



## Path following of an unmanned ground vehicle with GPS feedback using model predictive control method

Atilla Bayram<sup>1\*</sup> , Mehmet Nuri Almalı<sup>2</sup> , Firas Muhammad Al-Naqshbandi<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, VAN Yüzüncü Yıl University, 65080 Van, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Electrical and Electronics Engineering, Engineering Faculty, VAN Yüzüncü Yıl University, 65080 Van, Türkiye

<sup>3</sup>Building & Construction Department, Erbil Polytechnic University, Erbil, Iraq

### Highlights:

- Design of unmanned ground vehicle
- Kinematic model of car-like mobile robots
- Path following of mobile robots by model predictive control

### Keywords:

- Unmanned ground vehicle
- Global positional system
- Path following
- Model predictive control

### Article Info:

Research Article

Received: 17.11.2021

Accepted: 06.02.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1024463

### Acknowledgement:

This work has been supported by Van Yüzüncü Yıl University Scientific Research Projects Coordination Unit under grant number FBA-2016-5062.

### Correspondence:

Author: Atilla Bayram  
e-mail:  
atillabayram@yyu.edu.tr  
phone: +90 537 337 2942

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, path following control of an unmanned ground vehicle shown in Figure A is presented. The measurement unit of this autonomous vehicle prototyped for such tasks RTK-GPS, an inertial measurement unit and an absolute encoder to accurately define the pose of the car. A model predictive control was proposed for the path following of the mobile robot based on the linearized and discretized kinematic model. This paper includes both simulation and real-time experimental studies.



Figure A. Unmanned ground vehicle used in this study

### Purpose:

The aim of the study is the path following control of a UGV using MPC method based on the RTK-GPS and IMU feedback.

### Theory and Methods:

A model predictive control was proposed for the path following of the mobile robot based on the successive linearized and discretized kinematic model. This optimal control method performs on the lowest positional and orientational errors with respect to a virtual vehicle that is considered to move flawlessly on a given reference path and the smoother steering angle. This paper includes both simulation and real-time experimental studies.

### Results:

Despite the physical constraints on the vehicle prototype, the simulation and experimental results show that position and orientation errors keep in satisfactory limits in the different path following operations of the UGV. In particular, the fact that the steering angle is not subjected to excessive oscillations indicates that the control method achieved a good performance in steering the UGV.

### Conclusion:

In path following of a UGV, MPC method gave successful results in both simulation experimental tests. Especially in terms of regular steering angle and burden of calculation time, the applicability of this method has been proven.



## Bir insansız kara aracının model öngörü kontrol metodu ile GPS tabanlı yol takibi

Atila Bayram<sup>1\*</sup>, Mehmet Nuri Almalı<sup>2</sup>, Firas Muhammad Al-Naqshbandi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 65080 Van

<sup>2</sup>Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 65080 Van

<sup>3</sup>Erbil Politeknik Üniversitesi, Bina ve Yapı Mühendisliği Bölümü, Erbil Irak

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Bir insansız kara aracının tasarımı
- Ön teker yönlendirmeli mobil robotun kinematik modeli
- Model öngörülü kontrol metoduyla mobil robotların yol takibi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 17.11.2021

Kabul: 06.02.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1024463

### Anahtar Kelimeler:

İnsansız kara aracı, gerçek araç modelli mobil robot, yol takip kontrolü, gerçek zamanlı küresel yer belirleme sistemi, ataletsel ölçme ünitesi, model öngörülü kontrol

### ÖZ

Bu makalede prototip tasarımı yapılmış olan bir insansız kara aracının yol takip kontrolü konum ve yönelim hata geri beslemesine dayalı olarak sunulmuştur. Bu otonom aracın konum ve yönelimini doğru bir şekilde tanımlamak için aracın ölçme ünitesi gerçek zamanlı küresel yer belirleme sistemi (RTK-GPS), ataletsel ölçme ünitesi (IMU) ve mutlak enkoder sensörlerini içermektedir. Mobil robotun yörünge takibi için ardışık olarak doğrusallaştırılmış ve ayrıklaştırılmış kinematik bir modele dayalı model öngörülü kontrol kullanılmıştır. Bu optimal kontrol metodu verilen bir yol referansı üzerinde hatasız bir şekilde hareket ettiği kabul edilen holonomik olmayan sanal bir araca göre oluşan en küçük konum ve yönelim hatalarına ek olarak en düşük direksiyon açısının elde edilmesi üzerine işlevini gerçekleştirmektedir. Burada takip edilen yollar bir sayısal haritalama programından elde edilen kontrol noktaları ile oluşturulan rasyonel temelli eğriler (spline) veya bilindik geometrik eğriler ile tanımlanmaktadır. Bu makale hem benzetim hem de gerçek zamanlı deneysel test çalışmalarını içermektedir. Elde edilen sonuçlar aracın tasarım performansı ve kontrol stratejisi yönünden irdelenmiştir. Gerçek araç prototipi üzerindeki fiziksel sınırlamalara rağmen konum ve yönelim hatalarının makul sınırlar içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle direksiyon açısının aşırı bir salınımına maruz kalmaması kullanılan kontrol metodunun iyi bir performans gösterdiğini ifade etmektedir.

## Path following of an unmanned ground vehicle with GPS feedback using model predictive control method

### H I G H L I G H T S

- Design of unmanned ground vehicle
- Kinematic model of car-like mobile robots
- Path following of mobile robots by model predictive control

### Article Info

Research Article

Received: 17.11.2021

Accepted: 06.02.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1024463

### Keywords:

Unmanned ground vehicle, car-like mobile robot, path following control, real-time global positioning system, inertial measurement unit, model predictive control

### ABSTRACT

In this paper, path following control of an unmanned ground vehicle is presented based on the feedback of position and orientation errors. The measurement unit of this autonomous vehicle prototyped for such tasks contains a real-time kinematic global positioning system (RTK-GPS), an inertial measurement unit (IMU) and an absolute encoder to accurately define the position and orientation of the car. A model predictive control was proposed for the path following of the mobile robot based on the successive linearized and discretized kinematic model. This optimal control method performs on the lowest position and orientation errors with respect to a non-holonomic virtual vehicle that is considered to move flawlessly on a given reference path and the smoother steering angle. The paths followed here are defined by rationally based splines or known geometric curves created with control points from a digital mapping program. This paper includes both simulation and real-time experimental studies. The outcomes were examined in terms of the design performance and control strategy of the vehicle. Despite the physical constraints on the vehicle prototype, it has been observed that position and orientation errors occur within satisfactory limits. In particular, the fact that the steering angle is not subjected to excessive oscillations indicates that the control method has a good performance.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*atillabayram@yyu.edu.tr, mna1@yyu.edu.tr, firas.saib@epu.edu.iq /  
Tel: +90 537 337 2942

## 1. Giriş (Introduction)

Navigasyon teknolojisinin gelişmesiyle otonom insansız kara araçları (İKA) günümüzde üzerinde çalışılan önemli bir alan haline gelmiştir. Bu araçlar tarımda toprak işleme ve hasat [1], endüstriyel tesisler, büyük depolar ve hava alanlarında yük ve yolcu taşıma [2, 3], savunma sanayinde bomba imha ve güvenlik [4] ve uzay keşif araştırmaları [5] gibi birçok alanda hali hazırda kullanılmaktadır. Otonom kara araçları fiziksel ortamı algılayan, belirlenen görevleri yerine getirmek için karar verebilen ve bu amaçlar doğrultusunda kendi kendine hareket edebilme yeteneğine sahip olan araçlardır. Dış ortam insansız kara araçları kendilerine tanımlanan navigasyon işlemlerini doğru bir şekilde yerine getirmek ve aynı zamanda çevresiyle etkileşimde olmak için bir takım sensörler içermektedirler. Bunlar arasında en çok kullanılanı GPS, IMU, enkoder ve görsel algılama cihazlarıdır. Bu sensörler ile mobil robotların konum, yönelim ve hız bilgileri anlık olarak elde edilerek geri besleme ile hareketlerinin hassas bir şekilde yapılması sağlanmaktadır. Kıvanç vd. [6] çalışmalarında bina içi ve bina dışı alanlarda haritalandırma ve yol takibi üzerine bir insansız araç geliştirmişlerdir. Bu araç üzerinde düşük hassasiyetli bir GPS, IMU, enkoder ve lazer tarayıcı verileri SLAM algoritması ile birleştirilip otonom harekete sahip olan bir İKA ortaya konmuştur. Frekans ve zaman senkronizasyonunun GPS ile sağlandığı bir çalışmada ise yazılım tabanlı radyo teknolojileri kullanılarak hava hedeflerinin tespiti için bir pasif radar sistemi geliştirilmiştir [7]. Dış ortamlarda hareket eden bir aracın konumlaması ve navigasyon uygulamaları için yerel bir yer istasyonuna sahip diferansiyel GPS (DGPS) ve diğer araç sensörleri başka bir mobil robot çalışmasında kullanılmıştır. Bu amaç için DGPS'in yanında enkoder, jiroskop gibi sensör bilgileri daha hassas bir ölçüm için genişletilmiş Kalman filtresi kullanılarak birleştirilmiştir [8].

