



An integrated approach to development of unmanned ground vehicle: design, analysis, implementation and suggestions

Ömer Cihan Kıvanç^{1*}, Tahir Eren Mungan¹, Berkin Atıla¹, Gürkan Tosun²

¹Department of Electrical and Electronics Engineering, Istanbul Okan University, Istanbul, 34959, Turkey

²Research and Development Directorate, TOFAS, Bursa, 16110, Turkey

Highlights:

- Improving of sensor data using hybrid filter approach
- Simultaneous localization and mapping
- Heuristic path searching algorithm

Keywords:

- Unmanned ground vehicle
- Trajectory tracking
- Simultaneous localization and mapping
- Kinematic modeling
- Heuristic path searching

Article Info:

Research Article

Received: 02.04.2018

Accepted: 16.09.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571644

Acknowledgement:

This work was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK), funded project 215E364.

Correspondence:

Author: Ömer Cihan Kıvanç
e-mail: cihan.kivanc@okan.edu.tr
phone: +90 216 677 1630

Graphical/Tabular Abstract

In this study, an unmanned ground vehicle (UGV) has been developed, which has the ability to navigate to a self-determined or unknown area, the ability of mapping, localization, trajectory detection and tracking, detection of obstacles and finding a new path to avoid collisions with these obstacles. In an area without a specific map, sketch or floor plan, UGV's autonomous driving capability in indoor and outdoor, has been verified by the experiments. A general system block diagram and manufactured UGV are given in Figure A.

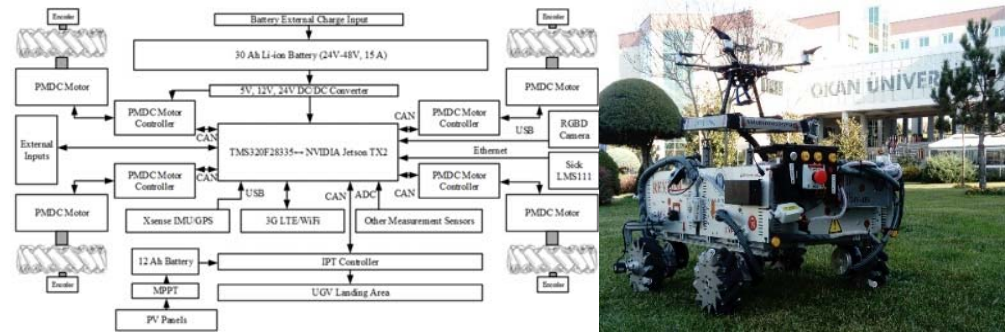


Figure A. Designed and manufactured unmanned ground vehicle

Purpose:

The aim of the study is to develop the design and implementation of a UGV using an interdisciplinary approach and to determine the necessary algorithms and component selection criteria.

Theory and Methods:

In this study, the mechanical and electrical components of the UGV are determined and kinematic equations of the selected mechanical drive topology are obtained. The trajectory tracking algorithm is simulated in MATLAB/Simulink using the kinematic model of UGV. Also, hybrid filters have been developed to improve the performance of a low-precision GPS. Moreover, simultaneous localization and mapping (SLAM) algorithm is developed for autonomous driving in environments without GPS access.

Results:

The skidding and vibration of the mecanum wheels are compensated by the encoder, IMU and current sensor fusion. The disadvantages of a low-cost GPS have been minimized using the designed hybrid filters. High-performance SLAM has been developed by including IMU and radar for HectorSLAM algorithm. Also, autonomous driving is performed using a heuristic path search and trajectory tracking algorithms in indoor and outdoor.

Conclusion:

The required phases, problems, solution techniques and results for UGV design are presented using an integrated approach in this study. The implementation details and the proof-of-concept design show that the design approach is suitable for use in the autonomous driving.



İnsansız kara aracı geliştirmeye bütünleşik bir yaklaşım: tasarım, analiz, uygulama ve öneriler

Ömer Cihan Kıvanç^{1*}, Tahir Eren Mungan¹, Berkin Atıla¹, Gürkan Tosun²

¹Okan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İstanbul, 34959, Türkiye

²Araştırma ve Geliştirme Müdürlüğü, TOFAŞ, Bursa, 16110, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Sensör verilerinin hibrit filtre yaklaşımıyla iyileştirilmesi
- Eş zamanlı konum belirleme ve haritalama
- Sezgisel yol arama algoritması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 02.04.2018
Kabul: 16.09.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571644

Anahtar Kelimeler:

İnsansız kara araçları,
yörünge takibi, eş zamanlı
konum belirleme ve
haritalandırma, kinematik
modelleme,
sezgisel yol arama

ÖZET

Akıllı araç kavramının elektrikli araçlar ile ivme kazanması ve sonrasında otonom araç teknolojilerine olan ilginin artmasıyla birlikte insansız kara aracı (İKA) çalışmaları ve yatırımları hız kazanmaktadır. İnsansız kara araçları karmaşık bir yapıya ve teknolojiye sahip olmalarına rağmen, kullanımlarıyla beraber birçok avantajı beraberlerinde getirmektedirler. İnsana özgü özelliklere sahip olmamaları (uyku, yorgunluk, sinir vb.), hızlı tepki verebilmeleri ve koşullara göre olasılıkları hesaplayıp en doğru kararı seçebilmeleri İKA'ların en önemli avantajlarıdır. Yapılan çalışmada, haritalandırma, konumlandırma, yol arama ve takip etme kabiliyetlerine sahip bir İKA geliştirilmiştir. Belirli bir harita, kroki veya kat planı bulunmayan bir arazide; İKA'nın açık ve kapalı alanda otonom sürüş geliştirme kabiliyeti yapılan deneyler ile doğrulanmıştır. Çalışmada İKA tasarımı için gereksinim duyulan aşamalar, problemler, çözüm teknikleri, sonuçlar ve öneriler sistematik bir yaklaşım ile sunulmuştur.

An integrated approach to development of unmanned ground vehicle: design, analysis, implementation and suggestions

H I G H L I G H T S

- Improving of sensor data using hybrid filter approach
- Simultaneous localization and mapping
- Heuristic path searching algorithm

Article Info

Research Article
Received: 02.04.2018
Accepted: 16.09.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571644

Keywords:

Unmanned ground vehicle,
trajectory tracking,
simultaneous localization
and mapping,
kinematic modeling,
heuristic path searching

ABSTRACT

As the intelligent vehicle concept accelerated with electric vehicles, and then interest in autonomous vehicle technologies increased, investments on unmanned ground vehicle (UGV) studies also accelerated. Unmanned ground vehicles, despite their complex structure and technology, bring many advantages with their use. The most important advantages of UGVs are that they do not have human-specific features (sleepiness, fatigue, anger, etc.), react faster, and reach a decision by calculating possibilities according to the conditions. In this study, a UGV has been developed, which has the ability to navigate to a self-determined or unknown area, ability of mapping, localization, trajectory detection and tracking, detection of obstacles and finding a new path to avoid collisions with these obstacles. In an area without a specific map, sketch or floor plan, UGV's autonomous driving capability in indoor and outdoor, has been verified by the experiments. The phases, problems, solution techniques and results required for UGV design are presented with a systematic approach in this study.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: cihan.kivanc@okan.edu.tr, munganeren@gmail.com, berkinatila@gmail.com, grkntosun@gmail.com / Tel: +90 216 677 1630 / 2485

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda endüstriyel ve akademik çalışmaların odak noktalarının başında, otonom kabiliyetlerine sahip sistemlerin tasarımı ve imalatı ile birlikte ticari bir değer kazanması göze çarpmaktadır [1]. Yakın gelecekte bu sistemlerin kabiliyetlerinin artması ve tam-otonom yeteneklere sahip olması kaçınılmazdır [2]. Bu sistemlerin endüstriyelmiş ilk örnekleri, savunma sanayiinde kullanılan insansız hava araçları, otomatik park edebilen [3] ve tehlike anında sürücü yerine frene daha erken basabilen otomobiller [4] olarak görülmektedir. İlk gelişmiş örnekler çoğunlukla yarı-otonom olarak adlandırılmakta [5] ve insan desteğine ya da rota planına ihtiyaç duyabilmektedir [6]. Tam otonom sistemlerin ilk örnekleri çoğunlukla insansız kara araçları (İKA) üzerindedir [7]. Bu araçların bilinen ilk gelişmiş örnekleri otomotiv sektöründe olup bunun en önemli sebebi otonom araçlar ile herhangi bir şehrin karşılaşabileceği trafik sıkışıklığı, trafik kazaları ve kara ulaşımının neden olduğu olumsuz çevresel etkiler gibi sorunları çözmeye yolunda güçlü çözümler üretilmesinin sağlanabilmesidir [8]. Buna karşılık otomotiv sanayiindeki güvenlik, standardizasyon ve altyapı güçlükleri sebebiyle, İKA'ların en yaygın kullanım alanları otonom mobil robotlar olmaktadır [9].

İKA'lar insan müdahalesi olmaksızın belirlenen bir taktik, görev ya da seyrüseferi başarabilen araçlar olarak tanımlanmaktadır. Klasik kullanıcıya bağımlı ya da kontrollü araç teknolojilerinden farklı olarak İKA'lar gelişmiş bir takım donanım ve yazılımlara sahiptirler. Bu bileşenleri sayesinde İKA'lar kendi kendine karar verme, veri güvenliğini sağlama, verileri değerlendirme kabiliyetlerine sahip olabilmektedir. Bu kabiliyetler İKA'ya, çevre tarama, tanıma ve araştırma, taktik hareket gerçekleştirme, dinamik ve statik ortamlara uyum sağlama ve bilinmeyen ortamı haritalandırma imkânı sunarak, endüstride ve savunma sanayiinde çeşitli görevlerde kullanılabilme olanağı sağlamaktadır [2]. Bu uygulama alanları gerek mekanik gerekse de elektrik/elektronik bileşenlerin seçim kısıt ve kısıtlarını belirlemektedir. Özellikle itki sistemleri ve manevra kabiliyetleri mekanik kısıt ve kısıtları belirlerken, çevresel tanıma ve karar verme kabiliyetleri ise elektrik/elektronik bileşenlerin seçiminde önemli rol oynamaktadır.

Robotik uygulamalarda mekanik tasarım süreci; İKA'nın içerdiği sıra dışı geometri, dinamik etkenlerin çokluğu, eklem bölgelerinin tasarım sürecinde ki tolerans payının azlığı sebebiyle karmaşık bir yapıya sahip olabilmektedir [10]. Ekseriyet uygulama ve göreve göre eyleyici, tahrik ve tekerlek tipi seçilmektedir. Bilhassa, dar alan çalışmaları, lojistik uygulamaları, uzay sanayii ve askeri uygulamalarda özel amaçlı, çok yönlü doğrudan tahrikli tekerlekler kullanılmaktadır [11]. Bu sistemlerin en önemli avantajı çok çeşitli kontrol, direksiyondan bağımsız dönüş kabiliyeti ve farklı operasyonel görevlere hızlıca uyum sağlayabilmeleridir. Mekanik tasarım gibi elektronik

bileşenlerin seçimi ve kontrol algoritmaları da İKA'nın kabiliyet sınırlarını belirlemektedir. Tam otonom bir İKA kendi kendine bir bölgede ilerleyebilecek yetide olmalı ve haritalandırma, yol arama, bulma ve takibi, statik ve dinamik engellerden kaçınma, karar verebilme özelliklerine sahip olmalıdır. Ayrıca İKA, kroki/kat planı olmadan hedefe erişebilmeli ve tanımladığı verileri kayıpsız ve güvenli bir şekilde bulut sunuculara ya da sürü de yer alan diğer araçlara iletebilmelidir [12]. Bu kabiliyetler ise İKA'nın sahip olduğu sensör teknolojisi [13] ve veri işleme kapasitesi ile ilişkilendirilmektedir [14].

Literatürde İKA'lara dair çalışmalar çoğunlukla otonom sürüş seviyesini arttırmaya yönelik başlıklar, benzetim çalışmaları ve uygulamalar üzerinedir. Bu çalışmalar haritalandırma, konumlandırma, yol takibi, sürü algoritmaları, erişilebilirlik, sensör teknolojileri [15], karar verme, sezgisel yol arama, enerji tüketimi ve mekanik eklem tasarımı üzerine yoğunlaşmaktadır [16]. Ancak belirli bir sistematik ile tasarım kriterlerine erişilmesi, bu kriterlerin tanımlanması ve çoklu disiplin yaklaşımı ile algoritma geliştirilmesi örneklerine yeterli sıklıkta rastlanılmamaktadır. Bu sebeple yapılan çalışmada, bir İKA'nın tasarımı ve uygulama aşamaları disiplinler arası sistematik bir yaklaşım ile yapılmış olup, algoritma ve bileşen seçim kriterleri alt başlıklarda detaylı bir literatür incelemesiyle sunulmuştur. Ayrıca mekanum tekerleklere özgü kayma ve titreşim hareketi enkoder, IMU ve akım sensörü bütünleşmesiyle kompakte edilmiştir. Buna ek olarak tasarlanan hibrit filtreler ile düşük maliyetli bir GPS kullanımının ortaya çıkardığı dezavantajlar minimuma indirilmiştir. Eş zamanlı konum belirleme ve haritalandırma algoritmasında ise HectorSLAM algoritmasına IMU ve radar verileri de dahil edilerek daha yüksek başarımlı bir otonom sürüşe imkân tanınmıştır.

