektedir.



Şekil 5. Poligon Seçimi

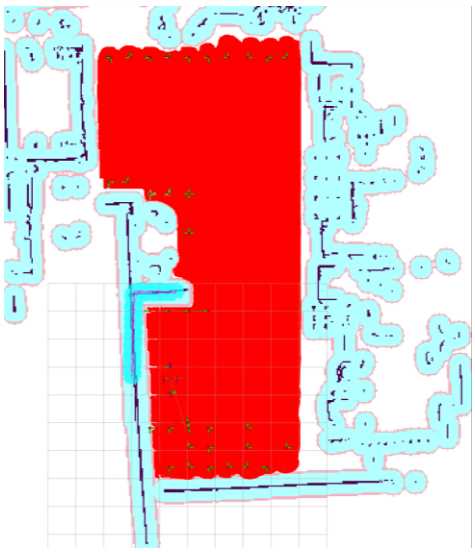


Şekil 6. Klasik Boustrophedon Yol İşaretleri ve Robotun Geçtiği Yerler

ROS2 içerisinde Nav 2 global planlayıcıda engellerin şişirme yarıçapı değiştirilebilir bir parametre olarak yer almaktadır. Bu parametre, fabrikanın içindeki robotun makinelere ne kadar yakın geçeceğini belirleyerek yol planlamasını optimize eder. Parametrenin artırılması, dar yolların oluşmasına neden olabilir. Ancak, robotun

boyutlarıyla uyumsuz olan ve geçişine olanak vermeyen dar yollar güzergâh planlamasında tercih edilmemektedir. Bu durum, algoritmamızın klasik boustrophedon algoritmasından farklı olarak özelleştirilmiş bir yapıya sahip olmasını sağlamaktadır.

Önerilen algoritma tarafından belirlenen yol noktaları sırasıyla takip eder (Şekil 7). Robot bir sonraki yol noktası(waypoint) için Nav 2 kullanılarak, her yol noktaları arasında engellerden kaçınabilecek şekilde yol planlamasını takip eder. Bu sayede, poligonun tüm alanını taranmış olmaktadır. Klasik boustrophedon algoritması, engellerin etrafından güvenli geçişi sağlamak amacıyla daha fazla sayıda yol noktası üretmektedir. Bu durum, robotun gereksiz dönüşler yapmasına ve operasyon süresinin uzamasına neden olmaktadır. Ancak, önerilen yaklaşımda, global maliyet haritası kullanılarak engellere yaklaşılmayacağı garanti altına alınmıştır. Bu sayede, yol noktası sayısında belirgin bir azalma elde edilmiştir. Yol noktalarının azalması, robotun daha uzun ve kesintisiz hareket edebilmesini sağlamış, dönüş sayısını minimize ederek operasyon süresini önemli ölçüde kısaltmıştır. Böylece, robotun kapsama alanı genişletilmiş ve genel verimlilik artırılmıştır. Bu iyileştirmeler, robotun engellere olan mesafesini optimize ederken, aynı zamanda hareket kabiliyetini de artırarak görevlerin daha hızlı tamamlanmasına katkıda bulunmuştur.



Şekil 7. Önerilen Algoritma Yol İşaretleri ve Robotun Geçtiği Yerler

3.1. Kapsama Verimliliği

Kapsama verimliliği, algoritmanın performansını değerlendirmek için dönüş miktarı, seyahat süresi ve kapsama yüzdesi metrikleri kullanılarak ölçülmüştür. Dönüş miktarı, robotun yön değiştirme sayısı, radyan cinsinden ölçülmüş ve toplamda tüm odayı dolaşırken yaptığı dönüşler toplanmıştır. Seyahat süresi, yol uzunluğu ve robotun dönüş süresi kullanılarak hesaplanmıştır. Robotun düz bir yolda ilerleme hızı 0,3 m/s, dönme hızı ise 0,52 rad/s olarak belirlenmiştir. Son olarak, kaplama yüzdesi, robotun kapsadığı alanın, geçilebilir alanların toplamına oranı olarak hesaplanmış ve algoritmanın verimliliğini ve etkinliğini değerlendirmek için kullanılmıştır. Robotun kat ettiği yolun ne kadarının zemini gerçekten kapsadığı yüzdelik olarak hesaplanmıştır. Yani, algoritmanın verilen bir alanı ne kadar verimli kapladığını ölçen bir metriktir. Hesaplama süresi her bir algoritmanın bir oda için örtme yolu planını hesaplaması için geçen süre kaydedilmiştir. Bu hesaplama yöntemleri Bormann ve arkadaşlarının (Bormann et al., 2018) çalışmasında ortaya konan yönteme benzer şekilde geliştirilmiştir.