Bir mobil robot için verilen bir referans yörüngesinin takip edilmesi, tanımlı bir yolun izlenmesi ve nokta kararlılığı tanımlı olan kontrol problemleri olarak ele alınmaktadır [9]. Burada tanımlanan görevlerde en çok karşımıza çıkan yörünge izleme (trajectory tracking) ve yol izleme (path following) kavramlarıdır. Yörünge izlemede amaç aracın zamana bağlı olarak önceden tanımlı rotaları araç hızı ve yönelimini ayarlayarak takip etmesidir [10, 11]. Yol takibinde ise amaç aracı tanımlı olan yola mümkün olduğunca yakın tutmaya çalışmaktır. Yol takip kontrolcüsü burada kendine tanımlanan konumda zamanı hesaba katmaz. Yani bu makalenin konusu da olan yol takip kontrol problemi zamandan bağımsızdır.

Mobil robotların yol takip kontrolü klasik ve yapay zeka tabanlı kontrolcüler olarak iki kategoride incelenebilir. PID, kayan kip kontrol metodu (SMC), geri adım, Lyapunov tabanlı kontrolcüler klasik kontrolcü sınıfında incelenirken bulanık mantık kontrolcü (FLC), yapay sinir ağı (NN), görüntü işleme tabanlı kontrolcüler ise yapay zeka kontrolcü grubu içinde ele alınmaktadır. Jin ve Tack [12] çalışmalarında uyarlamalı PID kontrolcüyü bir mobil robotun yol takip probleminde kullanmışlardır. Metotta kontrol kuralı Lyapunov kararlılık teorisine dayalı olarak oluşturulup sabit kazançlı PID kontrolcü holonomik olmayan kinematik mobil robot modeline uygulanmıştır. Diğer bir metotta ise SMC bir otonom aracın yol takibinde kullanılmıştır. Solea ve Nunes [13] bir otonom aracın hem yol takibi hem de yörünge takibi üzerine yaptıkları çalışmada araç için oluşan yanıl konum ve yönelim açısı hatalarını bir kayama yüzeyinde birleştirmişlerdir. Hataların sifıra yaklaşımını sağlayan bu kayma yüzeyi ile hızlı ve gürbüz bir sistem cevabı veren SMC kontrolcü önerilmiştir. Geri adım kontrolcü ise Lyapunov fonksiyonu gibi bir aday fonksiyona dayalı olarak doğrusal olmayan dinamik bir sistemin tasarımı ve kararlılığı için bir metottur. Ortaya konan bir çalışmada diferansiyel olarak sürülen bir mobil robotun asimptotik olarak yol takibini gerçekleştirmek için böyle bir metot uyarlamalı bulanık

mantık kontrolcü ile birleştirilerek kullanılmıştır [14]. Yapay zeka ile ilgili yol takip kontrol metotları insanın hareket ve davranışlarını taklit etmeye çalışmaktadırlar. Özellikle klasik kontrol sistemlerinin karışık olduğu ve tasarımlarının fazlaca zaman ve çaba gerektiği yerlerde bu metotların daha kullanışlı ve etkin olduğu görülmektedir. Bu çalışmaların başında bulanık mantık kontrolcüler gelmektedir [14-16]. Almayyahi vd. [15] bulanık çıkarım sistemini (FIS) dinamik ortamda bir insansız kara aracının hareket kontrolünde kullanmışlardır. İki kontrolcüden oluşan bu sistemde birinci kontrolcü sensörlere dayalı olarak sağ, sol ve önden gelen engellerden kaçarken ikinci kontrolcü en iyi rota için aracın yönelimini ayarlamaktadır. Hedefe ulaşmak için her iki kontrol aşaması FIS'i kullanmaktadır. Diğer bir çalışmada ise gerçek zamanlı yol planlama ve yol takibi kamera bilgisine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir [16]. Burada robotu istenilen yol üzerinde tutmak için PD-kontrolcüyü benzer şekilde dağıtılmış FLC kullanılmıştır. Diğer bir kapalı çevrim kontrol için yapay zeka kontrollü sinir ağı (NN) uygulamalarıdır. Çok katmanlı bir NN'nin öğrenme kapasitesi mobil robotlarda birçok navigasyon problemine uygulanmıştır. Bilinmeyen dinamikler ve giriş doyumunun varlığı altında uyarlamalı yapay sinir ağı yapısı sonlu zamanlı bir tahminleyici kontrol metodu insansız bir su üstü aracının yol takibi için sunulmuştur [17]. Singh ve Parhi [18] gerçek zamanlı olarak dinamik bir ortamda hareket eden otonom bir mobil robot için çok katmanlı ileri beslemeli bir sinir ağı kullanan akıllı bir kontrolcü tasarımı önermişlerdir. Çevrim içi video kamerası ile alınan görüntülerin referans görüntülerle karşılaştırılma sonucunda tanımlanan robot hareketi üzerine yapay zeka tabanlı çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmalardan birinde duruş tabanlı ve görüntü tabanlı iki görüntü-servo kontrolcü dış ortamda bir mobil robotun daha önceden yer üzerine çizilmiş yola yaklaşmasını ve takibini sağlamaktadır [19]. Burada görüntü almak için sabit bir pinhole kamera kullanılmıştır.

Mobil robotların yol takip kontrol metotlarından biride model öngörülü kontrol (MPC) metodudur. Bu metot her ne kadar yeni olmasa da kontrol alanında diğer standart kontrolcülere kıyasla çok etkin ileri bir kontrol yöntemi sunmaktadır. Önceleri bu metot yavaş, sınırlı ve çok değişkenli sistemleri içeren endüstriyel proseslerde geniş bir şekilde kullanılırken [20, 21] işlemci hızının artması ve etkili sayısal algoritmaların gelişimi ile birçok dinamik sistem kontrolünde kullanılmaya başlanmıştır [22-24]. Zhao vd. [22] MPC metodunu dron olarak isimlendirdiğimiz insansız bir hava aracının yörünge takibinde (trajectory tracking) kullanırlarken, Dai vd. [23] endüstriyel robot uygulamalarında ve Klauco vd. [24] manyetik kaldırma (levitasyon) sisteminin gerçek zamanlı kontrolünde kullanmışlardır. Bu sistemler doğrusal olmayıp hızlı dinamiklere sahip ve çok fazla çevrim içi hesaplamaya ihtiyaç duymaktadırlar. MPC metodunda bir öngörü ufku boyunca optimal bir çözüm aranması ve hesaplama yükü olumsuzluğunun gelişen bilgisayar teknolojisi ile ortadan kaldırılmasından dolayı metot mobil robot navigasyon problemlerinde de yakın zamanda bir odak haline gelmiştir. Kühne vd. [25] ve Lages vd. [26] kısa öngörü ufkuna sahip sistemlerin doğrusal zaman değişken tanımlamaları ile MPC'nin gerçek zamanlı uygulamalar da dahil olmak üzere sistemlerin kontrolünde kullanılabileceğini göstermişlerdir. Bu çalışmalarda bir iç mekan mobil robotun yörünge izleme işlemini lineer olmayan MPC (NMPC) ile kontrolünün yanında ardışık doğrusallaştırma yaklaşımı ile lineer olmayan problem kuadratik programlama problemine dönüştürülerek gerçek zamanlı uygulamalarda kullanıldığı ifade edilmiştir. Böylelikle bu metodun düşük hesaplama yükü ile etkin bir kontrol işlemi sunulmuştur. Diğer bir MPC metodu ile bir otonom aracın yol takibi gerçek bir araç üzerinde yüksek hızlarda gerçekleştirilmiştir [27]. Bu çalışmada, değişen yol koşulları ve küçük açı varsayımlarının neden olduğu model uyumsuzluğu ölçülebilir bir bozulma şeklinde hesaba katılmıştır. İleri hız ayarlaması ile engellerden kaçınan bir

diferansiyel tekerlek tahrikli mobil robotun yol takip kontrolü MPC ile yapılmıştır [28]. Motor sürücüsü sensörlerden gelen bilgilere göre araç ivmesini azaltarak engellerden kaçınırken direksiyon açısı ayarlaması ile de istenilen yolu takip etmektedir.