Çalışmanın ikinci kısmında çalışmanın ana motivasyonu belirtilmiş ve geliştirilen İKA'nın kinematik eşitlikleri elde edilerek, MATLAB/Simulink ortamında benzetim çalışmaları yapılmıştır. Üçüncü kısımda sensör verilerinin analizi ve iyileştirilmesine yönelik algoritma geliştirilmesi ve benzetim çalışmalarına yer verilmiştir. Dördüncü kısımda GPS erişiminin olmadığı ortamlarda otonom sürüş gerçekleştirilmesi için eş zamanlı konum belirleme ve haritalandırma (EZKBH) algoritması geliştirilmiştir. Beşinci kısımda sezgisel yol arama ve yörünge takibi algoritmasının çalışma prensibi, deneysel çalışmalar ve test sonuçlarına yer verilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde açık ve kapalı alanlarda hedefe ulaşabilen ve çevresini yeterli ölçüde tanımlayabilen düşük maliyetli bir İKA geliştirilmiştir. İKA'nın sahip olduğu yetenekler yapılan benzetim ve deneysel çalışmalar sonucunda doğrulanmıştır.

2. TASARIM YAKLAŞIMI (DESIGN APPROACH)

İKA'nın tasarım sürecinin başında görevlendirme ve kullanım alanına göre hareket kabiliyeti önem kazanmaktadır. x-, y- ve z- eksenli hareketler ve bunu

sağlayan tahrik bileşenlerine göre kazanılan manevra kabiliyeti aracın tasarım başlangıç motivasyonunu belirlemektedir [17]. Geliştirilen İKA'nın çok yönlü hareket gerçekleştirmesini sağlamak ve dönüş kabiliyetini direksiyon yerine elektrik motoru tahriği ile yapabilmesi için mekanum tekerleklere sahip bir İKA tercih edilmiştir. Kullanılan mekanum tekerlekler 45°'lik farklarla birbirlerine paralel yerleştirilmiş ve bir seri mini silindir tekerleğin çemberin etrafına sarılmasından oluşmaktadır [18]. Çok eksenli hareket kabiliyetini kazandıran bu mini silindirler genellikle tekerlek düzlemi ve hareket eksenini ile 45°'lik açı yapacak şekilde konumlandırılmaktadır [11, 19]. Bu mini tekerlekler hem kullanılan malzeme hem de sahip oldukları geometri sebebiyle geleneksel tekerlekler kadar sürtünme kuvvetine maruz kalmazlar. Sürtünme kuvveti değeri düşük olduğundan ötürü ivmelenme becerisi ya da mekanum tekerleklere özgü hareketlerin yüksek verimde gerçekleştirilmesi konusunda eksiklikler ortaya çıkmaktadır [11, 19]. Dolayısıyla mekanum tekerleklerin silindirlerinde kullanılan malzemenin türü, sürtünme kuvvetinin artırılması ve mukavemetin sağlanmasında büyük rol oynamaktadır. Günümüzde mekanum tekerlek üreticileri, yüksek sürtünme kuvveti oluşturmak amacıyla poliüretan malzeme kullanmaktadırlar. Ayrıca mekanum tekerleklerin yapısı da performanslarını etkilemektedir. Silindirlerin iki veya daha fazla parçadan oluşması eğimli arazilerde mekanum tekerleklerin hareket kabiliyetindeki aksaklığın en aza indirgenmesi için önemli bir tasarım kriteridir. Mekanik tasarım kriterlerinden farklı olarak elektronik bileşenlerin seçim kriterlerinde ise hedeflenen algılama ve kontrol yeteneği düzeyine göre tasarım geliştirilmelidir. Yapılan çalışmada özgün ve bütünlük bir yaklaşım taşıma gereksiniminden dolayı geliştirilen İKA'nın elektronik tasarım motivasyonunu oluşturan hedef ve kapsam sırasıyla; i) çevre tarama ve araştırma, ii) taktik hareket kabiliyetine sahip olma, iii) ihtiyaç durumuna göre taşıma kabiliyetine sahip olma, iv) dinamik ortamlara uyum sağlama, v) bulunduğu ortamı mümkün olan en üst düzeyde tanıma ve

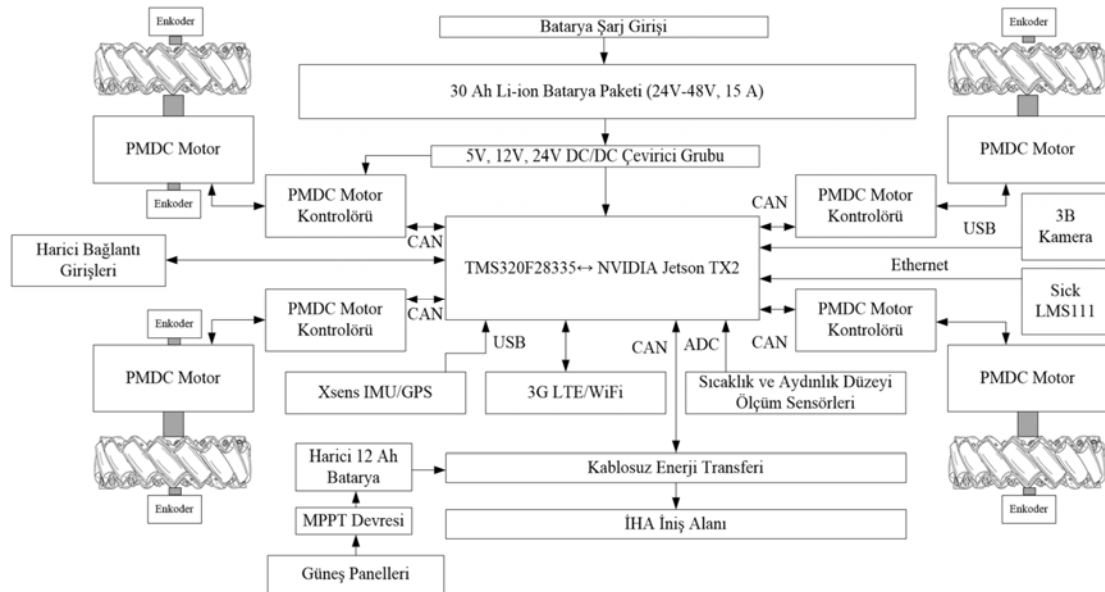
algılayıcıları ile haritalar oluşturarak karar verme kabiliyetine sahip olmasıdır. Belirlenen kriterlere sahip bir İKA için gerekli olan fonksiyonları sağlamak amacıyla seçilen bileşenler ve temel yapı ilişkilendirilmiş bloklar halinde Şekil 1'de gösterilmektedir.

2.1. Kinematik Modelleme (Kinematic Modeling)

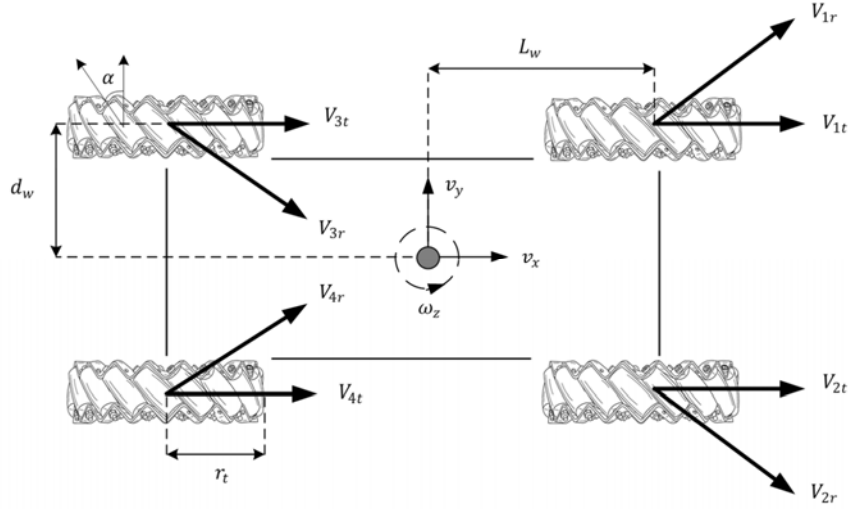
İKA kinematik modeli; hareket kontrolü, sürtünmeden kaynaklı verimsiz hızın belirlenmesi ve minimuma indirgenmesi ile yörünge takip algoritmaları için hayati önem taşımaktadır [11, 17]. Klasik tekerlek yapısından farklı olarak mekanum tekerleklerin dönerken iki ya da bir mini silindir tekerleği zemin ile temas edebilmektedir [18]. Bu sebeple işe yarayan hız miktarı klasik teker yaklaşımından farklı olmaktadır. Ayrıca mekanum tekerleklerin yapısından kaynaklanan kayma bilinen en yaygın mekanik problemdir [18]. Bu kayma ise mini silindirlerin tekerleğin dönüşü esnasında yaptıkları serbest dönüşlerdir. Özellikle odometrik ölçümler ve yörünge takibinde aracın gerçek pozisyonun elde edilebilmesi için kayma ve reaktif yer değiştirme dezavantajlarını gidermek amacıyla detaylı bir kinematik model analizinin durum-uzay eşitlikleriyle ifade edilmesi ve bu eşitliklerdeki lineer olmayan bileşenlerin sisteme olan etkisinin incelenmesi, mekanik tasarım ve eyleyici kontrolü için faydalı olmaktadır [18, 19]. Şekil 2'de çekiş, mekanum tekerleğin dönme yönüne bağlı olarak α açısı ile sağlanmakta ve bu da zemine temas eden alanın yönünün hareketini belirlemektedir. Bu etkileşime göre mekanum tekerleğin hızı Eş. 1'de görüldüğü gibi ifade edilmektedir.

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_m \sin \alpha \quad (1)$$

Eş. 1'de, elektrik motorunun dönüş hızı, $\dot{\theta}_m$, tekerleğin aktif dönüş hızı ise $\dot{\theta}$ ile ifade edilmektedir. Her bir tekerleğin dönüş hızı, her bir tekerleğin enkoderinden gelen veriler ile belirlenmektedir. Silindirler tekerlek dönme eksenine paralel



Şekil 1. Geliştirilen İKA'nın ilişkilendirilmiş bloklar ile gösterimi (Representation of developed UGV's block diagrams)

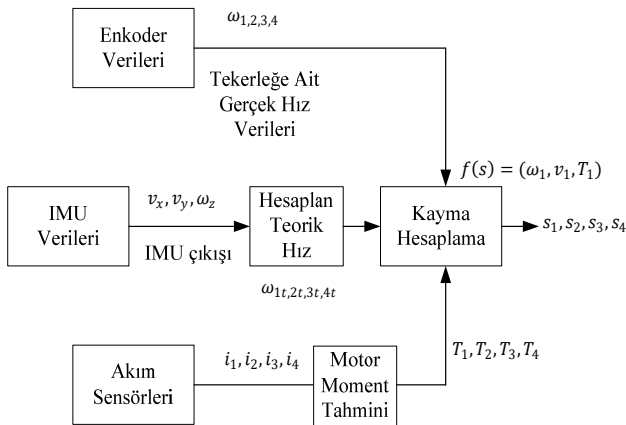


Şekil 2. İKA'nın kinematik modelinin gösterimi (Representation of UGV kinematic modeling)

olarak monte edildiğinde, tamamen kaymadan ibaret bir hareket elde edilecektir. Silindirler tekerleğin dönme eksenine dik olarak monte edildiğinde ise maksimum faydalı hareket oluşabilmektedir. Literatürde yer alan bazı çalışmalar bu kaymayı minimuma indirme ve bu dezavantajı ortadan kaldırmaya yöneliktir [18]. Dinamik modelleme esnasında bu durumun dikkate alınması gerekmekte ve kayma ifadesi Eş. 2'de gösterilmektedir.

$$s = \frac{\Delta X}{r_t \dot{\theta} \Delta T \sin \alpha} \quad (2)$$

Eş. 2'de İKA'nın ΔT zaman aralığında gerçekleştirmiş olduğu gerçek yer değiştirme, ΔX , tekerleğin ortalama dış yarıçapı, r_t , kayma miktarı ise s ile gösterilmektedir. ($r_t \dot{\theta} \Delta T \sin \alpha$) ifadesi, IMU (atalet ölçüm birimi) sensörü ve enkoder tarafından ölçülen tekerleğin yer değiştirmesidir.