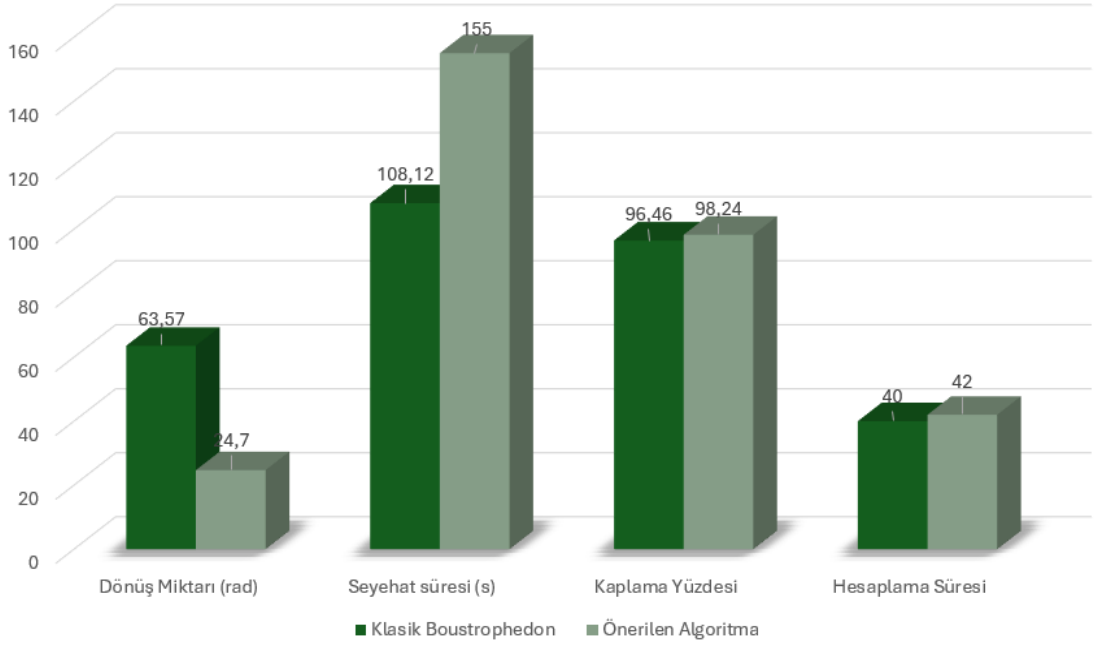
Önerilen algoritmanın performans metrikleri, çeşitli araştırmalarla da desteklenmiştir. Örneğin, Xing ve arkadaşlarının (2023) çalışmasında, takviyeli öğrenmeye dayalı bir tam kapsama yol planlama algoritmasının, insansız yüzey araçlarında kapsama verimliliğini artırma potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir. Benzer şekilde, Zeng ve arkadaşlarının (2023) TMSTC* algoritması, çoklu robotların dönüş miktarını azaltarak kapsama görevlerini daha hızlı tamamlamasına olanak tanıyan etkili bir çözüm sunmaktadır (Kleiner et al., 2017).

Bir başka çalışmada, Šelek ve arkadaşlarının (2022) düzgün tam kapsama yol planlama algoritması, algoritmanın etkinliğini artırmak için hız profili optimizasyonu yaparak robotun yörünge izleme ile algoritma performansını artırmıştır (Šelek et al., 2022).