Bu makalede tasarlanmış ve üretimi gerçekleştirilmiş bir insansız kara aracının yol takip kontrolü sunulmuştur. İnsansız aracın yol takip kontrolünde ardışık doğrusallaştırma yaklaşımı kullanılarak elde edilen kinematik araç modeli için doğrusal model öngörülü kontrol metodu önerilmiştir. Bu metodun uygulanması için tanımlı eğri üzerinde çok hassas bir şekilde hareket ettiği kabul edilen referans bir araç tanımlanmıştır. Bu sanal araca göre hesaplanan konum ve yönelim hatalarına ek olarak direksiyon açısının değişimini ifade eden bir performans fonksiyonunun optimizasyonu MPC metodunun temelini oluşturmaktadır. Burada takip edilen yollar bir sayısal haritalama programından elde edilen kontrol noktaları ile oluşturulan rasyonel temelli eğriler (spline) veya bilindik geometrik eğriler ile tanımlanmaktadır. Elde edilen benzetim ve gerçek zamanlı deneysel test sonuçları aracın tasarım performansı ve kontrol stratejisi yönünden irdelenmiştir. Bu çalışmanın özgünlüğü temel olarak iki başlık altında ele alınabilir. Bunlardan birincisi, hem tahrik hem de mekaniksel sınırlamalara sahip GPS ve IMU geri beslemeli bir aracın gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılabilen bir prototip bu çalışma ile ortaya konmuştur. İkinci olarak aşırı hesaplama yüküne rağmen MPC gibi etkili bir optimizasyon metodunun gerçek zamanlı yol takip uygulamasında geçerli olduğunu göstermek bu çalışmanın diğer bir amacını içermektedir.

## 2. Deneysel Düzenek (Experimental Setup)

Şekil 1'de gösterilen insansız yer aracı düz ve engelli arazilerde yol takibi veya yörünge izleme gibi amaçlar için tasarlanıp üretilmiştir. Bu araç araba-benzeri (car-like) bir mobil robot olup yönlendirmesi ön tekerleklerden yapılmaktadır. Araçta diferansiyel sistemi olmadığı için arka tekerlelerin her biri redüktörlü DC motorlar ile ayrı ayrı tahrik edilmektedirler. Dönüşlerde direksiyon açısına göre yazılımsal olarak arka tekerlelerin farklı hızlarda dönmesi sağlanmaktadır. Direksiyon sistemi kremayer dişli yapısında olup bir DC motor ile tahrik edilmektedir. Kullanılan DC motorların her biri 300W güç ve 24V volt kapasitesindedir. İnsansız yer aracı toplam kütlesi 225kg olup hareket düzlemine dik eksen etrafındaki atalet momenti 55.1kgm<sup>2</sup>'dir. Mobil robot boyutları ise 1,0 × 1,6 × 1,2m olup ve tekerlekler arası mesafe 0,8m ve ön ve arka aks arası mesafe ise 1,1m'dir. Tekerleklerin çapı ise 40 cm'dir. Bu sistemde, basit ve ucuz olması ve programlanmasının kolay olmasından dolayı Arduino MEGA2560 mikro-kontrolcü kartı kullanılmıştır. Arduino kartı PWM çıkış pinleri

aracılığıyla 0-5 volt arasında DC motor sürücüleri için kontrol girişi üretebilmektedir. Bilgisayar ve birçok donanım aygıtı arasındaki haberleşme USB bağlantısı ile Arduino kartı üzerinden yapılmaktadır. İnsansız yer aracının gerçek konum ve yönelimini sabit yer koordinat sistemine göre hassas bir şekilde ölçen değişik sensörler mevcuttur. Bunlar küresel konumlama sistemi (GPS) olarak CHC X360T çok amaçlı taşınabilir GNSS, ataletsel ölçme ünitesi (IMU) olarak 100Hz'lik ölçüm frekansına sahip XSENS Firması'nın MTi-1S-DEV IMU kiti ve ATONICS marka 360° çözünürlüklü mutlak enkoder sensörleridir.

Mobil robotun ön teker direksiyon açısı mekanik sınırlamalardan dolayı ve sürüş kararlılığı için  $\pm 28^\circ$  ile sınırlandırılmıştır. Bu deneysel çalışmada asıl geri besleme elemanı GPS olup ölçümlerin hassasiyeti daha çok bu cihazdan elde edilen ölçümlerin doğruluğuna güvenmektedir. Normal şartlarda mevcut GPS cihazı hareket halinde tek başına çalıştığında 1,0-1,5 m hassasiyetinde konum bilgisi vermektedir. Daha hassas bir konum ölçümü için Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü tarafından sağlanan TUSAGA-Aktif/CORS-TR hizmetinden faydalanılmıştır. Bu sistem gelen verilerin doğruluğunu kullandığı GPS yer istasyonları ağı ile arttırmaktadır. Böylelikle GPS cihazı metre-altı hassasiyetlerde çalışıp 2 cm'ye kadar pozisyon hatası ile oldukça doğru sonuçlar vermektedir. Bu sistem veri güncelleme hızı 1Hz olan bir gerçek zamanlı kinematik GPS (RTK-GPS) olarak çalışmaktadır. Kullanılan IMU aracın geçek yönelimini yer koordinat sistemine göre vermektedir. Bu çalışmada tüm kontrol işlemleri ve sensör okumaları MATLAB'da yazılan bir program ile gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada insansız aracı üzerinde kontrolcü hesapları, sensör hesaplamaları ve donanım haberleşmeleri için Intel (R) Core (TM) i5-4300 CPU @1.90 GHZ 2,5 GHZ ve 8,00GB RAM'e sahip bir dizüstü bilgisayar kullanılmıştır.

## 3. İnsansız Yer Aracının Kinematik Modeli (Kinematic Model of the Unmanned Ground Vehicle)

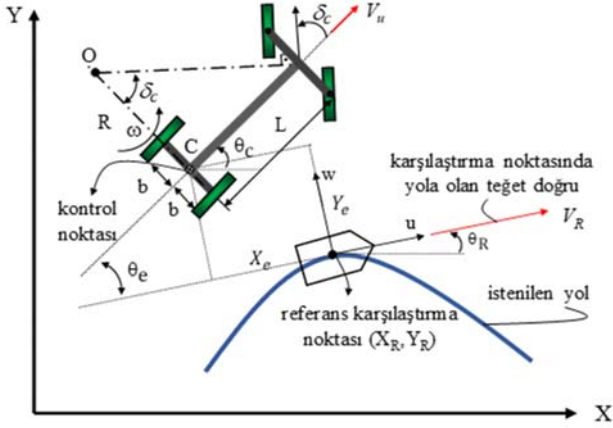
Yörünge (trajectory) zamanın bir fonksiyonu olarak hareketli bir nesnenin rotası olarak tanımlanmaktadır. Bunun anlamı belli bir zamanda belli bir noktada olmak zorundasınız. Fakat burada yol (path) kavramı zamandan bağımsız parametrik ve önceden tanımlı rota olarak ele alınmaktadır. Bu makalede sadece insansız kara aracının yol takip problem üzerine odaklanılmıştır. Bu amaç için sadece dönen ve kaymayan teker modeline dayalı holonomik olmayan sınırlayıcılara sahip kinematik model düşük hız ve küçük atalet etkilerden dolayı tercih edilmiştir. Şekil 2 kinematik araç modeli, referans yol, ilgili koordinat sistemlerini ve araç parametrelerini göstermektedir. Mobil robotun yer koordinat sisteminde serbestlik