Şekil 3. Kayma hesaplama yaklaşımı (Slip calculation approach)

Yapılan çalışmada motorların talep ettikleri moment, pozisyon değişim ilişkisi ve odometri verileri takip edilerek kaymanın olumsuz etkileri minimuma indirgenmiştir. Geliştirilen kayma kompanzatoründe; her bir tekerleğe bağlı enkoder ve akım sensörü ile İKA'da ki IMU verilerinden

faydalanılarak tekerlek kayması hesaplanmaktadır. Kayma kompanzatorünün çalışma prensibi ilişkilendirilmiş bloklar halinde Şekil 3'de gösterilmektedir. Kayma kompanzatoründe enkoderden gelen pozisyon bilgileri dönel hız bilgilerine dönüştürülerek kayma fonksiyonun bir elemanı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca IMU çıkışından elde edilen x, y, z ekseninde ki öteleme, İKA'nın hareket eksenine göre kompanzator fonksiyon girdisi olarak kullanılmaktadır. IMU verilerinin hassasiyeti ve olası hataları sensör çıkışında ki hareketli ortalama filtre ile minimuma indirgenmiştir. Ayrıca gerçek zamanlı çalışmada ortaya çıkan hataları daha da küçültmek için motor hareketi ile tekerlek hareketi birbirinden ayrılmıştır. Motorların bara akımları ölçülerek kayma kaynaklı yer değiştirme ile motor tahriği kaynaklı yer değiştirmeler Şekil 3'de gösterilen algoritmaya göre pozisyon referansına eklenmiştir. Bunun yanı sıra yörünge takip kontrolünde ihtiyaç duyulan kinematik eşitliklere ait büyüklükler Şekil 2'de gösterilmektedir. Kinematik modelde yer alan tekerlek hızı ifadesi Eş. 3'de gösterilmektedir.

$$V_{1t} = r_t \omega_{1t} = r_t \dot{\theta}_{1t} \quad (3)$$

Kinematik modeli elde edebilmek için her bir tekerleğin kartezyen koordinatlardaki hızı, V_{1t} , tekerleğin dönüş hızı, ω_{1t} , ve tekerleğin açıl hızı, θ_{1t} , ile ilişkili olarak elde edilmektedir. Özellikle dört çekişli ve bağımsız tahrik kontrolüne sahip İKA'lar için robotun hız tahmini bağımsız her bir tekerlek için farklı olmaktadır [11]. Mekanum tekerleklerin doğası gereği yüzeye temas eden silindir ya da silindirlerin teğet hız bilgisini elde etmek için Eş. 4 ve Eş. 5 elde edilmektedir.

$$V_{1tx} = V_{1t} + \frac{V_{1r}}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

$$V_{1ty} = \frac{V_{1r}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

Eş. 4 ve Eş. 5'de silindirlerin teğet hız ifadesi, V_{1r} , V_{1t} 'nin x ve y eksenini bileşenleri ise V_{1tx} ve V_{1ty} olarak belirtilmiştir.

İfade de x ve y bileşenlerinde ki $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ifadesi silindirlerin düzleme 45° açı ile konumlanmış olmasından dolayı gelen $\cos(\pi/4)$ ifadesidir. V_{1tx} ve V_{1ty} ifadelerinin x ve y eksen bileşenleri olan v_{1x} ve v_{1y} cinsinden Eş. 6 ve Eş. 7'de görüldüğü gibi elde edilmektedir.

$$V_{1tx} = v_{1x} - d_w \omega_z \quad (6)$$

$$V_{1ty} = v_{1y} + L_w \omega_z \quad (7)$$

Eş. 6 ve Eş. 7'de, ω_z , İKA'nın açısal hızını, d_w , arka tekerlekler arası mesafenin yarısını, L_w , ön ve arka tekerlekler arası mesafenin yarısını belirtmektedir. Eş. 4-Eş. 7 bir arada çözüldüğünde oluşan Eş. 8, İKA'nın bir numaralı tekerleği için ters kinematik ifadesini vermektedir.

$$V_{1t} = v_{1x} - v_{1y} - (L_w + d_w) \omega_z \quad (8)$$

Eş. 8'de değişkenlere göre matris formunda yazıldığında Eş. 9'da ki hali almaktadır.

$$V_{1t} = [1 \quad -1 \quad -(L_w + d_w)] [v_{1x} \quad v_{1y} \quad \omega_z]^T \quad (9)$$

Eş. 8 ve Eş. 9'de iki, üç ve dört numaralı tekerlekler için tekrarlanarak bir araya getirildiğinde Eş. 10-Eş. 12 İKA'nın kinematik ifadesi olarak elde edilmektedir.

$$v_x = \frac{r_t}{4} (\dot{\theta}_{1t} + \dot{\theta}_{2t} + \dot{\theta}_{3t} + \dot{\theta}_{4t}) \quad (10)$$

$$v_y = \frac{r_t}{4} (-\dot{\theta}_{1t} + \dot{\theta}_{2t} + \dot{\theta}_{3t} - \dot{\theta}_{4t}) \quad (11)$$

$$\omega_z = \frac{r_t}{4(L_w + d_w)} (-\dot{\theta}_{1t} + \dot{\theta}_{2t} - \dot{\theta}_{3t} + \dot{\theta}_{4t}) \quad (12)$$

Sayısal harita verileri ile takip edilecek yörüngeden yana kaçıklık miktarının hesaplanması ve bu yana kaçıklığı minimuma indireyecek eyleyici kontrol algoritmaları ile araç kinematığı bir arada modellenerek benzetim çalışmaları yapılmıştır [11]. Benzetimde İKA modelinin kendi rotasında kalabilmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Benzetimde İKA'nın hız, rota ve moment profili dikkate alınarak kontrol algoritması geliştirilmiştir. Dört ayrı elektrik motoru farklı dönüş geometrilerinde farklı yük momentleri ile karşılaşmakta ve bu durumda kararlılığı sağlamak için hız, akım ve pozisyon kontrolcüsü ile motorların kontrolü yapılmıştır. Geliştirilen kaskat motor kontrolcüsü ile her bir motor için üç ayrı PI kontrolör tasarlanmıştır. PI kontrolörler sırasıyla moment, hız ve pozisyon referanslarının minimum hata ile takip edilmesini sağlamaktadır. Şekil 4'de yörüngenin açı cinsinden enlem ve boylam eksenindeki grafiği gösterilmektedir. Geliştirilen kinematik model sayısal harita tabanı ile birlikte MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur. Benzetimde kullanılan GPS (Küresel Koordinat Sistemi) sensörünün transfer fonksiyonu yaklaşık 0.5-1 m hassasiyetli olacak şekilde benzetilmiştir. Şekil 4a'da geliştirilen kinematik modelin referans yörüngesi kayma miktarını iyileştirmeden takip sonucu ve kayma kompanzasyonu dâhil edilmiş takip sonucu gösterilmiştir. Şekil 4b'de ise enlem ve boylamda ortaya çıkan hata ve

sapma miktarı görülmektedir. Şekil 4b'de "hata-1 (enlem)", sadece hız kontrollü motor tahriği ile yörünge takibinde oluşan enlem hatası; "hata-1 (boylam)", sadece hız kontrollü motor tahriği ile yörünge takibinde oluşan boylam hatası; "hata-2 (enlem)", kaskat kontrollü motor tahriği ile yörünge takibinde oluşan enlem hatası; "hata-2 (boylam)", kaskat kontrollü motor tahriği ile yörünge takibinde oluşan boylam hatasını göstermektedir. İKA modeli düşük çözünürlüklü GPS benzetim modeli sebebiyle bozulan rotada hedefe belirli bir hata ile ulaşmaktadır. Geliştirilen modelde düşük çözünürlüklü GPS verisi modellendiği için ortaya çıkan hata yörüngeden kaçıklığa sebep olmaktadır. Aynı problemlerin gerçek zamanlı çalışma esnasında ortaya çıkmasını engellemek için yüksek maliyetli GPS sensörü kullanmak ya da düşük maliyetli GPS'den alınan verilerin iyileştirilmesi gerekmektedir. Buna karşılık önerilen moment-pozisyon karşılaştırma metodu ile kaymadan kaynaklı kaçıklıklar azaltılmıştır.

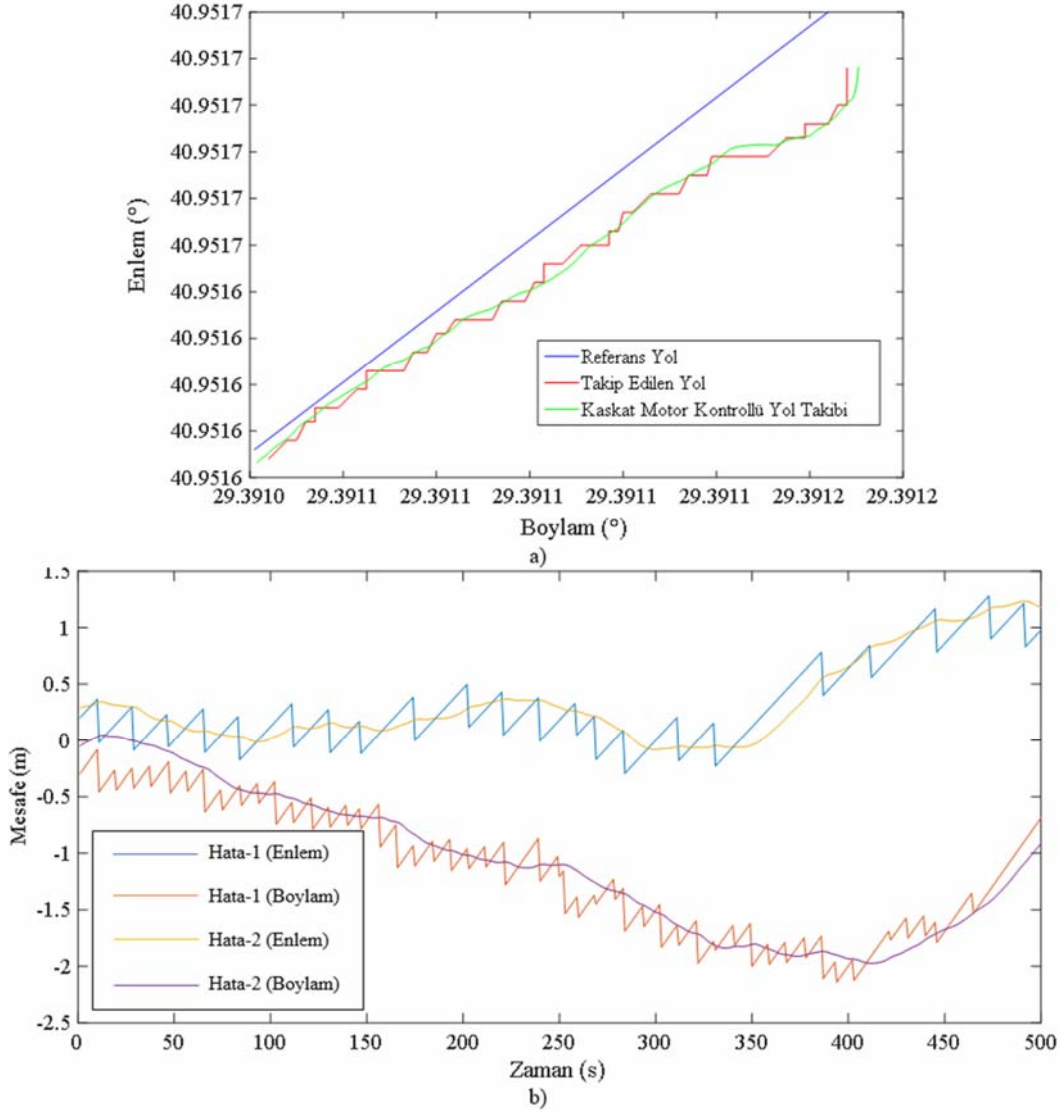
3. SENSÖR VERİLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNE YÖNELİK FİLTRE TASARIMI (FILTER DESIGN FOR DESIGN IMPROVING SENSOR DATA)

İKA'da kullanılan lazer tarayıcı (lidar), radar, GPS, IMU gibi sensörlerin robotun işleyişindeki işlevlerini arttırmak adına kullanılan filtrelerin çözümlüklerini arttırmak hem sensör füzyonu hem de hareket kabiliyetinin artırılması açısından önemlidir [20]. Yapılan çalışmada sensör çözünürlüğünü arttırmak, anlamlı verileri çoğaltmak ve anlamsız verileri ayıklamak için tekil filtreler ve hibrit filtreler uygulanmış, performansları benzetim ortamında ve gerçek zamanlı olarak test edilmiştir.