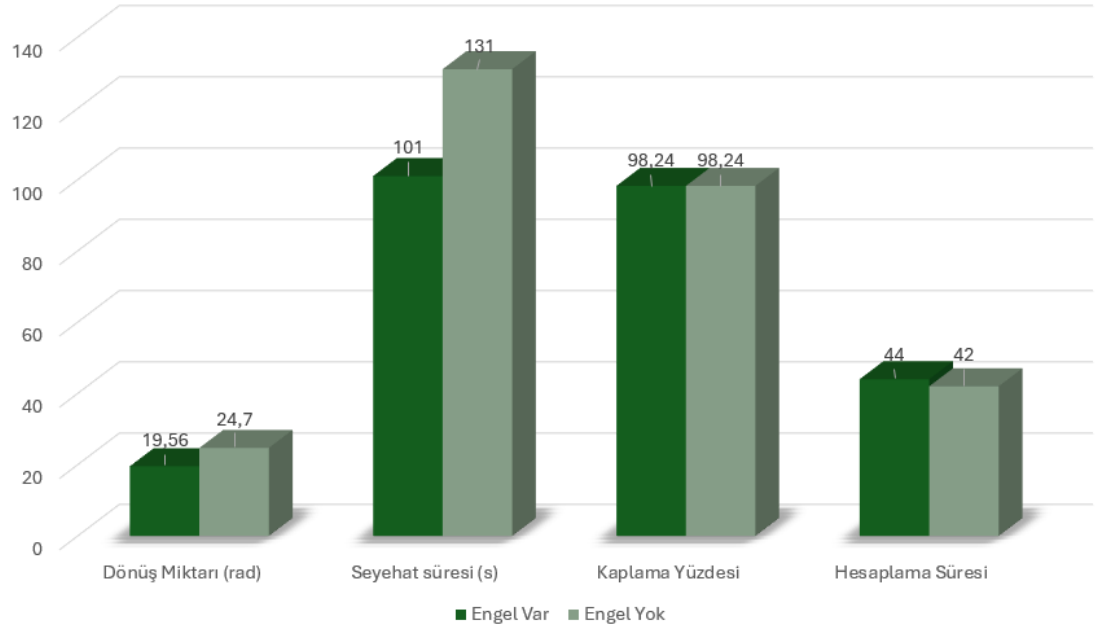
4. Sonuçlar ve Tartışma

Karşılaştırmalı olarak, klasik boustrophedon algoritması kullanılarak üretilen yollar, engellere yaklaşım ve kaplama verimliliği açısından daha düşük performans göstermiştir. Klasik algoritma, özellikle engelli ortamlarda, robotun ayak izine dayalı olmasından dolayı engellere yeterince yaklaşamamış ve bu da kaplama verimliliğini önemli ölçüde düşürmüştür. Test sonuçları Şekil 8'de grafik olarak gösterilmiştir. Grafikte, klasik boustrophedon algoritması ile önerilen algoritmanın dört farklı performans metriği üzerinden karşılaştırıldığı görülmektedir. Dönüş miktarı açısından klasik algoritma 63.57 rad dönüş yaparken, önerilen algoritma bu değeri 24.7 rad ile önemli ölçüde azaltmıştır, bu da daha verimli bir yol planlaması sağladığını göstermektedir. Seyahat süresi açısından klasik algoritmada 155 saniye ölçülürken, önerilen algoritmada bu süre 108,12 saniyeye çıkmıştır, bu da önerilen algoritmanın dönüş miktarı az olacak şekilde yol planladığından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle daha fazla zaman aldığını ortaya koymaktadır. Kaplama

yüzdesi açısından bakıldığında, klasik algoritma %96.45 alan kapsaması sunarken, önerilen algoritma %98.24 ile daha yüksek bir kapsama sağlamıştır. Hesaplama süresi açısından ise klasik algoritma 40 saniyede hesaplama yaparken, önerilen algoritma bu süreyi 42 saniye ile biraz daha uzatmıştır. Sonuç olarak, önerilen algoritma dönüş miktarını, seyahat süresini ve kapsama yüzdesini önemli ölçüde iyileştirirmiştir. Genel performansta ciddi bir iyileşme sağlamıştır. Bu sonuçlar, önerilen algoritmanın klasik boustrophedon algoritmasına kıyasla engellerle dolu karmaşık ortamlarda daha iyi performans gösterdiğini ve daha yüksek kaplama verimliliği sağladığını ortaya koymaktadır.



Şekil 8. Klasik Boustrophedon ile Önerilen Algoritma Karşılaştırılması



Şekil 9. Önerilen Algoritma Performans Metrikleri: Engellerin Etkisi

Bu çalışmada, önerilen algoritmanın fabrika ortamında endüstriyel süpürge robot tarafından engel bulunan ve engel bulunmayan alanlarda kapsam yol planlaması yaparken gösterdiği performans değerlendirilmiştir. Önerilen algoritmanın engelli ve engelsiz ortamda performans metriklerine göre sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir. Algoritmanın engelli ortamda hesaplama süresi 44 saniye olarak ölçülmüştür. Robotun engelli ortamda daha az yol almasından kaynaklı olarak, takip süresi 101 saniye olarak kaydedilmiştir. Robotun yaptığı toplam dönüş miktarı, radyan cinsinden 19,56 olarak hesaplanmıştır; bu da yol planlamasında yapılan dönüşlerin sıklığını ve yolun manevra gereksinimini gösterir. Bu dönüş miktarı, algoritmanın engeller ve dar

alanlar karşısında yolunu nasıl ayarladığının bir göstergesidir. Kaplama yüzdesi olarak ölçülen %98.24, robotun tarama işlemi sırasında eriştiği alanın, toplam geçilebilir alan içindeki oranını göstermektedir. Bu yüksek kaplama oranı, algoritmanın verimli bir şekilde çalıştığını ve minimum boşluk bırakarak alanın büyük bir kısmını kapladığını belirtir.