Şekil 1. İnsansız kara aracı (The unmanned ground vehicle)

derecesi üçtür ( $X_c, Y_c, \theta_c$ ). Bu kinematik modelde yol üzerinde bir sanal araç tanımlanmakta ve bu araç tanımlı eğrinin özelliklerini tam olarak sağladığı kabul edilmiştir. Yani sanal aracın konumu ve yönelimi eğri üzerindeki nokta ve o noktadaki teğet eğimine denk düşen yönelimdir. Bu durumda kinematik model sanal araç ile gerçek araç arasında ortaya çıkacak olan hatalara dayanmaktadır. Bu modelde hareketli koordinat sistemine göre referans araç ile gerçek araç arasında üç tür hata oluşup bunlar boylamsal, yanal ve yönelim hatalarıdır ( $X_e, Y_e, \theta_e$ ). Kontrol işleminde amaç bu hataların aynı anda mümkün olduğunca sıfıra yaklaştırmak olacaktır. Modelde u-ekseni boyunca aracın hızı ( $v$ ) ve aracın direksiyon açısı ( $\delta_c$ ) yol takibi kontrolü için girişlerimizdir. Çıkışlar ise araç kontrol noktasının koordinatları ( $X_c, Y_c$ ) ve aracın yönelim açısıdır ( $\theta_c$ ). Bu ifadelere göre holonomik olmayan kinematik model için durum denklemleri Eş. 1 gibi verilmiştir.

$$\begin{cases} \dot{X}_c = v \cos \theta_c \\ \dot{Y}_c = v \sin \theta_c \\ \dot{\theta}_c = \frac{v}{L} \tan \delta_c \end{cases} \quad (1)$$



Şekil 2. Yol takip kontrolü için insansız araç kinematik modeli (Kinematic model of the car for path following control)

Daha genel bir form olarak yukarıda ifade edilen Eş. 1 ifadesini aşağıdaki gibi Eş. 2 şeklinde ifade edebiliriz.

$$\dot{z} = f(z, u) \quad (2)$$

Burada  $z = [X_e \ Y_e \ \theta_e]^T$  sabit eksen takımına göre araç konum ve yönelimini tanımlarken  $u = [v \ \delta_c]^T$ ,  $v > 0$ , araç kontrol girişleridir.

Bu çalışma doğrusal bir modeline dayandığı için aracın hata modeli referans sanal araca göre oluşturulacaktır. Referans araç ile ilgili yörünge ifadesi Eş. 2'ye benzer olarak Eş. 3'te aşağıda verilmiştir.

$$\dot{z}_R = f(z_R, u_R) \quad (3)$$

Eş. 2 ifadesi ( $z_R, u_R$ ) etrafında aşağıdaki gibi doğrusallaştırılabilir.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= f(z_R, u_R) + \left. \frac{\partial f(z, u)}{\partial z} \right|_{z=z_R} (z - z_R) + \left. \frac{\partial f(z, u)}{\partial u} \right|_{u=u_R} (u - u_R) \\ &= A_k z + B_k u \end{aligned} \quad (4)$$

Eş. 1 ve Eş. 4 denklemlerinde  $\tilde{z} = z - z_R$  ve  $\tilde{u} = u - u_R$  hata tanımları kullanılarak durum uzayı formunda doğrusal kinematik araç modeli elde edilir.

$$\dot{\tilde{z}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -v \sin \theta_k \\ 0 & 0 & v \cos \theta_k \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tilde{z} + \begin{bmatrix} \cos \theta_k & 0 \\ \sin \theta_k & 0 \\ \frac{1}{L} \tan \delta_k & \frac{v}{L \cos^2 \delta_k} \end{bmatrix} \tilde{u} \quad (5)$$

Eş. 5 ifadesi hem yörünge izleme hem de yol takibinde kullanılabilen doğrusal bir denklemdir. Bu denklemin birinci dereceden Euler metoduna göre ayrık zamanlı olarak aşağıdaki gibi ifade edebiliriz. Burada  $T_s$  örnekleme zamanını temsil etmektedir.

$$\tilde{z}_{k+1} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & -T_s v_k \sin \theta_k \\ 0 & 1 & T_s v_k \cos \theta_k \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{A_k} \tilde{z}_k + \underbrace{\begin{bmatrix} T_s \cos \theta_k & 0 \\ T_s \sin \theta_k & 0 \\ \frac{T_s}{L} \tan \delta_k & \frac{T_s v_k}{L \cos^2 \delta_k} \end{bmatrix}}_{B_k} \tilde{u}_k \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \tilde{z}_{k+1} &= A_k \tilde{z}_k + B_k \tilde{u}_k \\ y &= C z = z \end{aligned} \quad (7)$$

Bir sonraki bölümde MPC tasarımında kullanılacak olan bu ifadeye  $y$  çıkışı temsil etmektedir.

Pratikte, aracın dönüş hareketi sırasında arka tekerlere uygun hızlarda dönme hareketi sağlayacak olan bir diferansiyel dişliye sahip olunmadığından her bir teker yazılımsal olarak ayrı ayrı tahrik edilmektedir. Şekil 2'ye göre her bir sağ ve sol arka tekerleğin açılal dönme hızları aşağıdaki ifadelerle direksiyon açısının değişimine göre verilmiştir.

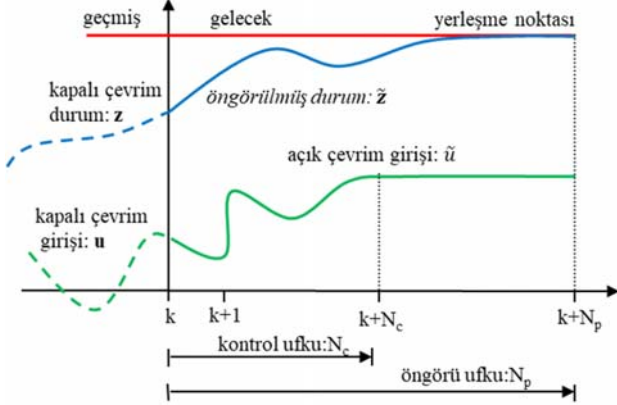
$$\left. \begin{aligned} \omega_{\text{Right}} &= \frac{V_u (L + \sigma_s b \tan \delta_c)}{r_w L} \\ \omega_{\text{Left}} &= \frac{V_u (L - \sigma_s b \tan \delta_c)}{r_w L} \end{aligned} \right\}, \quad \sigma_s = \begin{cases} +1 & \text{CCW} \\ -1 & \text{CW} \end{cases} \quad (8)$$

Burada  $r_w$  tekerlerin yarıçapını ve  $\sigma_s$  ise tekerlek dönüş yönünü temsil etmektedir.

#### 4. Yol Takibi İçin Model Öngörülü Kontrol Tasarımı (Model Predictive Control Design for Path Following)

Model öngörülü kontrol metodu sistem modeline dayalı olarak sonraki adımlar için çıkış davranışını tahmin etme yeteneğine sahip bir metottur. Bu yetenek sistemi tanımlayan değişkenlerini gerçek zamanda optimal olarak çözmeye olanak tanır. Bu işlem Şekil 3'de verilen MPC temel yapısına göre gerçekleştirilmektedir. Burada hesaplamaların yapıldığı "k" ayrık zamanında sistemin çıkışı  $z(k)$  olarak gösterilmiştir. Eğer sistemin dinamik modeli mevcut ise o anki anlık ölçüm değerleri kullanılarak bir  $N_p$  öngörü ufkü boyunca gelecekteki çıkış değerleri tahmin edilmektedir. Bu sırada sistemin davranışını  $N_p$  öngörü ufkü boyunca tanımlayan çok sayıda giriş değişkeni olduğu için sistemdeki fiziksel sınırlamaların da göz önüne alınarak bir performans indeksine dayalı optimizasyon işleminin yapılması gerekmektedir. Tabiki burada sistem çözümünü için

uygulanan kontrol ufku  $N_c$  öngörü ufkundan farklı olabilir. Sonuçta herhangi bir  $k$  ayrık zamanında optimal kontrol kümesinden sadece birinci bileşen alınır ve diğerleri atılır. Daha sonra bir sonraki  $k+1$  adımına geçilir.