Literatürde benzer yaklaşımla sensör verilerinin iyileştirilmesine yönelik oldukça karmaşık filtre yapılarına rastlanmaktadır [21]. Ancak bu filtreler hem işlem yoğunluğunu arttırmakta hem de eyleyicilerin cevap süresini geciktirmektedir. Bu sebeple kullanılan filtreler işlemcinin yükünü sınırlı ölçüde arttıracak biçimde ve basit yapıda tercih edilmiştir. Kullanılan filtreler "Hareketli Ortalama Filtre (MAF)", Üstel Ağırlıklı Hareketli Ortalama Filtre (EWMAF)", "Basitleştirilmiş Tek Boyutlu Kalman Filtre (SKF)", En Küçük Kareler Yaklaşımı prensipli filtre (LMS), "Eğrisel En Küçük Kareler Yaklaşımı prensipli filtre (LMSQ)" yapısında seçilmiş ve bu filtrelerin hibrit kullanımı ile verimlilikleri arttırılmıştır. Basit yapısı ve kolay uygulanması, sensör uygulamalarında sıklıkla tercih edilen MAF'ın kullanım alanı oldukça geniştir [22]. İKA'da düşük geçirgenlik özelliği ve kazanç kat sayısının bir olmasından dolayı GPS sensöründen gelen verileri filtrelemede MAF kullanılmıştır [23]. Bu filtreleme sayesinde veriler üzerindeki gürültüler azaltılmış daha akıcı bir veri seti elde edilmiştir. Ayrık sinyaller için çıkış Eş. 13 gibi olup; y , çıkış sinyali, x , giriş sinyali ve M , hareketli ortalama için kullanılacak nokta sayısıdır.

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x[n+k] \quad (13)$$

EWMAF ise özelleştirilmiş bir hareketli ortalama filtre olup, MAF'dan başlıca farkı son giren verinin çıkıştaki ağırlığı en



Şekil 4. Benzetim sonuçları a) referans yol ve yörünge takibi b) enlem ve boylama indirgenmiş hata gösterimi
(Simulation results (a) reference way and trajectory tracking (b) error representation reduced to latitude and longitude)

fazla, ilk giren verinin ise en az olacak şekilde üstel değişmesidir. Standart hareketli ortalama filtre bütün girdilerin çıkıştaki ağırlığı olurken üstel ağırlıklı hareketli ortalama ise bu ifade belirli bir kaideye göre dağıtılmaktadır [24]. Değişken ağırlığı en son alınan verinin ağırlığını arttırdığından, EWMAF verideki ufak değişimlere daha hızlı tepki verebilmek için radar ve lazer sensöründe tercih edilmiştir. EWMAF fark eşitliği Eş. 14’de görüldüğü gibi uygulanmış ve ağırlığı temsil eden α ise Eş. 15’de görüldüğü gibi hesaplanmıştır.

$$y[n] = \sum_{k=0}^{M-1} \alpha(k)x[n+k] \quad (14)$$

$$\alpha(k) = (1 - \beta)\beta^k \quad (15)$$

Kalman filtresi temelde elde edilen verileri, kontrol, tahmin ifadeleri ve parametreleriyle gürültüyü azaltarak akıcılaştırmaktadır. “Basitleştirilmiş Tek Boyutlu Kalman

Filtre (SKF)” ise bu filtrenin karmaşıklığından arındırılmış halidir. Basitleştirilmiş Kalman filtresinin tahmin eşitliğinde EWMAF çıkışının, sensörden gelen son veri ile karşılaştırılmasıyla hesaplanan hata katsayısı ve önceki girdilerin birbirleriyle karşılaştırılması yapılmıştır. α_i , tahminde bulunulan değeri temsil etmektedir ve Eş. 16 gibi hesaplanmaktadır. Ayrıca, k_i , tahmin değerinin sonucu etkileme kat sayısı olup Eş. 18’de görüldüğü gibi hesaplanmıştır. Eşitlikte yer alan p_i değeri k_i değerinin hesaplanmasında kullanılmakta ve Eş. 17’de elde edilişi gösterilmektedir ve bir sonraki adım için yeni p_{i+1} değeri Eş. 20 gibi hesaplanmaktadır. Eş. 17’de yer alan z , düzeltme sabitini ifade etmektedir.

$$\alpha_i = y[i-1] + \frac{(y[i-1]-y[i-2])}{2} + E(i) \quad (0,28) \quad (16)$$

$$p_i = p_{i-1} + z \quad (17)$$

$$k_i = p_i / (p_i + r) \quad (18)$$

$$y[i] = \alpha_i + k_i(x[i] - \alpha_i) \quad (19)$$

$$p_{i+1} = (1 - k)p_i \quad (20)$$

Benzer şekilde “En Küçük Kareler Yaklaşımı (LMS)” esasına dayanan filtreler basit matematik yapıları ve hassas olmayan sinyallerdeki düzeltici yapıları nedeniyle kullanılmaktadır [25]. Buna karşılık “Eğrisel En Küçük Kareler Yaklaşımı (LMSQ)” esasına dayanan filtreler ise hata türev yaklaşımlarından dolayı LMS’ye göre daha karmaşık matematiğe sahiptirler ancak hata oranları daha düşüktür. Yapılan çalışmada doğrusal yaklaşımda GPS sensöründen gelen iki ardışık sinyal çiftler halinde konum ve zaman değişkeni olarak atanmıştır. Bu sinyaller Eş. 21’de belirtildiği gibi, (zaman, konum) fonksiyonları olarak dikkate alınmaktadır.

$$\{(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), (X_n, Y_n)\} = (X_i, Y_i) = \text{(zaman, konum)} \quad (21)$$

Zaman değişkenine bağlı olarak gelen konum bilgisi Eş. 22 gibi düzenlenmektedir. Burada a kesim noktasını belirtmekte, b ise regresyon çizgisinin eğimine bağlı olmaktadır.

$$\hat{Y} = a + bX \quad (22)$$

LMS yöntemi (Y_i) ile tahmini (\hat{Y}_i) kareleri arasındaki farkın minimize edilmesi esasına dayanmaktadır. Minimize edilme esası Eş. 23’de gösterilmektedir.

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum_{i=1}^N [Y_i - (a + bX_i)]^2 \quad (23)$$

Eş. 23’de yer alan ε , toplam hata miktarını göstermektedir. Kullanılan diğer bir yöntem olan LMSQ yaklaşımında ise

hata türev yaklaşımından ötürü daha da hassas olarak ölçüm yapılmakta ve ε minimuma indirgenmektedir. Sistemde birden fazla değişken var ise çözüm a ve b değişkenleri için Eş. 24 ve Eş. 25 ile elde edilmektedir.

$$\frac{d\varepsilon}{da} = 2Na + 2b \sum_{i=1}^N X_i - 2 \sum_{i=1}^N Y_i = 0 \quad (24)$$

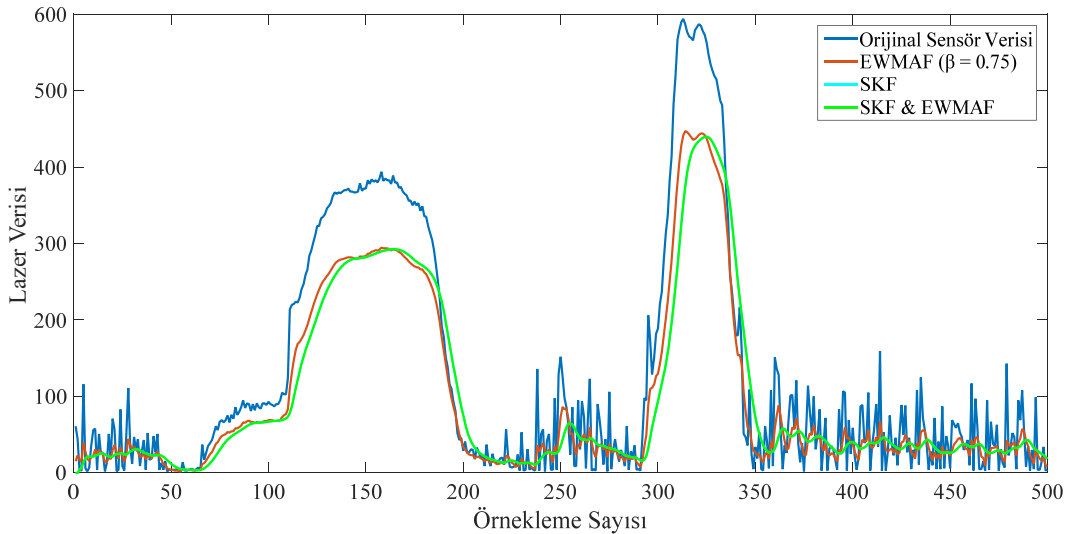
$$\frac{d\varepsilon}{db} = 2b \sum_{i=1}^N X_i^2 + 2a \sum_{i=1}^N Y_i - 2 \sum_{i=1}^N Y_i X_i = 0 \quad (25)$$

Eş. 24 ve Eş. 25’in a ve b değişkenleri için çözülmesiyle Eş. 26 ve Eş. 27 sonuçlarına ulaşılmaktadır. Benzetim çalışmalarında GPS sensör verileri açıklanan metot ile doğrusallaştırılmış ve ideal konum tahminine göre doğrusal olarak elde edilmiştir.

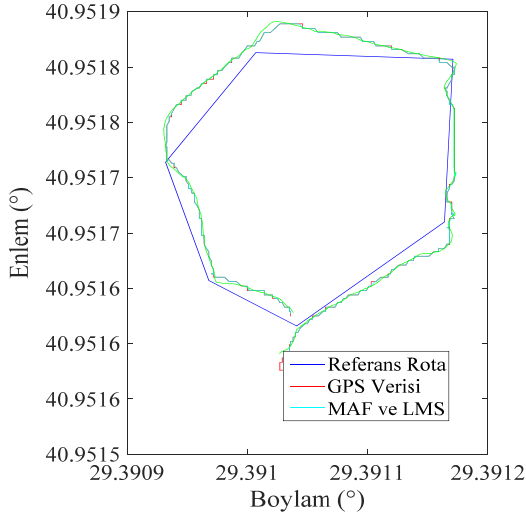
$$a = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i}{N} - b \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} = M_y - bM_x \quad (26)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i X_i - M_y \sum_{i=1}^N X_i}{\sum_{i=1}^N X_i^2 - M_x \sum_{i=1}^N X_i} \quad (27)$$

Filtrelerin tekil kullanımlarına ek olarak sonuçları iyileştirmek amacıyla hibrit yapılar oluşturulmuştur. MAF filtresine ek olarak karşılaştırma için bu filtrenin çıkışına sırasıyla LMS ve LMSQ prensipli filtreler uygulanmıştır. Eklenen bu algoritmalar sayesinde filtre derecesini arttırmadan yeterli performansta sonuçlar elde edilmiştir. Ek olarak karşılaştırmak için filtrenin çıkışına SKF eklenerek başka bir hibrit filtre yapısı geliştirilmiştir. Bir diğer yaklaşımda lazer ve radar sensörlerinden gelen veriler EWMAF filtresinden sonra SKF’den geçmektedir. İKA üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda hibrit filtrelerin daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8’de gösterilmektedir. Şekil 5’de lidar sensöründen gelen tekil bir veri için sırasıyla üstel ağırlıklı hareketli ortalama ve SKF’den geçirilerek test edilmiştir.



Şekil 5. Lazer sensörü verilerinin filtrelenmesi (Filtering of laser sensor data)

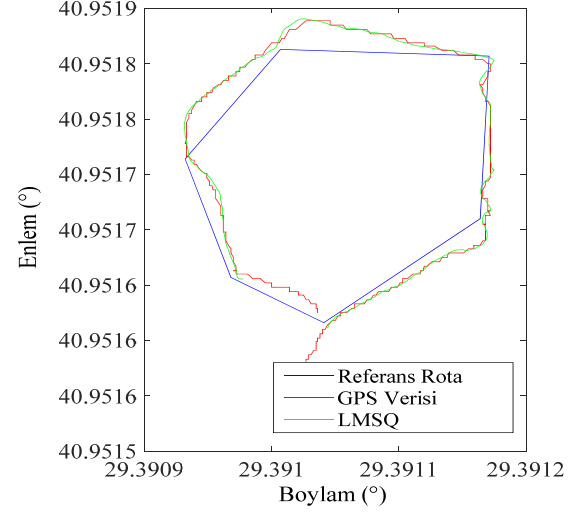


Şekil 6. MAF ve LMS hibrit filtre uygulama analizi (Analysis of MAF and LMS hybrid filters application)

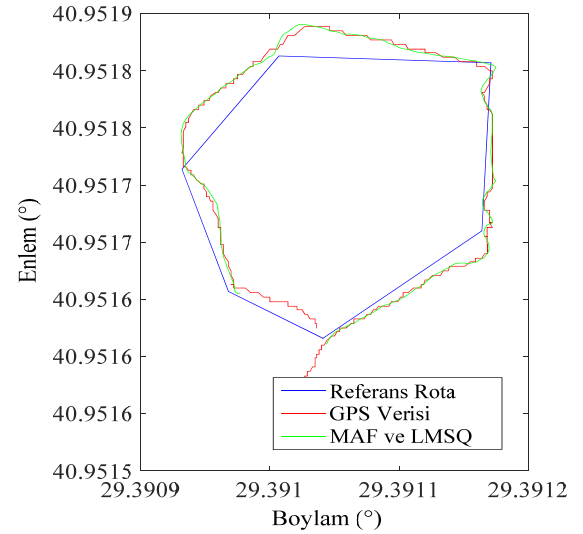
GPS sensöründen gelen veriler iki ayrı hibrit filtreyle test edilmiş ve ilk hibrit filtrede veriler sırasıyla hareketli ortalama ve küçük kareler yaklaşımı esaslı filtreden geçirilerek işlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 6'da gösterilmektedir. İkinci filtrede ise veriler eğrisel küçük kareler yaklaşımı esaslı filtreden geçirilerek test edilmiştir. Ayrıca GPS sensöründen gelen veriler küçük kareler yaklaşımı esaslı filtreden geçirildikten sonra GPS sensöründen gelen verilerdeki sapmaların doğrusallaştığı gözlemlenmiştir. GPS sensöründen gelen veriler sırasıyla hareketli ortalama ve küçük kareler yaklaşımı esaslı filtreden geçirildikten sonra, GPS sensöründen gelen verilerdeki gürültü ve hassasiyet limitlerinden dolayı olan sapmalar azalmış bunun etkisi olarak da daha doğrusal bir sonuç elde edilmiştir. Şekil 7'de GPS sensörüne LMSQ filtresi uygulanmış sonuçlara yer verilmektedir. Buna ek olarak hibrit filtre yapısı oluşturmak için Şekil 7'de gösterilen sonuçlara ait deneyde MAF ve LMSQ birlikte uygulanmıştır. Burada GPS sensöründen gelen veriler sırasıyla hareketli ortalama ve eğrisel küçük kareler yaklaşımı esaslı filtreden geçirildikten sonra, GPS sensöründen gelen verilerdeki gürültü ve hassasiyet limitlerinden dolayı olan sapmalar azalmış bunun etkisi olarak da küçük kareler yaklaşımına göre daha doğrusal bir sonuç elde edilmiştir.