Bormann vd. (2018) çalışmasında belirtildiği gibi, çoğu kapsama algoritması engelli ve engelsiz ortamlarda farklı performans gösterir. Ancak, bu çalışmada geliştirilen algoritma hem engelli hem de engelsiz ortamlarda %98.24 gibi yüksek bir kaplama yüzdesi ile istikrarlı performans sergilemiştir. Bu sonuç, önerilen algoritmanın engel algılama ve yönetme kabiliyetinin, engellerin yoğun olduğu karmaşık ortamlarda bile alanın büyük bir kısmını kaplayacak şekilde etkili bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

Bu yüksek kaplama oranı, algoritmanın verimli bir şekilde çalıştığını ve minimum boşluk bırakarak alanın büyük bir kısmını kapladığını belirtir. Önerilen algoritmanın, Bormann ve arkadaşlarının çalışmasında karşılaşılan sorunları aşarak, engel varlığının kaplama verimliliğini düşürmediğini ve hatta engeller arasında verimli bir yol planlama stratejisi geliştirerek performansını koruduğunu kanıtlamaktadır.

Bu sonuçlar, önerilen algoritmanın, fabrika gibi karmaşık ortamlarda kararlı kapsama yüzdeliği sağlayacağını göstermektedir. Buna ek olarak, endüstriyel ortamlarda yüksek kapsama verimliliği ile temizlik görevini başarıyla yerine getirebileceğini göstermektedir. Algoritmanın etkinliği ve engelleri yönetme yeteneği, endüstriyel temizlik robotlarının daha geniş kullanım alanlarında başarıyla çalışmasını sağlayacak potansiyeli ortaya koymaktadır.

Etik Standartlar Bildirgesi
Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı
Bu çalışmanın planlanması, veri toplama, deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi ve makalenin yazım süreci Eylül Özer tarafından yürütülmüştür. Burak İnner, çalışmanın genel metodolojisi, sonuçların yorumlanması ve makalenin son halinin değerlendirilmesi ve düzeltilmesi süreçlerinde katkı sağlamıştır. Her iki yazar da çalışmanın tüm aşamalarında iş birliği içinde aktif rol oynamışlardır.

Çıkar Çatışması Beyanı
Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği
Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Teşekkür

Robotun temini ve test edilmesi süreçlerinde sağladıkları imkanlar ve değerli katkıları nedeniyle Birfen Elektrik A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

An, V., Qu, Z., Crosby, F., Roberts, R., & An, V. (2020). A Triangulation-Based Coverage Path Planning. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 15(4), 1653-1662. https://doi.org/10.1109/TASE.2018.2799927

Bähnemann, R., Lawrance, N., Chung, J. J., Pantic, M., Siegwart, R., & Nieto, J. (2021). Revisiting Boustrophedon Coverage Path Planning as a Generalized Traveling Salesman Problem. In J. M. R. Sivalingam, J. A. Movellan, & S. Ozawa (Eds.), Field and Service Robotics (pp. 237-252). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9460-1_20

Beşkirli, M. and Tefek, M. (2019). Parçacık sürü optimizasyon algoritması kullanılarak optimum robot yolu planlama. European Journal of Science and Technology, 201-213. https://doi.org/10.31590/ejosat.637832

Bobkov, D., Kiechle, M., Hilsenbeck, S., & Steinbach, E. (2017). Room Segmentation in 3D Point Clouds Using Anisotropic Potential Fields. 2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC), 1-6. https://doi.org/10.1109/ICCIC.2017.8524392

Bormann, R., Jordan, F., Hampp, J., & Hagele, M. (2018). Indoor Coverage Path Planning: Survey, Implementation, Analysis. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 1718-1725. https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460566

Cai, Z., Li, S., Gan, Y., Zhang, R., & Zhang, Q. (2022). Research on Complete Coverage Path Planning Algorithms Based on A* Algorithms. Expert Systems with Applications, 207, 117738. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117738

Carvalho, J. P., & Aguiar, A. P. (2023). A Reinforcement Learning Based Online Coverage Path Planning Algorithm. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 20(3), 1459-1471. https://doi.org/10.1109/TASE.2023.3272003

Chen, X., Tucker, T. M., Kurfess, T. R., & Vuduc, R. (2019). Adaptive Deep Path: Efficient Coverage of a Known Environment Under Various Configurations. IEEE Robotics and Automation Letters, 5(2), 1816-1823. https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2966891