Şekil 3. Model öngörülü kontrol temel yapısı  
(Basic structure of model predictive control)

Mobil robotun yol takip kontrolünde boyamsal araç hız girişi sabit olarak alınabilirken yörünge izleme işleminde bu girişin kullanılması zorunludur. Zaman bağımlı yörünge izlemede kontrol algoritması direksiyon açısı ( $\delta_c$ ) ve araç hızı ( $v$ ) girişleri için oluşturulur. Araç hızının değişken olduğu durum yol takibi içinde kullanılabilir. Yol takip süresinin kısaltılması, kararlı ve güvenli sürüş, engellerden kaçınma, daha hassas takip işlemleri gibi başka optimizasyon işlemlerinde de araç performansı arttırmak için araç hız girişi ile birlikte sistem iki girişli olarak tasarlanabilir. Fakat bu çalışmada yol takip işlemi düşük hızlarda gerçekleştiği için araç hızı sabit olarak ele alınmıştır. Bu durumda kontrol girişi olarak sadece direksiyon dümenleme açısı göz önüne alınacaktır. Yani sistem tek girişli çok çıkışlı bir sistem olmaktadır.

MPC metodunda yolun tahmini sabit bir öngörü ufku boyunca gelecekteki değişiklikler hesaba katılarak elde edilir. Gelecekteki konum ve yol özellikleri tahmin edildikten sonra aracın hızından bağımsız olarak direksiyon açısı için yeni bir kontrol kuralı hesaplanır. MPC aşağıdaki performans indeksinin optimizasyonuna göre en iyi giriş ifadesini tanımlı öngörü ufku boyunca hesaplanmaktadır.

Optimizasyon:

MPC metoduna göre bir  $J(z, u)$  performans fonksiyonunun giriş değişkeni kümesi  $\bar{\Delta u} = [\Delta u(k) \Delta u(k+1) \dots \dots \Delta u(k+N_c)]^T$  için çözümler elde edilir. Burada  $\Delta u(k)$  her bir adımdaki giriş üzerindeki değişim miktarıdır. Bu çalışmada bu değer fiziksel olarak direksiyon dümenleme açısındaki değişime karşılık gelmektedir. Eş. 7 ifadesinde giriş yerine girişin artım miktarı yazılabilir. Ayrık zamanlı uzayda kontrol girişi ardışık iki giriş için aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\tilde{u}_{k+1} = \tilde{u}_k + \Delta u(k) \quad (9)$$

Eş. 7 ve Eş. 9 ifadeleri birleştirilirse, genelleştirilmiş durum uzayı formu MPC metodu için Eş. 10 elde edilir.

$$\eta_{k+1} = \begin{bmatrix} z_{k+1} \\ \tilde{u}_k \end{bmatrix} = \tilde{A}_k \eta_k + \tilde{B}_k \Delta u_k$$

$$y = \tilde{C}_k \eta_k \quad (10)$$

Burada,

$$\tilde{A}_k = \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ 0_{m \times n} & I_{m \times m} \end{bmatrix}, \quad \tilde{B}_k = \begin{bmatrix} B_k \\ I_{m \times m} \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad \tilde{C} = \begin{bmatrix} I_{(m+n) \times (m+n)} \end{bmatrix} \quad (?)$$

$N_p$  adet ayrık öngörü ufku ve  $N_c$  adet ayrık kontrol ufku için mobil robot kinematik doğrusal modelinin durum uzayı birleştirilmiş formatı Eş. 11'deki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \eta_{k+1} &= \tilde{A}_k \eta_k + \tilde{B}_k \Delta u_k \\ \eta_{k+2} &= \tilde{A}_k^2 \eta_k + \tilde{A}_k \tilde{B}_k \Delta u_k + \tilde{B}_k \Delta u_{k+1} \\ &\vdots \\ \eta_{k+N_c} &= \tilde{A}_k^{N_c} \eta_k + \tilde{A}_k^{N_c-1} \tilde{B}_k \Delta u_k + \dots + \tilde{A}_k \tilde{B}_k \Delta u_{k+N-2} + \tilde{B}_k \Delta u_{k+N-1} \\ &\vdots \\ \eta_{k+N_p} &= \tilde{A}_k^{N_p} \eta_k + \tilde{A}_k^{N_p-1} \tilde{B}_k \Delta u_k + \dots + \tilde{A}_k \tilde{B}_k \Delta u_{k+N-2} + \tilde{A}_k^{N_p-N_c} \tilde{B}_k \Delta u_{k+N-1} \end{aligned} \quad (11)$$

Yukarıdaki ifade birleştirilmiş durum uzayı formatında yazılacak olursa, Eş. 12, Eş. 13,

$$\bar{Z} = \begin{bmatrix} \eta_{k+1} \\ \eta_{k+2} \\ \vdots \\ \eta_{k+N_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_k \\ \tilde{A}_k^2 \\ \tilde{A}_k^3 \\ \vdots \\ \tilde{A}_k^{N_p} \end{bmatrix} \eta_k + \begin{bmatrix} \tilde{B}_k & 0_{m \times 1} & 0_{m \times 1} & \dots & 0_{m \times 1} \\ \tilde{A}_k \tilde{B}_k & \tilde{B}_k & 0_{m \times 1} & \dots & 0_{m \times 1} \\ \tilde{A}_k^2 \tilde{B}_k & \tilde{A}_k \tilde{B}_k & \tilde{B}_k & \dots & 0_{m \times 1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0_{m \times 1} \\ \tilde{A}_k^{N_p} \tilde{B}_k & \tilde{A}_k^{N_p-1} \tilde{B}_k & \tilde{A}_k^{N_p-2} \tilde{B}_k & \dots & \tilde{A}_k^{N_p-N_c} \tilde{B}_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \Delta u_{k+2} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+N_c-1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\bar{Z} = \bar{A}_k \eta_k + \bar{B}_k \bar{\Delta u} \quad (13)$$

Optimizasyon için Eş. 14 performans fonksiyonu kullanılacaktır.

$$J = \|\bar{Z}\|_2^2 Q + \|\bar{\Delta u}\|_2^2 R \quad (14)$$

Performans fonksiyonunun sağ tarafındaki birinci terim tahmine dayalı çıktılar ile referans yol arasındaki takip hatasını temsil etmektedir. İkinci terim ise kontrol sürecini daha salınımsız hale getirmek için kontrol girdi değişimleri üzerindeki cezayı ifade eder. Bu ifade kuadratik forma dönüştürüldüğü zaman performans fonksiyonu durum uzayı temsili formunda Eş. 15'deki gibi yazılabilir. Bu fonksiyon bir öngörü ufku boyunca tüm durum değişkenlerinin karelerinin toplamını ve kontrol girişlerinin değişimlerinin karelerinin toplamını içermektedir.

$$J = \frac{1}{2} \chi^T H \chi + f^T \chi, \quad H \in \mathbb{R}^{(m^*N_c) \times (m^*N_c)}, \quad f \in \mathbb{R}^{m^*N_c} \quad (15)$$

Burada her bir  $k$  adımı için,

$$\chi = \bar{\Delta u}, \quad \bar{A}_k = \bar{A}_{k+1} = \dots = \bar{A}_{k+N_p} = \bar{A}, \quad \bar{B}_k = \bar{B}_{k+1} = \dots = \bar{B}_{k+N_c} = \bar{B} \text{ olduğundan performans fonksiyonu Eş. 16'daki gibi kuadratik formda ifade edilebilir.}$$

$$J = \overline{\Delta u}^T (B^T Q B + R) \overline{\Delta u} + 2A^T Q B \overline{\Delta u} \quad (16)$$

Bu optimizasyonda mobil robotun tahrik performansına göre sınır değerlerinin girilmesi gerekmektedir. Çünkü mobil robottaki motorlar belli değerler arasında tork üretebilmektedirler. Sonuçta belli bir değer arasında kontrol girişine karşılık voltaj girişi vardır. Aynı zamanda tahrik ünitesi performansına göre de kontrol girişinin değişimi de belli sınırlar arasında olmaktadır. Yani, direksiyonun sağa ve sola dönme açısı ile açısız hızı optimizasyonda sınır değerleri olacaktır. Bu ifadeler aşağıda verilmiştir.