GPS sensöründen gelen verilerin filtrelenmesi sonucunda temelde donanımsal olarak var olan GPS hassasiyeti yazılımsal olarak artırılmış ve bunun yanında GPS sensörü verilerindeki sapmalardan dolayı gerçekleşen İKA'nın davranışsal aykırılıkları, sapmalar doğrusallaştırıldığı için indirgenmiş ve bu aykırılıklar giderildiği için İKA daha akıcı yol alabilmiştir. Kullanılan hibrit filtreler bu sapmayı basit yöntemlerle azaltabilmekte ve İKA'nın açık alanda yörünge takibi kabiliyetini arttırmaktadır. Lidar sensöründe ise SKF filtresi tek başına kullanıldığında akıcılığı arttırmış ve gürültüyü azaltarak özellikle donanımsal aykırılıkları ayıklamakta etkili olmuştur. Özellikle İKA hareketi sırasında ortaya çıkan titreme ve kaymadan kaynaklı sensör verilerinin

anlık yükselişi ve gürültüleri EWMAF ile minimuma indirgenmiştir. Bu sayede sadece gerçek engeller algılandığında işlenen verinin eşik değerini aşması sağlanmıştır. Böylelikle çukur, taş ve parke gibi etkenlerden dolayı oluşan titremeler minimuma indirgenerek, lidarın zemini engel olarak tanıması engellenmiştir.



Şekil 7. Karesel LMS filtresi uygulama analizi (Analysis of quadratic LMS filter application)



Şekil 8. Karesel LMS ve MAF hibrit filtresi uygulama analizi (Analysis of quadratic LMS and MAF hybrid filter application)

4. EŞ ZAMANLI KONUM BELİRLEME VE HARİTALAMA (SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING)

Yörünge planlaması ve seyrüsefer için İKA'nın konumunun doğru kestirilmesi, çevresinin ne kadar hassasiyetle algılandığına bağlıdır. Bu hassasiyeti arttırmak ya da daha az algılayıcı ile daha kapsamlı bir kestirim yapabilmek için literatür de oldukça fazla sayıda çalışma bulunmaktadır [26].

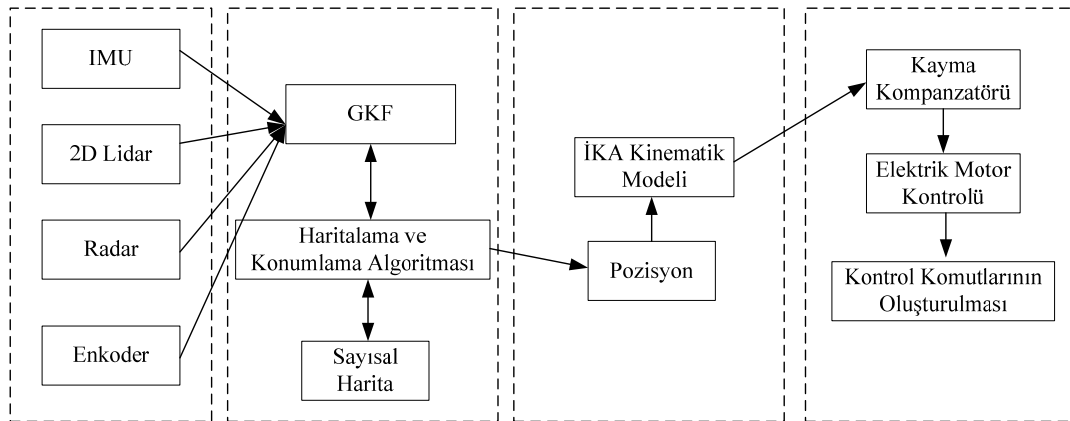
Bu çalışmalar çoğunlukla etrafın haritasının elde edilmesi ve İKA pozisyonunun belirlenmesi başlıklarını birlikte ele almaktadır [27]. Bunun en önemli sebebi robotun kendi konumunu belirleyebilmesi için gezindiği ortamın ve etrafındaki statik ve dinamik nesnelerin konumunu bilmesi gerekliliğidir [28]. Çünkü İKA harita oluşturmada küresel koordinat sisteminden farklı olarak dünya yerine robot merkezli bir koordinat sistemi oluşturmaktadır [29].

İKA'nın GPS'den bağımsız olarak konumlama yapabilmesi ve etrafını tanımlayabilmesi üzerine yapılan çalışmalar çoğunlukla hesaplama yükünü azaltma, veri ilişkilendirme, sensör hassasiyetini artırma, nesnelerin asimetrik yapıda olmasından kaynaklı problemlerin giderilmesi, harita boyutunun sürekli büyümesi ve ölçüm gürültülerinin giderilmesi olarak sıralanmaktadır [30]. [31]'de iç ortamda ve GPS sinyalinin olmadığı durumlarda konumlama yönelik çok katlı bir ortamda parçacık filtresi tabanlı üç boyutlu haritalama yapılmıştır. Önerilen metod ile haritalama sırasında ortaya çıkan hataları azaltmaya yönelik kompanzasyon algoritması geliştirilmiştir. [15]'de ise görme esaslı paralel izleme algoritması, bilinmeyen bir ortamda seyri yapılabilmek için önerilmektedir. [32]'de kablosuz alıcılar yardımıyla iç ortamda konumlama yapılmıştır. [33]'de grafik tabanlı EZKBH yapılmaktadır. Önerilen metod yüksek performanslı ve kapasiteli işlemciye ihtiyaç duymaktadır. Klasik bilinen metodların aksine son yıllarda farklı yaklaşımlar ile yapılan EZKBH çalışmalarına ise sıklıkla rastlanmaktadır. [34]'de bilinmeyen bir ortamın tanımlanması için yapay sıcaklık gradyanı yöntemi önerilmektedir. [35]'de ise ortamın manyetik alan ölçümüne dayalı iç mekân haritalandırması yapılmıştır. [36]'da monoküler EZKBH, [37]'de RGB-D EZKBH, [38]'de FastSLAM, [39]'de HectorSLAM algoritmaları kullanılarak EZKBH yapılmaktadır. HectorSLAM algoritmasının diğer 2D SLAM algoritmalarına karşın en önemli avantajı gerçek zamanlı uygulamalarda verilerin yüksek hızlı güncellenmesi, çok-boyutlu şekillerin yüksek başarımlı tespiti ve odometrik verilere ihtiyaç duymamasıdır [39]. Yapılan çalışmada kullanılan HectorSLAM algoritmasında lidar, odometri, IMU ve radar sensörleri bütünleştirilerek, özellikle hareketli ve çok boyutlu nesnelerin harita içerisindeki yerleri daha yüksek çözünürlükte tespit edilmektedir [39]. Böylelikle

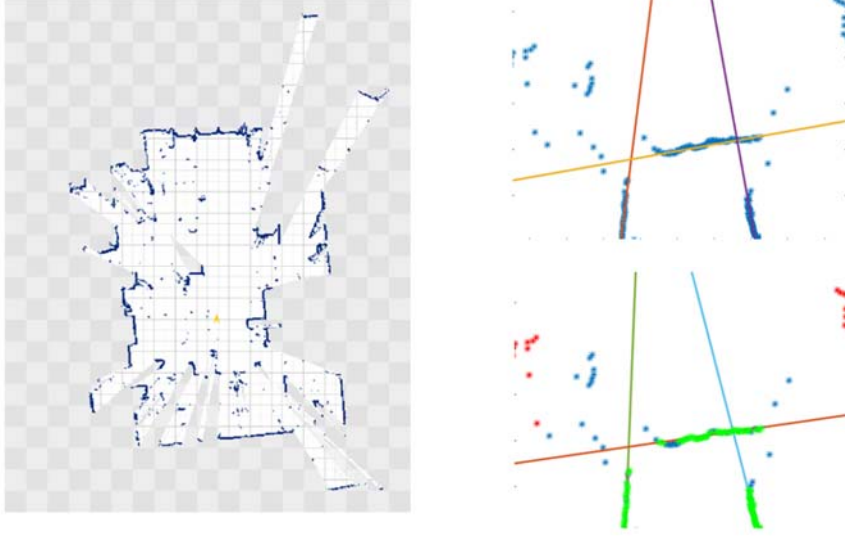
HectorSLAM'in hassasiyet dezavantajı, algoritmaya RADAR ve IMU verilerinin eklenmesiyle giderilmiştir. Ek olarak, diğer metodlardan monoküler EZKBH [36] ve RGBD EZKBH [37] algoritmalarında derinlikli kamera ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Ancak yapılan çalışmada EZKBH algoritmasında 3B kamera yerine düşük maliyetli 2D lidar tercih edilmiştir. FastSLAM algoritması ise HectorSLAM'a göre daha kesin sonuçlar üretmekte ancak daha yoğun CPU kullanması sebebiyle tercih edilmemiştir [38]. EZKBH algoritmalarında yaygın olarak en sık kullanılan metod ise Genişletilmiş Kalman Filtresi (GKF) ve parçacık filtresine dayanan metodlardır [40]. Bunun en önemli sebebi hareket ve ölçüm verilerinin kesin olmaması sebebiyle haritalamada olasılıksal yöntemlerin öne çıkmasıdır [41]. Geliştirilen İKA'da robot konumunun belirlenmesi odometrik veriler, lidar ve radar ölçümleri ile harita bilgilerinin birleştirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. EZKBH algoritmasında başlangıç noktası koordinat ekseninin orijini olarak kabul edilmektedir. Bu başlangıç noktası kesin olarak bilinmemektedir [39, 42]. GKF tabanlı EZKBH temelinde İKA konumu ve işaretçi nesnelerin konumunun birleştirilmesiyle oluşan ayrı zamanlı büyüyen durum vektörü bulunmaktadır [42]. Burada konum bilgileri kesin bilgiler içermemekte ve modellerden ve gürültülerden gelen belirsizliklere sahiptir. GKF-EZKBH algoritmasının elde edilmesinde en kritik nokta imgelerin elde edilmesidir. Bu imgelerin bir filtre aracılığıyla birleştirilmesi gerekmektedir. Şekil 9'da geliştirilen İKA'da kullanılan EZKBH algoritması gösterilmektedir. Bu algoritmanın uygulanması ile elde edilen deney sonuçlarına Şekil 10'da yer verilmiştir. Kullanılan metod HectorSLAM algoritması tabanlı olup ek olarak radar sensör verilerinin de GKF içerisinde parametre olarak kullanılmasından dolayı daha iyi sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

5. OTONOM SÜRÜŞ KABİLİYETİ GELİŞTİRME VE DENEYSEL SONUÇLAR (DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS DRIVING ABILITY AND EXPERIMENTAL RESULTS)

İKA'ya otonom sürüş kabiliyetleri kazandırmak için takip edilmesi istenen yolun sayısal haritası ve İKA'nın bulunduğu konumu veren anlık ve hassas GPS ölçümlerine ihtiyaç



Şekil 9. EZKBH algoritma akış diyagramı (SLAM algorithm flow chart)



Şekil 10. İç mekan imge ve harita çıkarımı (Indoor marker extraction and mapping)

vardır. İKA'nın kendi rotasında kalabilmesi ve önündeki rotanın özelliklerini algılayabilmesi gerekmektedir [43]. Bu kabiliyetleri kazanabilmek için sadece GPS verileri yeterli olmamaktadır [44]. Çünkü iç ortam, hava koşulları, etraftaki binalar gibi sebepler ile GPS sinyalinin olmadığı ortamlarda İKA'nın konumunu kaybetmemesi gerekmektedir [45]. Bu sebeple İKA'da var olan enkoder ve IMU verileri ile GPS verileri denetlenmektedir. Böylelikle otonom sürüş esnasında açık ortamda olası veri kaybı sensör füzyonuyla engellenmekte ve olası hata durumları denetlenebilmektedir.