Choi, Y.-H., Lee, T.-K., Baek, S.-H., & Oh, S.-Y. (2009). Online Complete Coverage Path Planning for Mobile Robots Based on Linked Spiral Paths Using Constrained Inverse Distance Transform. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 56(4), 539-555. https://doi.org/10.1007/s10846-009-9310-2

Chowdhury, J. C., & Prabhakar, P. (2023). Optimal Multi-Robot Coverage Path Planning for Agricultural Fields

using Motion Dynamics. IEEE Access, 11, 76679-76689. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3289267

Dakulović, M., Horvatić, S., & Petrović, I. (2011). Complete Coverage D* Algorithm for Path Planning of a Floor-Cleaning Mobile Robot. IFAC Proceedings Volumes, 44(1), 11939-11944. https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT1002.03306

Dönmez, E. and Kocamaz, A. (2019). Çoklu hedeflerin çoklu robotlara paylaştırılması için bir yük dengeleme sistemi. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8(2), 533-548. https://doi.org/10.17798/bitlisfen.467757

Esfahani, M. A., Wang, H., Wu, K., & Yuan, S. (2020). Unsupervised Scene Categorization, Path Segmentation. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 22(12), 7601-7613. https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3034683

Gajjar, S., Bhadani, J., Dutta, P., & Rastogi, N. (2017). Complete Coverage Path Planning Algorithm for Known 2D Environment. 2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC), 1-5. https://doi.org/10.1109/ICCIC.2017.8524392

Gezer, A. (2024). Parçalı hücresel genetik algoritma ile insansız hava aracı performansına dayalı yol planlama. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi. 40 (1), 135 - 154 https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1156817

Guo, S., Wang, T., Huang, Y., & You, D. (2022). Path planning algorithm for sweeping robot full traversal cleaning area. IEEE Access, 10, 119273-119283. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3221437

Kleiner, A., Baravalle, R., Kolling, A., Pilotti, P., & Munich, M. (2017). A Solution to Room-by-Room Coverage for Autonomous Cleaning Robots. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 1-8. https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8206429

Liu, Z., & Zhou, W. (2023). Energy-Efficient Algorithms for Path Coverage in Sensor Networks. Sensors, 23(11), 5026. https://doi.org/10.3390/s23115026

Mahajan, A., & Rock, S. (2020). Completeness Seeking Probabilistic Coverage Estimation using Uncertain State Estimates. IEEE Transactions on Robotics, 37(2), 427-442. https://doi.org/10.1109/TRO.2020.3043199

Nama, L. H., Huang, L., Li, X. J., & Xu, J. F. (2016). An Approach for Coverage Path Planning for UAVs. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 3208-3213. https://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7496385

Özdemir, D. and Karaman, S. (2017). Investigating interactions between students with mild mental retardation and humanoid robot in terms of feedback types. Ted Eğitim ve Bilim. 42, 191, 109-138 https://doi.org/10.15390/eb.2017.6948

Pérez-González, A., Benítez-Montoya, N., Jaramillo-Duque, Á., & Cano-Quintero, J. B. (2021). Coverage Path Planning with Semantic Segmentation for UAV in PV Plants. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 12(11), 287-296. https://doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0121136

Rodrigues, R. T., & Aguiar, A. P. (2018). A Coverage Planner for AUVs Using B-splines. OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston, 1-8. https://doi.org/10.1109/OCEANS.2018.8729760

Ranjitha, T. R., & Guruprasad, K. R. (2016). Pseudo Spanning Tree-based Complete and Competitive Robot Coverage Using Virtual Nodes. Procedia Computer Science, 89, 292-299. https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.06.052

Šelek, A., Seder, M., Brezak, M., & Petrović, I. (2022). Smooth Complete Coverage Trajectory Planning Algorithm for a Nonholonomic Robot. Sensors, 22(23), 9269. https://doi.org/10.3390/s22239269

Thiayagarajan, K., & Balaji, C. G. (2012). Traversal Algorithm for Complete Coverage. Journal of Computer Science, 8(12), 2032-2041. https://doi.org/10.3844/jcssp.2012.2032.2041

Xing, B.; Wang, X.; Yang, L.; Liu, Z.; Wu, Q. (2023). An Algorithm of Complete Coverage Path Planning for Unmanned Surface Vehicle Based on Reinforcement Learning. Journal of Marine Science and Engineering, 11(3), 645. https://doi.org/10.3390/jmse11030645

Zeng, B., Tang, J., Lam, T. L., & Wen, J. (2023). TMSTC*: A Path Planning Algorithm for Minimizing Turns in Multi-Robot Coverage. IEEE Robotics and Automation Letters, 8(9), 4819-4826. https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3290366