$$u_{\min} \leq u_k \leq u_{\max}$$

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta u_k \leq \Delta u_{\max}$$

Bu ifadeler hazır paket program çözümleri için standart matris formatında doğrusal eşitsizlik matrisi olarak  $Au \leq b$  şeklinde yazılmalıdır.

$$\begin{bmatrix} I_{N \times N} \\ -I_{N \times N} \end{bmatrix} \overline{\Delta u} \leq \begin{bmatrix} \Delta u_{\max} \\ \Delta u_{\min} \end{bmatrix}_{2N_c \times 1} \Rightarrow \overline{\Omega \Delta u} \leq d \quad (17)$$

Eş. 13, Eş. 15 ve Eş. 17 kullanılarak  $\overline{\Delta u}$ 'nin çözümü aşağıdaki gibi yapılır.

$$\overline{\Delta u}^0 = \min_{\overline{\Delta u}} J$$

$$\overline{\Omega \Delta u} \leq d$$

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \quad (18)$$

Bu optimizasyonda  $\overline{\Delta u}^0$  çözümü  $m \times N_c$  elemandan oluşmaktadır. Çözüm ise ilk elemanın alınması ile gerçekleşir,  $u^0 = \overline{\Delta u}(k/k)$ . Bundan sonrada bir adım sonraki iterasyona geçilir. Çözüm işlemleri MATLAB'da oluşturulan bir program ile gerçekleştirilmektedir. MATLAB bu işlem için "quadprog" hazır fonksiyonunu kullanmaktadır.

Bu çalışmada yol takibi yaparken engellerden kaçma veya işlevini en kısa sürede bitirme gibi tanımlı işlemlerin yanında yörünge izlemede yapabilmeye için ortaya konan algoritma genel olarak verilmiştir. Bölüm 3'te uygulama çalışmaları mobil robot yol takibi üzerine odaklanıldığı için sabit bir araç hızı ile bu işlem gerçekleştirildiği kabul edilecektir. Buna göre kontrol için tüm algoritma parametreleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$n = 3$  : durum uzayı değişken sayısı,  
 $m = 2$  : giriş sayısı (fakat her bir çevrimde sabit hız alınacağından bu sayı gerçekte  $m = 1$  olmaktadır),  
 $N_p = 40$  : öngörü ufku sayısı,  
 $N_c = 30$  : öngörü ufku sayısı,  
 $Q = kron(I_{N_p}, diag[1, 1, 0.5])$ ,  $Q \in \mathbb{R}^{(n \times N_p) \times (n \times N_p)}$  : diyagonal pozitif tanımlı konumsal hata için ağırlık matrisi  
 $R = 1500 I_{m \times N_p}$ ,  $R \in \mathbb{R}^{(m \times N_c) \times (m \times N_c)}$  : diyagonal pozitif tanımlı salınımsız direksiyon açısı değişimi için ağırlık matrisi.

### 3. Benzetim ve Gerçek Zamanlı Deneysel Test Çalışmaları (Simulation and Real Time Experimental Test Studies)

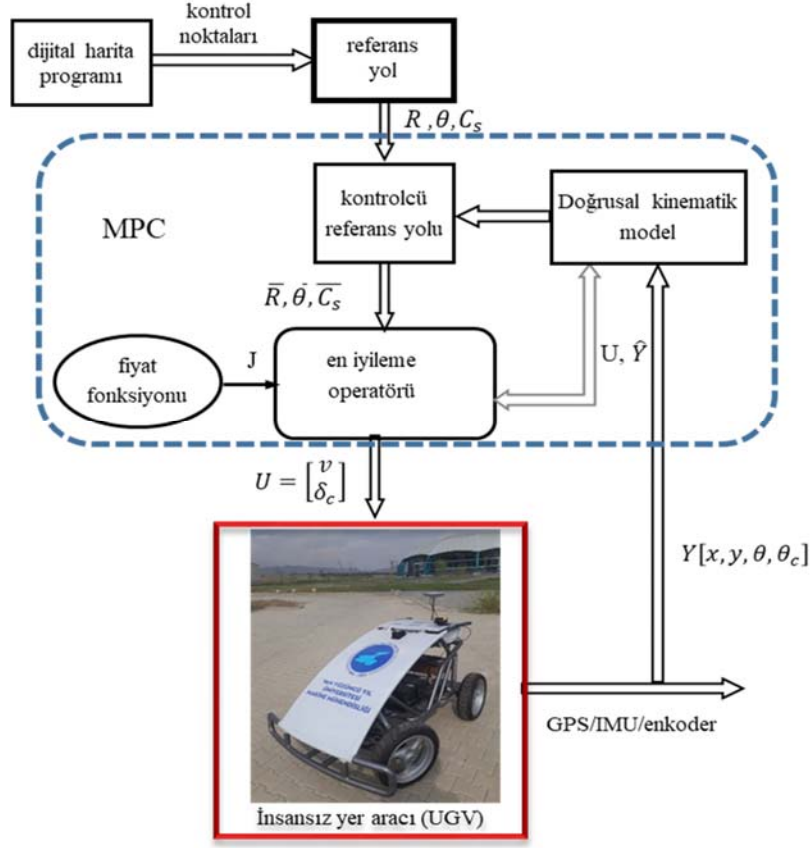
Bu bölümde önerilen kontrol metodun performans değerlendirmesi için benzetim çalışmaları ve gerçek zamanlı deneysel test çalışmaları önceden tanımlanan iki farklı yol üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki basit parçalı bir doğru olup diğeri ise tümüyle Google

Earth dijital harita programı üzerinden alınan kontrol noktaları ile oluşturulan bir spline rotanın takibi üzerinedir. Kinematik modelin geçerliliğini koruyabilmesi için düz, eğimsiz beton bir zemin seçilmiştir. Yol takip işlemi ya sabit ya da değişken araç hızlarına göre yapılabilmektedir. Daha önceki bölümde de ifade edildiği gibi bu makalede yol takip işlemi sabit araç hızına göre yapılmıştır. Burada kontrolcü bir referans sanal araca göre oluşan duruş hatalarının (konum ve yönelim hataları-  $Y_e$ ,  $\theta_e$ ) azaltılması ve salınımsız bir direksiyon açısı çıkışı elde etmek amacıyla göre çalışmaktadır. Bu amaç kontrol girişi  $\delta_c$  direksiyon açısının ayarlanması ile gerçekleştirilmektedir. Kontrol işlemine önce çevrim dışı olarak referans yolların dijital harita programı üzerinden alınması ve bu noktalara göre parametrik eğrilerin elde edilmesi ile başlanmaktadır. Bu eğriler üzerinden yol takibi için gerekli olan ve sanal aracı temsil eden ve parametreye göre değişen konum koordinatları, yönelim açısı, eğrilik yarıçapı gibi özellikler çevrim dışı olarak hesaplanmaktadır. Benzetim çalışması için ise sadece bir önceki bölümde önerilen MPC metodu ve referans eğri özellikleri kullanılarak MATLAB üzerinde yazılan bir program ile yol takip işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu programda aracın eğriye en yakın olduğu nokta tespit edilmekte ve bu noktaya göre konum ve yönelim hataları ve direksiyon açısının değişimini tanımlayan bir performans fonksiyonunun öngörü ve kontrol ufku boyunca optimizasyonuna göre direksiyon açısı elde edilmektedir. Burada gerçekleştirilen tüm işlemler gerçek zamanlı test çalışmasında da uygulanmıştır. Sadece donanımsal elemanların üzerinde yapılan işlemler farklılık göstermektedir. Gerçek zamanlı test çalışması yazılan bir MATLAB programı üzerinden yürütülmüştür. Bu bilgisayar programı Arduino, GPS, IMU ve mutlak enkoder bağlantıları ve yine bir çevrim içinde bu sensörlerden verilerin okumasını içermektedir. GPS cihazından gelen NMEA (National Marine Electronics Association) kodları ECEF koordinat sistemine (Earth-centered, Earth-fixed coordinate system) göre X-Y Kartezyen koordinatlarına dönüştürülerek mobil robotun gerçek konum bilgileri hesaplanmıştır. Ayrıca IMU üzerinden aracın sapma açısı (yaw angle) okunmaktadır. Mutlak enkoder ise aracın direksiyon açısını araç üzerine yerleştirilen koordinat sistemine göre vermektedir. Bu program aynı zamanda MPC'ye göre çıkış hatalarını telafi edecek olan motor hareketlerini düzenleyen PWM sinyallerini de üreten kodlara sahiptir. Yol izleme kontrol sürecini gösteren akış diyagramı Şekil 4'te verilmiştir.