Otonom sürüş esnasında İKA'nın belirlenen varış noktasına en uygun yol güzergâhını tespit edip planlayarak, hedefe doğru kontrollü bir şekilde ulaşması beklenmektedir. Bilindiği gibi gerçek düzlemde çevresel öğeler durağan halde değildir ve rota üzerinde engellerin pozisyonu sürekli değişmektedir. Özellikle trafik ve hava durumundan doğrudan etkilenen insansız otomobiller için yol güzergâhı belirleme ve engellerden sakınma için daha karmaşık algoritmalar gerekmektedir [3, 4]. Trafik şartlarında kullanılan İKA'lar da kullanılan algoritmalarda sollama ve kaçış manevraları, engelin ya da diğer aracın belirli bir zaman içerisinde hangi istikamette ne kadar hızda gideceğini tahmin edecek şekilde akışa sahiptir. Bu tip İKA'lar da düşük maliyetli sensörlere ek olarak üç boyutlu lidar ve kısa, orta ve menzilli radarlar kullanılmaktadır. Otomobillerin aksine insansız mobil robotlarda direksiyon kontrolü yerine tekerlekler ile dönüş geometrisine uyum sağlayan bir yapının olması takip kararlılığını arttırmaktadır [46]. Dönüş geometrisi dışında bu kararlılığı etkileyen faktörlerin başında enerji tüketimi, kayma, yol koşulları gelmektedir. Deneylerde algılanan statik ve dinamik engellerin zaman içerisinde göreceli hareketi, tahmini rotası ve sapma miktarı dikkate alınarak, İKA'nın hız ve rota profili belirlenmektedir. Geliştirilen İKA trafik şartlarında kullanılmadığı için ve sensör maliyetini düşük tutabilmek için engeller iki boyutlu bir lidar ile algılanmaktadır. Engel aşımında kullanılan algoritmada İKA'nın engellere paralel

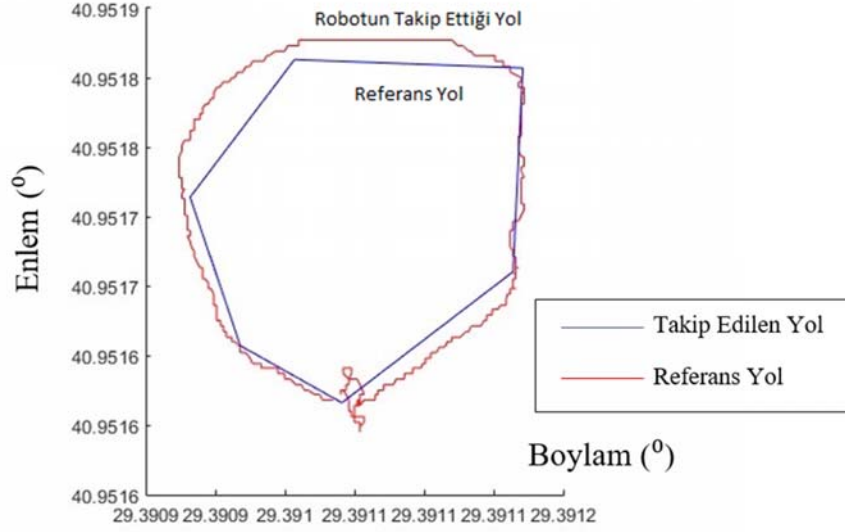
gidecek şekilde rotasına (x,y) ekseninde güvenli bir pay eklenerek güvenli bir sürüş gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Şekil 11 ve Şekil 12'de otonom sürüş engelli bir ortamda test edilmiştir. Burada İKA tam otonom olarak değil altı ayrı referans noktaya erişerek seyrüsefer yapmıştır. İKA, hedef noktalara kendi belirlediği en kısa yoldan ve engelleri aşarak varmaya çalışmıştır. Hedef noktaya varma onayını verdiği zaman bir sonraki hedefe doğru en kısa yolu belirleyerek seyrüsefere devam etmektedir.

5.1. Yol Arama Algoritması Geliştirme (Path Searching Algorithm Development)

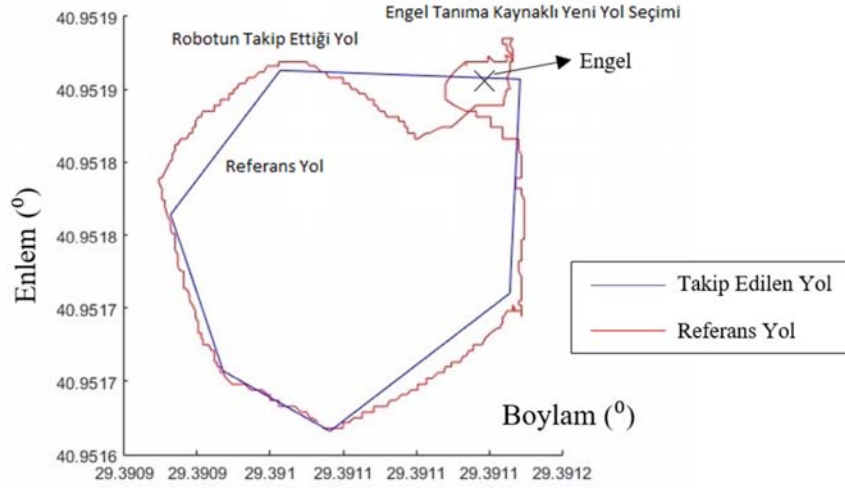
Geliştirilen İKA'da hem basit olması hem de yaygın kullanımından dolayı yol arama algoritmaları arasından A^* yol arama algoritması kullanılmaktadır [47]. A^* yol arama algoritması sezgisel bir metot olup [48] tanımlanan İKA ve çevresel parametrelerin kesinliğine göre faydalı sonuçlar vermektedir [49]. A^* arama algoritması Eş. 28'de görüldüğü gibi ifade edilebilmektedir. Eş. 28'de, n , bir düğüm noktası olmak üzere sezgisel fonksiyon $f(n)$ ile gösterilmektedir. İKA'da kullanılan yol arama ve takip algoritmasında batarya deşarj süresi ve hava şartları gibi faktörler ihmal edilerek kullanılan algoritmanın maliyet fonksiyonları azaltılmıştır.

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (28)$$

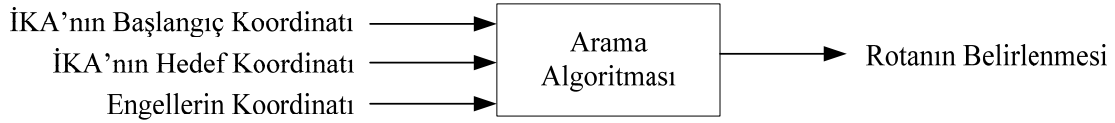
Eş. 28'de $g(n)$, başlangıç düğümünden n düğümüne varmak için gerekli olan maliyet, $h(n)$, n düğümünden hedefe varmak için gerekli olan maliyeti belirtmektedir. A^* arama algoritmasında her işlemde $f(n)$ değeri en düşük komşu düğüm tercih edilmektedir. Bir sonraki adımda güncellenmiş maliyet fonksiyonlarına göre arama devam etmekte ve bu işlem düğümler bitene kadar devam etmektedir. Metodun sezgisel olmasının sebebi $h(n)$ fonksiyonu ile gidilecek bir sonraki mesafenin tahmin edilmesidir [47, 50]. Şekil 13'de kullanılan arama algoritmasına ait akış şeması gösterilmektedir. Bu akışın benzetimi Şekil 14'de görülen



Şekil 11. Yol takip test sonucu (Path tracking test result)



Şekil 12. Engelli yol takip test sonucu (Path tracking with obstacles test results)



Şekil 13. Sezgisel arama algoritmasının akış prensibi (Heuristic searching algorithm flow chart)

sayısal harita üzerinde koşturulmuş ve engellerin ağırlık değerleri dikkate alınarak hedef noktaya ulaşmak için gerekli olan yörünge anlık belirlenmiştir.

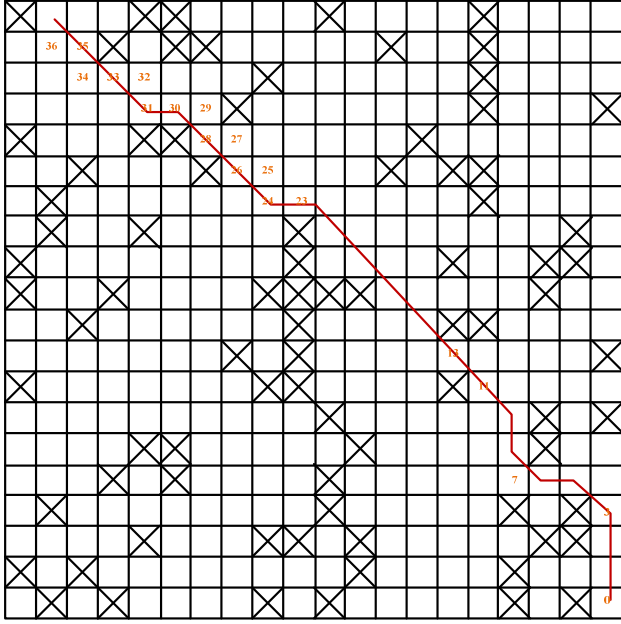
Geliştirilen İKA'da sezgisel hesaplama Öklid uzaklığı yöntemi ile yapılmaktadır. Öklid uzaklığı yöntemi dışında yaygın kullanılan Mahalanobis, Manhattan ve Chebyshev uzaklık yöntemleri bulunmaktadır [51]. Bunlardan kimisi mesafe yaklaşımının aksine benzerlik ya da özellik tabanlı olabilmekte ve kullanım alanına göre getirdiği avantaja göre tercih edilebilmektedir [52]. Mekanum tekerleklerin getirdiği avantajlara sahip İKA'nın Öklid mesafesi 1968

yöntemine daha uygun olduğu düşünüldüğünden yapılan çalışmada Öklid mesafe yöntemi kullanılmıştır. Mesafe yönteminin temel prensibi Şekil 15'de gösterilmekte ve Öklid uzaklığı tarafından hedef noktanın yarıçapı Eş. 29'da görüldüğü gibi elde edilmektedir.

$$r^* = \sqrt{(x - x^*)^2 + (y - y^*)^2} \quad (29)$$

Eşitlikte görüldüğü gibi mevcut düğümden hedef düğüme olan yatay ve dikey uzaklıkların karelerinin toplamının karekökü alınarak hesaplama yapılmıştır. Rotanın yönünün değişimi Eş. 30'da görüldüğü gibi hesaplanmaktadır. Ayrıca

elde edilen açı bilgisine göre mekanum tekerleklerin dönüş algoritması araç kinematik hesaplarına göre yapılmaktadır.

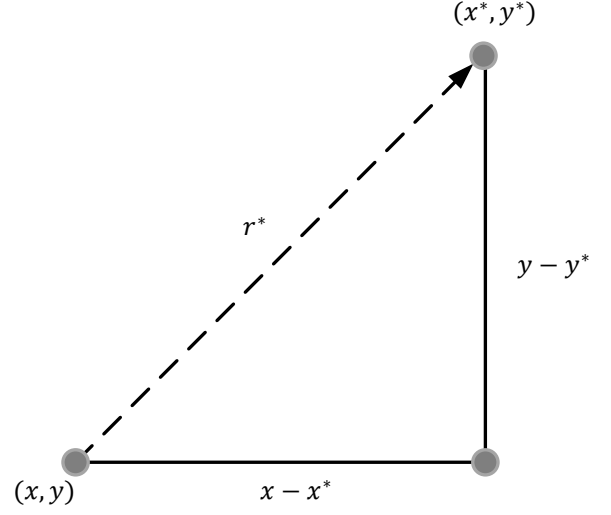


Şekil 14. A* arama algoritması benzetim sonucu
(A* searching algorithm simulation result)

$$\Delta\theta = \text{atan2}(y' - y^*, x' - x^*) - \text{atan2}(y - y^*, x - x^*) \quad (30)$$

$$\Delta\text{mesafe} = r_t \cdot \Delta\theta \quad (31)$$

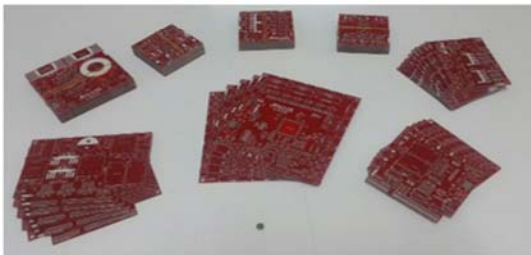
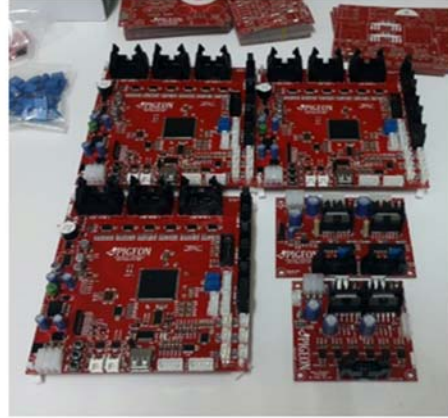
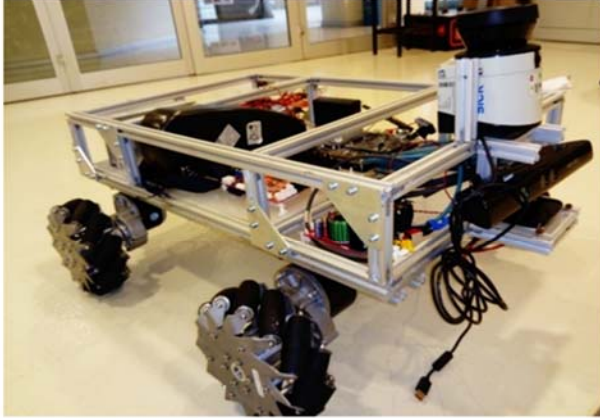
Eş. 30'dan elde edilen açı bilgisine göre gidilmesi gereken mesafenin uzaklığı Eş. 31'de görüldüğü gibi belirlenebilmekte ve kat edilen mesafe enkoder verileri ile ölçülmekte, güzergâhta oluşan sapmalar hesaplanmaktadır.



Şekil 15. Öklid uzaklığının hesaplanması
(Euclidian distance calculation)

5.2. Deneysel Çalışmalar (Experimental Results)

Tasarlanan ve imal edilen İKA önerilen algoritmalar, benzetim çalışmaları ve modül halinde yapılan gerçek zamanlı deneyler sonucunda tam otonom testler için hazır

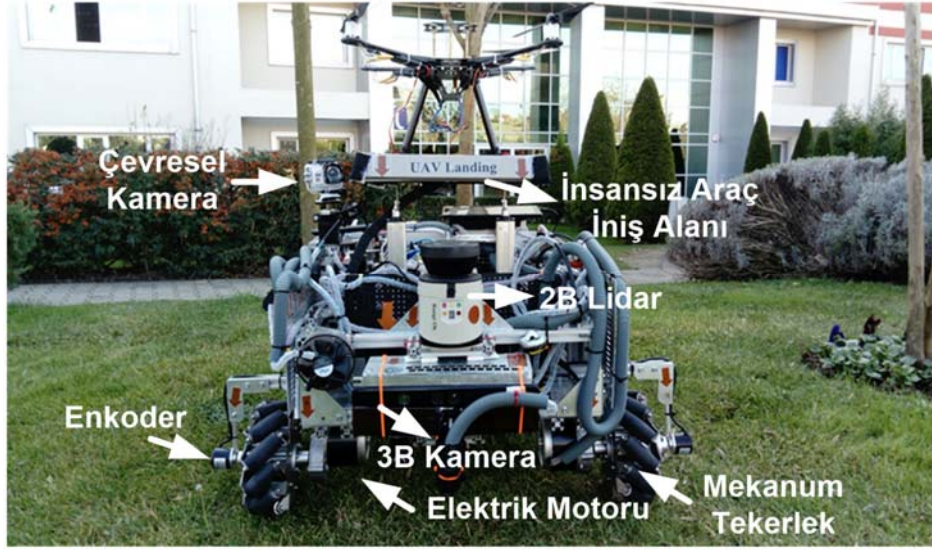


Şekil 16. Sistemin bileşenlerinin gösterimi (Representation of system components)

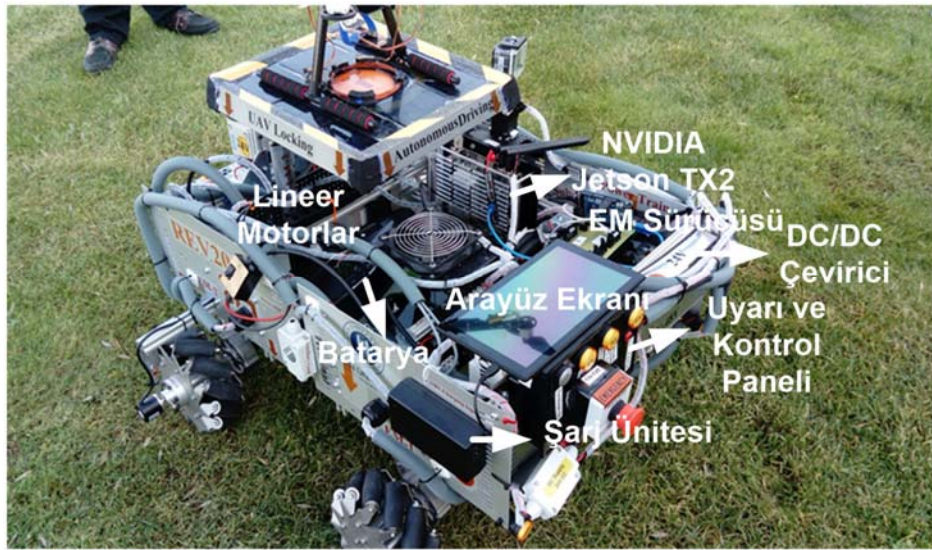
hale getirilmiştir. İKA üzerinde yer alan elektronik kartların geliştirilme aşamaları, yerleşimi, batarya modülü ve ilk prototipi Şekil 16'da gösterilmektedir. Geliştirilen İKA'nın son hali ise Şekil 17 ve Şekil 18'de gösterilmektedir. İKA'nın konum bilgisini denetlemek için İKA'da *Xsense GPS/INS* sensörü, çevresel tanıma için ise *SICK LMS111* lidar sensörü kullanılmaktadır. Çevresel tanıma ve sensör füzyonu için kullanılan algoritmalar üst seviye kontrolör olarak *Nvidia Jetson TX2* üzerinde çalıştırılmıştır. İşlemci verileri hem bulut sunucu üzerinde hem de sahip olduğu dâhili hafıza kartı üzerinde depolanmış ve İKA 3G ile uzaktan izlenmiş, anlık veriler takip edilerek kabiliyetlerde ve algoritmalarda iyileştirmeler yapılmıştır. İKA'nın tahriği için 350 W gücünde dört adet PMDC (Sürekli Mıknatıslı DC) motor kullanılmaktadır. Yüksüz ağırlığı yaklaşık 72 kg olan İKA'da güç elektroniği ve itki sistemleri ise *TMS320F28335* ile kontrol edilmiştir. İKA içi haberleşme

ise CAN haberleşme hattı üzerinden sağlanmıştır. Ayrıca uzaktan izleme ve ani duruş algoritmalarında düşük maliyetli bir RGBD kamera kullanılmıştır. İKA'nın enerji ihtiyacı Li-ion piller ve batarya yönetim sistemi ile karşılanmaktadır. Geliştirilen dinamik modellemeler sonucunda hesaplanan moment ve güç değerleri neticesinde 30 Ah'lık batarya, 30-45 dk arası İKA'nın insansız sürüşü sürdürmesine imkân tanımaktadır.

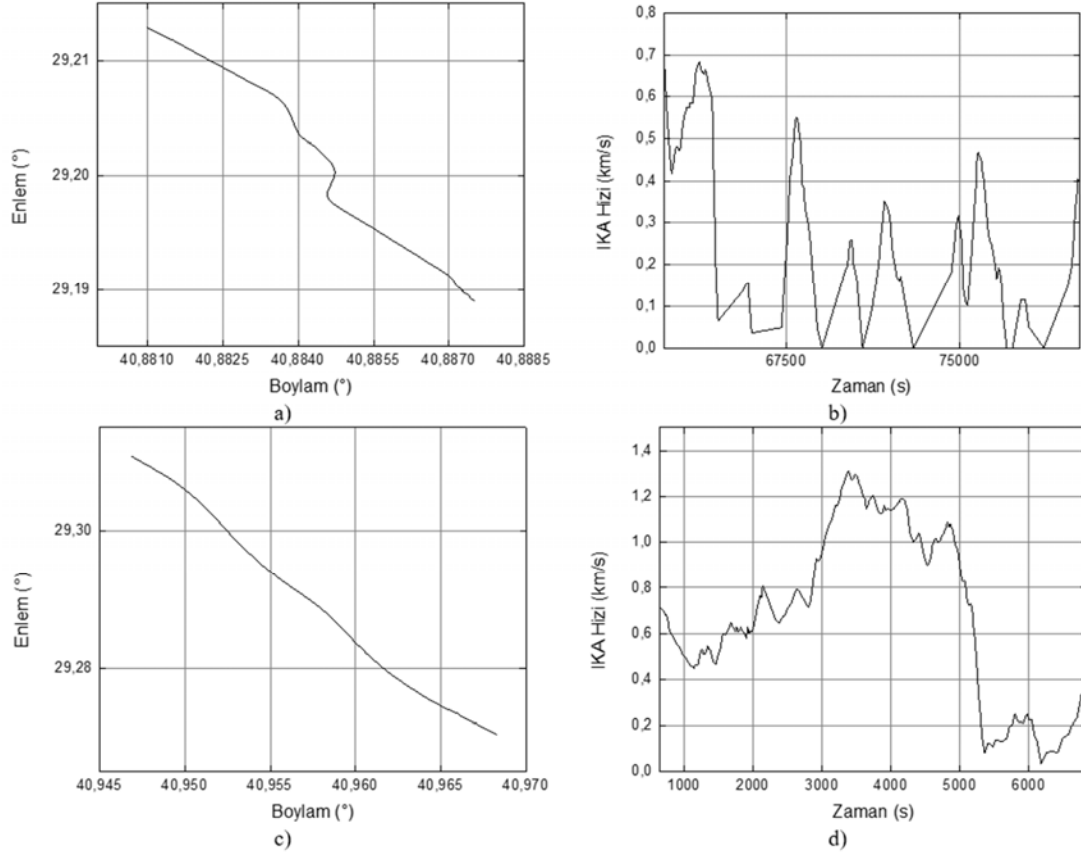
Yapılan deneylerde bir insansız aracın sahip olması gereken yol takip, yol arama, yön kararı verme ve haritalandırma yeteneklerinin tamamı test edilmiştir. Deneylerde maksimum 2 km/h hızda İKA'nın ilerlemesine müsaade edilmiştir. Gerçekleştirilen açık alan seyrüseferine ait sonuçlar Şekil 19'da gösterilmektedir. Şekil 19a ve Şekil 19c'de iki farklı rotada gerçekleştirilen otonom sürüş, Şekil 19b ve Şekil 19d'de ise sırasıyla bu sürüşlere ait hız



Şekil 17. Geliştirilen çok yönlü İKA'nın önden görünüşü (front view of the developed multi-directional UGV)



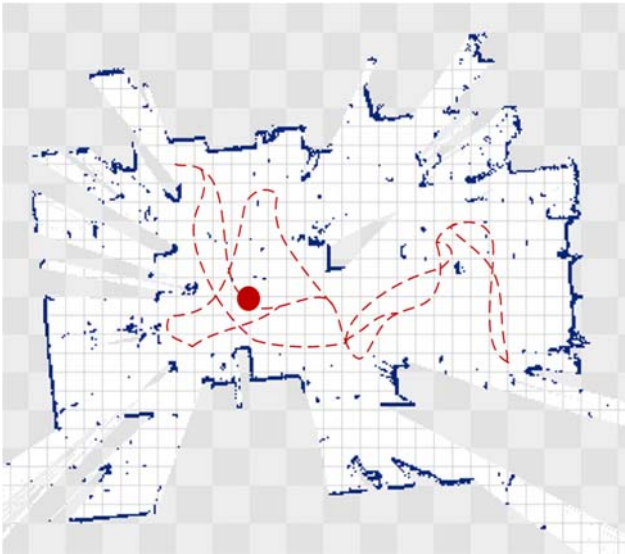
Şekil 18. Geliştirilen çok yönlü İKA'nın görünüşü (View of the developed multi-directional UGV)



Şekil 19. Otonom sürüş deney sonuçları a) senaryo-1 rotası b) senaryo-1 İKA hız değişimi c) senaryo-2 rotası d) senaryo-1 İKA hız değişimi

(Autonomous driving test results (a) scenario-1 route (b) scenario-1 UGV speed variation (c) scenario-2 route (d) scenario-2 UGV speed variation)

değişimleri gösterilmiştir. Açık alan çalışmalarına ek olarak Şekil 20’de ise kapalı ortamda GPS bilgisi olmadan EZKBH yöntemi kullanılarak ortamın haritası çıkartılmış ve tanımlanan hedefe İKA’nın ilerleme rotası gösterilmiştir.