Deneysel test aşamasında aracın direksiyon açısı tahrikinde DC motor kullanılmaktadır. Bu durumda doğrudan açı kontrolü yapılamamaktadır. Araç üzerinde bu açının kontrolü ölçülen direksiyon açısı ( $\delta_c$ ) ve DC motor kontrol voltajı girişine karşılık direksiyon açısız hızın ( $\dot{\delta}_c$ ) birleştirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Kullanılan kontrol voltajına karşılık açısız hız deneysel olarak Eş. 19'daki gibi bir ampirik formül ile ifade edilmektedir. Burada  $u_c$  [Volt], Arduino üzerinden direksiyon DC motor sürücülerine iletilen PWM kontrol girişidir.

$$\dot{\delta}_c(u_c) [\text{rad/s}] = \begin{cases} 0.0968u_c - 0.0842, & u_c > 1.5V \\ 0, & u_c \leq 1.5V \end{cases} \quad (19)$$

Bu makalede benzetim ve deneysel çalışmalar engelsiz bir ortamda yapılmıştır. Birinci test çalışması parçalı iki doğru ile temsil edilen bir yol üzerinde gerçekleştirilmiştir. İnsansız kara aracı referans açısı farklı iki doğru üzerinde hareket etmeye çalışmıştır. Gerçek zamanlı testte araç hem konum hem de yönelim olarak farklı bir başlangıç noktasından harekete başlatılmıştır. Bu test çalışması ile ilgili olarak takip edilen referans yol ve hem benzetim hem de deneysel sonuçlardan elde edilen X-Y koordinatına göre konum çıktıları Şekil 5'de verilmiştir. Mobil robot referansa göre sadece 0,1m konum hatası ve yaklaşık 15°'lik bir yönelim hatası oluşacak şekilde başlangıç şartları ile harekete başlamıştır. Araç hızı sabit 1,3 m/s olacak şekilde ayarlanmıştır. İnsansız kara aracının kat edilen yol boyunca yanal



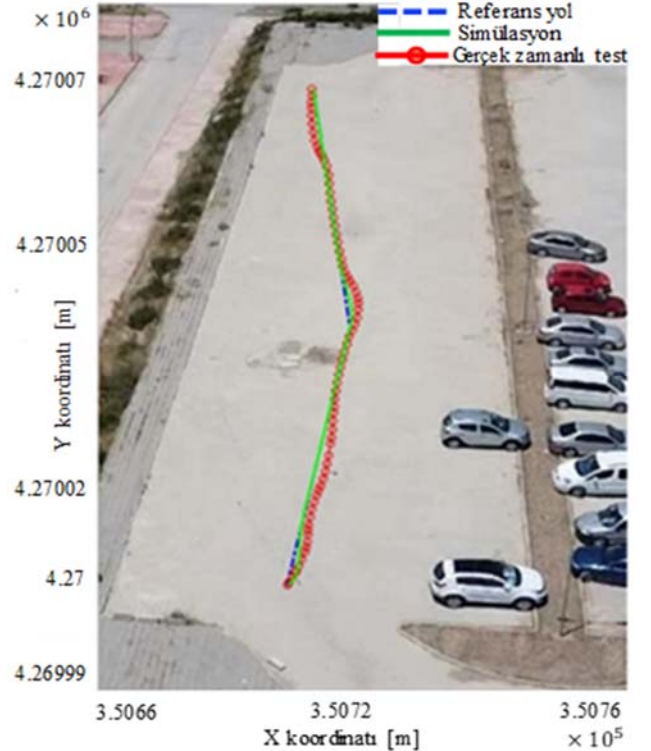
Şekil 4. Yol takip kontrolü için akış diyagramı (Flowchart for the path follow control)

konum hatasını veren grafik Şekil 6'da verilmiştir. Burada benzetim çalışmasında en büyük hata 1.33m olurken gerçek zamanlı test sonucunda bu hata 1,91m olmaktadır. Şekil 7'de görüldüğü gibi aracın yönelim davranışında ise başlangıç noktası ve ani dönüşten sonra benzetim sonucuna göre araç yönelim hatasını hemen düzelterek referans değere yaklaşmıştır. Fakat deneysel çalışmada ise araç yönelimi referans yönelimler etrafında dalgalı bir harekete sahiptir.

Başlangıç şartı dışında benzetim sonucunda araç yaklaşık 6° ve 10°'lik yönelim hatalarından sonra referansa yaklaşmıştır. Gerçek zamanlı test çalışmasında ise yönelim hata değeri yaklaşık 10°-15° hata bandında referans yöneliminden sapmalar göstermiştir.

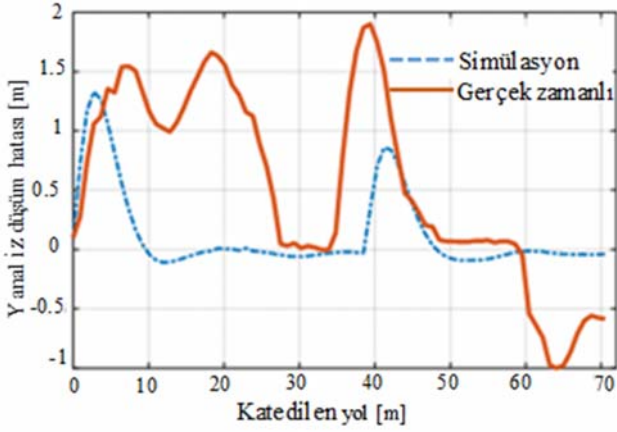
Deneysel çalışmada araç 70m'lik yolu 59s gibi bir sürede tamamlamıştır. Bu yol boyunca direksiyon açısının değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Bu grafiğe göre benzetim çalışması MPC metodunun performans fonksiyonunun bir ölçütü olan direksiyon açısı değişiminde oldukça düzgün bir sonuç vermiştir. Deneysel çalışmada ise bu denli bir salınımsız bir hareket görülmesi de oluşan dalgalanmalar insansız aracın direksiyon sistemi tarafından karşılanabilmiştir. Benzetim çalışmalarında MPC kontrol metodu için gerekli olan sabit parametreler literatürde kullanılanlara sadık kalınarak denemeyanılma ile en iyi kontrol işlemi için elde edilmiştir. Bu parametreler aynı zamanda deneysel çalışmada da kullanılmışlardır.

Diğer bir test çalışması ise bir spor kompleksi etrafında hareket için dijital harita üzerinden seçilen kontrol noktalarına göre oluşturulan bir spline eğrisi için verilmiştir. Buradaki takip edilecek yol ise düzensiz bir eğri niteliğindedir. Şekil 9'da referans yola karşılık benzetim ve gerçek zamanlı test için X-Y koordinatında araç hareketi verilmiştir.