Şekil 20. Kapalı alan otonom sürüş test sonucu (Indoor autonomous driving test result)

9. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Malzeme, sensör, eyleyici teknolojisinin hızlı gelişimi ve fiyatlarının hızla düşmesi sebebiyle insansız kara araçlarının endüstriyel uygulamaları ortaya çıkmaya başlamıştır. Özellikle sensör ve görüntü işleme teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte sensörlerin dezavantajları ortadan kalkmakta ve teknolojik kısıttan kaynaklı sorunların çözümü hız kazanmaktadır. Bu durumun bir başka önemli sebebi ise elektrikli araç teknolojisinin belirli ölçüde doyuma ulaşması sebebiyle araştırma ve geliştirme firmaları ile üretici firmaların çalışmalarını insansız araçlara odaklamaya başlamasıdır. Bu sebepler ile yapılan çalışmada birçok sensör modülüne sahip, performansı iyileştirilebilir bir İKA platformu tasarlanmış, yapılan benzetim ve deneysel çalışmalar ile performansı ölçülerek çalışmada sunulmuştur. Özellikle tasarım aşamaları, karşılaşılan zorluklar ve bunların çözüm yolları ile birlikte detaylı bir literatür analizine çalışmada yer verilmiştir. Yapılan çalışma ile elde edilen bulgular, ileriye yönelik insansız kara aracı çalışmalarını bekleyen tehdit ve fırsatların belirlenmesine olanak sağlamıştır. Çalışmalar ve literatür taraması sırasında öngörülen tehditler, veri işleme yetersizliği, haritaların birleştirilememesi, dinamik ortamlarda çalışmadan kaynaklı ortaya çıkan gürültülerin yeteri kadar filtrelenememesi iken öngörülen fırsatlar sırasıyla büyük veri analizi, derin

öğrenme algoritmalarının kullanımının yaygınlaşması, bulut sunucuların kabiliyetlerinin artması ve yüksek hesaplama gücüne sahip işlemcilerin fiyatlarında yaşanan düşüşler olarak belirlenmiştir. Çalışmalar ve literatür taraması sırasında öngörülen tehditler ve fırsatlar dikkate alınarak, İKA'nın elde ettiği haritaları yüksek çözünürlükte birleştirebilmek için bulut tabanlı harita saklama, işleme ve sezgisel metot tabanlı genetik yol arama yöntemlerinin kullanılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Ayrıca daha gelişmiş bir EZKBH algoritması geliştirebilmek için lidar sensörüne ek olarak RGBD kamera kullanımı önemli bir ihtiyaç olarak görülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 215E364 proje numarası ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Bacik J., Durovsky F., Biro M., Kyslan K., Perdukova D., Padmanaban S., Pathfinder—development of automated guided vehicle for hospital logistics, *IEEE Access*, 5, 26892-26900, 2017.
2. Luettel T., Himmelsbach M., Wuensche H., Autonomous ground vehicles: concepts and a path to the future, *Proc. IEEE*, 100, 1831-1839, 2012.
3. Dickmanns E.D., Developing the sense of vision for autonomous road vehicles at UniBwM, *Computer*, 50 (12), 24-31, 2017.
4. Bimbraw K., Autonomous cars: Past, Present and Future a review of the Developments in the Last Century, the Present Scenario and the Expected Future of Autonomous Vehicle Technology, 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Colmar, France, 21-23 July 2015.
5. Maxwell P., Larkin D., Lowrance C., Turning remote-controlled military systems into autonomous force multipliers, *IEEE Potentials*, 32 (6), 39-43, 2013.
6. Weiskircher T., Wang Q., Ayalew B., Predictive guidance and control framework for (semi-) autonomous vehicles in public traffic, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 25 (6), 2034-2046, 2017.
7. Young S.H., Mazzuchi T.A., Sarkani S., A framework for predicting future system performance in autonomous unmanned ground vehicles, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, 47 (7), 1192-1206, 2017.
8. Karlsson R., Gustafsson F., The future of automotive localization algorithms: available, reliable, and scalable localization: anywhere and anytime, *IEEE Signal Process Mag.*, 34 (2), 60-69, 2017.
9. Broggi A., Buzzoni M., Debattisti S., Grisleri P., Laghi M.C., Medici P., Versari P., Extensive tests of autonomous driving technologies, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 14 (3), 1403-1415, 2013.
10. Kilic A., Kapucu S., Design and construction of a modular reconfigurable robot module OMNIMO, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (3), 521-530, 2016.
11. Viboonchaicheep P., Shimada A., Kosaka Y., Position Rectification Control for Mecanum Wheeled Omni-Directional Vehicles, The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Roanoke, VA, USA, 2-6 Nov. 2003.
12. Abouzahir M., Elouardi A., Latif R., Bouaziz S., Tajer A., Embedding SLAM algorithms: has it come of age?, *Robotics and Autonomous Systems, Rob. Auton. Syst.*, 100, 14-26, 2018.
13. Akkaya A.E., Talu M.F., Extended kalman filter based IMU sensor fusion application for leakage position detection in water pipelines, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (4), 1393-1404, 2017.
14. Aoyama M., Computing for the next-generation automobile, *Computer*, 45 (6), 32-37, 2012.
15. Silva O.D., Mann G.K.I., Gosine R.G., An ultrasonic and vision-based relative positioning sensor for multirobot localization, *IEEE Sens. J.*, 15 (3), 1716-1726, 2015.
16. Wyglinski A.M., Huang X., Padir T., Lai L., Eisenbarth T.R., Venkatasubramanian K., Security of autonomous systems employing embedded computing and sensors, *IEEE Micro*, 33 (1), 80-86, 2013.
17. Tsai C.C., Wu H.L., Nonsingular Terminal Sliding Control Using Fuzzy Wavelet Networks for Mecanum Wheeled Omni-Directional Vehicles, *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Barcelona, Spain, 18-23 July 2010.
18. Tlale N., Villiers M.D., Kinematics and Dynamics Modelling of a Mecanum Wheeled Mobile Platform, 15th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, Auckland, New Zealand, 2-4 Dec. 2008.
19. Zhao D., Deng X., Yi J., Motion and internal force control for omnidirectional wheeled mobile robots, *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, 14 (3), 382-387, 2009.
20. Atila B., Mungan T.E., Kivanc O.C., Different Filter Approaches and Performance Analysis of Fundamental Sensors in Autonomous Ground Vehicles, 24th Signal Processing and Communication Application Conference, Zonguldak, Turkey, 16-19 May 2016.
21. Gomez-Gil J., Ruiz-Gonzalez R., Alonso-Garcia S., Gomez-Gil F.J., A kalman filter implementation for precision improvement in low-cost GPS positioning of tractors, *Sensors*, 13 (11), 15307-15323, 2013.
22. Hidayat A.A., Arief Z., Happyanto D.C., Mobile Application With Simple Moving Average Filtering for Monitoring Finger Muscles Therapy of Post-Stroke People, *International Electronics Symposium*, Surabaya, Indonesia, 29-30 Sept. 2015.
23. Hui X.F., Wu Y.J., Research on Simple Moving Average Trading System Based on SVM, *International Conference on Management Science and Engineering*, Dallas, TX, USA, 20-22 Sept. 2012.
24. Demosthenous P., Nicolaou, N., Georgiou J., A Hardware-Efficient Lowpass Filter Design for

- Biomedical Applications, IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference, Paphos, Cyprus, 3-5 Nov. 2010.
25. Widrow B., Adaptive filters, *Aspects Netw. Syst. Theory*, 563-586, 1971.
 26. Bresson G., Alsayed Z., Yu L., Glaser S., Simultaneous localization and mapping: a survey of current trends in autonomous driving, *IEEE Trans. Intell. Veh.*, 2 (3), 194-220, 2017.
 27. Cadena C., Carlone L., Carrillo H., Latif Y., Scaramuzza D., Neira J., Reid I., Leonard J.J., Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: toward the robust-perception age, *IEEE Trans. Rob.*, 32 (6), 1309-1332, 2016.
 28. Temeltas H., Kavak D., SLAM for robot navigation, *IEEE A&E Syst. Mag.*, 23 (12), 16-19, 2008.
 29. Karaoguz H., Erkent Ö., Bayram H., Bozma I., Tek robottan çoklu robotlara ortam haritalama, *EMO Bilimsel Dergi*, 2 (4), 105-118, 2012.
 30. Khan S., Wollherr D., Buss M., Modeling laser intensities for simultaneous localization and mapping, *IEEE Rob. Autom. Lett.*, 1 (2), 692-699, 2016.
 31. Shen S., Michael N., Kumar V., Obtaining liftoff indoors: autonomous navigation in confined indoor environments, *IEEE Rob. Autom. Mag.*, 20 (4), 40-48, 2013.
 32. Wang J., Zhang X., Gao Q., Ma X., Feng X., Wang H., Device-free simultaneous wireless localization and activity recognition with wavelet feature, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 66 (2), 1659-1669, 2017.
 33. Dine A., Elouardi A., Vincke B., Bouaziz S., Graph-based simultaneous localization and mapping: computational complexity reduction on a multicore heterogeneous architecture, *IEEE Rob. Autom. Mag.*, 23 (4), 160-173, 2016.
 34. Golan Y., Edelman S., Shapiro A., Rimon E., Online robot navigation using continuously updated artificial temperature gradients, *IEEE Rob. Autom. Lett.*, 2 (3), 1280-1287, 2017.
 35. Wang X., Zhang C., Liu F., Dong Y., Xu X., Exponentially weighted particle filter for simultaneous localization and mapping based on magnetic field measurements, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 66 (7), 1658-1667, 2017.
 36. Shiozaki T., Dissanayake G., Eliminating scale drift in monocular SLAM using depth from defocus, *IEEE Rob. Autom. Lett.*, 3 (1), 581-587, 2018.
 37. Sun Q., Yuan J., Zhang X., Sun F., RGB-D SLAM in indoor environments with STING-based plane feature extraction, *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, PP (99), 2017.
 38. Santos J.M., Portugal D., Rocha R.P., An Evaluation of 2D SLAM Techniques Available in Robot Operating System, *IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics*, Linköping, Sweden, 21-26 Oct. 2013.
 39. Kohlbrecher S., Stryk O.V., Meyer J., Klingauf U., A Flexible and Scalable SLAM System With Full 3D Motion Estimation, *IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics*, Kyoto, Japan, 1-5 Nov. 2011.
 40. Duymaz E., Oguz A.E., Temeltas H., Particle flow filter as a novel state estimation method for simultaneous localization and mapping problem, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (4), 1255-1270, 2017.
 41. Karamat T.B., Lins R.G., Givigi S.N., Noureldin A., Novel EKF-based vision/inertial system integration for improved navigation, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 67 (1), 116-125, 2018.
 42. Huang S., Dissanayake G., Convergence and consistency analysis for extended kalman filter based SLAM, *IEEE Trans. Rob.*, 23 (5), 1036-1049, 2007.
 43. Hu C., Wang R., Yan F., Chen N., Output constraint control on path following of four-wheel independently actuated autonomous ground vehicles, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 65 (6), 4033-4043, 2016.
 44. Hajjaji A.E., Bentalba S., Fuzzy path tracking control for automatic steering of vehicles, *Rob. Auton. Syst.*, 43 (4), 203-213, 2003.
 45. Lenain R., Thuilot B., Cariou C., Martinet P., High accuracy path tracking for vehicles in presence of sliding: Application to farm vehicle automatic guidance for agricultural tasks, *Auton. Robot.*, 21 (1), 79-97, 2006.
 46. Wang R., Hu C., Yan F., Chadli M., Composite nonlinear feedback control for path following of four-wheel independently actuated autonomous ground vehicles, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 17 (7), 2063-2074, 2016.
 47. Yoon S., Yoon S.E., Lee U., Shim D.H., Recursive path planning using reduced states for car-like vehicles on grid maps, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 16 (5), 2797-2813, 2015.
 48. Wang Y., Li X., Ruiz R., An exact algorithm for the shortest path problem with position-based learning effects, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, 47 (11), 3037-3049, 2017.
 49. Lin M., Yuan K., Shi C., Wang Y., Path Planning of Mobile Robot Based on Improved A* Algorithm, 29th Chinese Control And Decision Conference, Chongqing, China, 28-30 May 2017.
 50. Silva J.B.B., Siebra C.A., Nascimento T.P., A New Cost Function Heuristic Applied to A* Based Path Planning in Static and Dynamic Environments, 12th Latin American Robotics Symposium, Uberlandia, Brazil, 29-31 Oct. 2015.
 51. Ozguner U., Acarman T., Redmill K., Autonomous Ground Vehicles, *Artech Theory*, 201-215, 2011.
 52. Ge S.S., Lewis F.L., *Autonomous Mobile Robots: Sensing, Control, Decision Making and Applications*, Taylor & Francis Group, 2006.