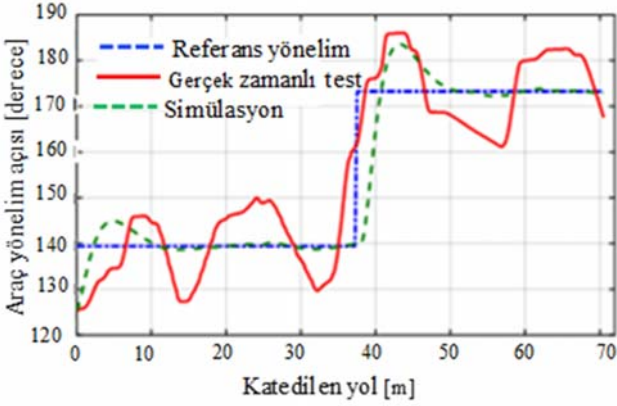


Şekil 5. Keskin dönüşe sahip parçalı doğru için yol takibi (Path following for the partial line with a sharp corner)

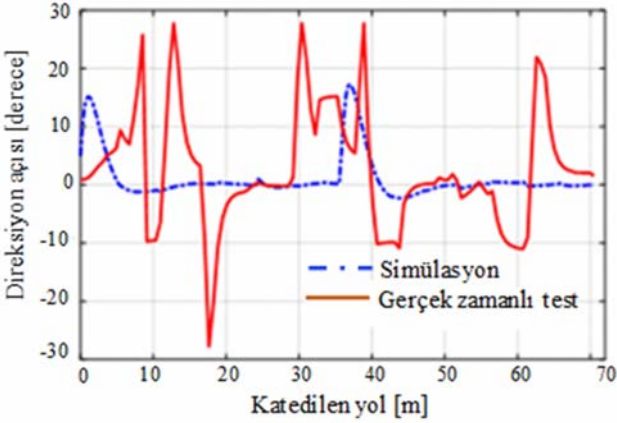




Şekil 6. Keskin dönüşlü yol takibinde yanala hata  
(Lateral position errors in path following with a sharp corner)



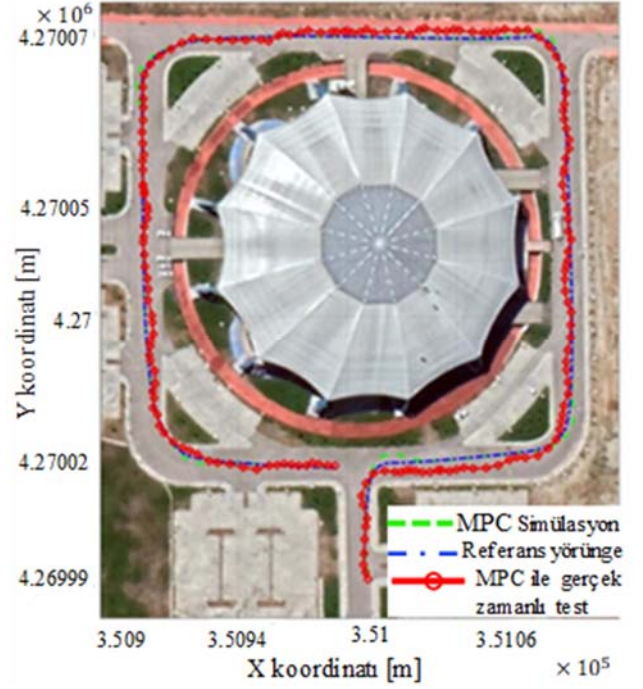
Şekil 7. Keskin dönüşlü yol takibinde yönelim hatası  
(Orientation angles in path following with a sharp corner)



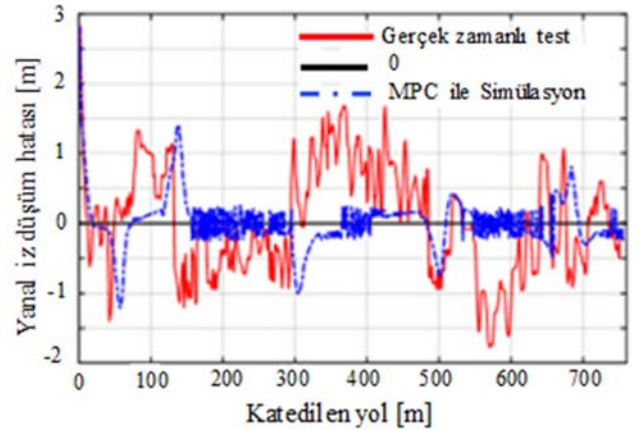
Şekil 8. Keskin köşeli yol takibinde araç direksiyon açısı  
(Steering angles of the car in path following with a sharp corner)

Bu test çalışmasında ise araç referans a göre 2,8m konum hatası ve  $5^\circ$ 'lik bir yönelim hatası ile test çalışmalarına başlanmıştır. Benzetim çalışması ile elde edilen sonuçlarda 1,4m'lik en büyük yanala konum hatasına karşılık tüm rota boyunca hata değeri sıfıra yakın kalmıştır. Buna karşılık gerçek zamanlı deneysel çalışmada ise yanala hata değeri en fazla 1,76m olmak üzere rota boyunca referans eğriden büyük sapmalar görülmüştür. Şekil 10 yanala hatanın grafiğini kat edilen yola göre vermektedir. Bu takip işlemi sırasında referans yönelim her iki çalışmada da değişik miktardaki sapmalarla takip edilmeye

çalışılmıştır. Şekil 11'de yönelim açısının takip edilen yola göre değişimi verilmektedir. Bu düzgün olmayan rotanın takibi sırasında direksiyon açısının değişimi ise Şekil 12'de gösterilmiştir. Benzetim sonucu oldukça salımsız bir kontrol açısı sunarken gerçek zamanlı testte ise bir miktar salımlı hareketler ortaya çıkmış olup bazı durumlarda da direksiyon açısı sınır değerlere dayanmıştır. Bu duruma rağmen grafikten de görüldüğü gibi bu kontrol girişi olarak bu değişim mobil robotun tahrik ünitesinin karşılayabileceği bir sonuç vermektedir.



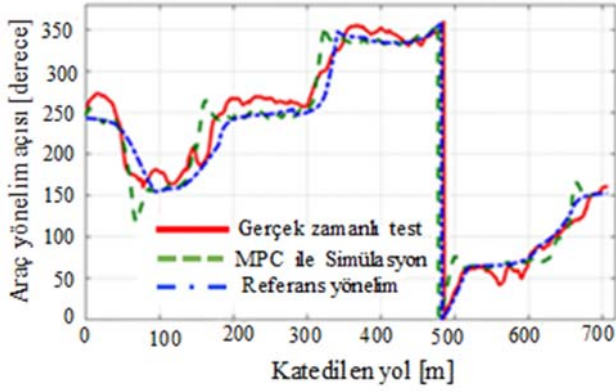
Şekil 9. Düzensiz rota için yol takip kontrolü  
(Path following control for the irregular route)



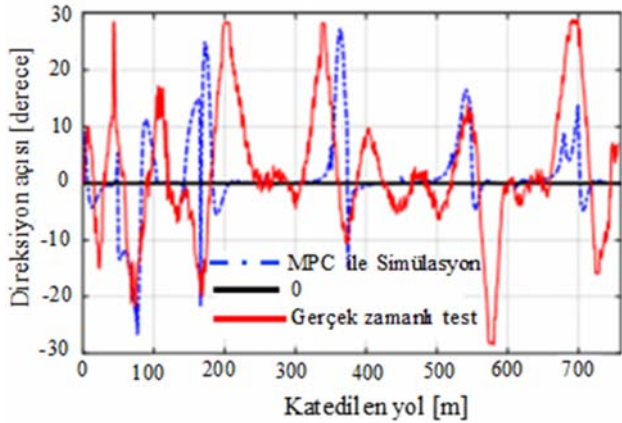
Şekil 10. Düzgün olmayan yol takibi için yanala hata  
(Lateral position error for irregular path following)

Kinematik modele dayalı olarak tahrik elemanı üzerindeki fiziksel sınırlamalar da göz önüne alınarak önerilen MPC kontrolü ile gerçekleştirilen benzetim ve deneysel test çalışmalarının sonuçları tasarımı yapılan insansız yer aracının yol takibi işleminde kullanılabilirliğini göstermiştir. Her ne kadar özellikle deneysel çalışmalarda büyük konumsal hatalar elde edilmiş olsa da bunlar böyle bir çalışma için kabul edilebilir sınırlar arasında kalmaktadır.

Tabiki yüksek hassasiyetin istendiği durumlarda bu değerler ihtiyacı karşılamayacaktır. Bu hataların en büyük nedeni ise kontrol girişi üzerindeki sınırlamalardan kaynaklanmaktadır. Tasarımı yapılan insansız yer aracında kontrolcü girişi üzerinde  $\delta_c = \pm 28^\circ$  bir konum sınırlaması varken aynı zamanda tahrik sisteminden dolayı  $\dot{\delta}_c = \pm 0.4$  rad/s gibi bir açısal hız sınırlaması da mevcuttur. Bu durum kendini deneysel çalışmada daha da fazla göstermiştir. Grafiklerden de görüldüğü üzere gerçek zamanlı deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar benzetim çalışmasından farklılıklar gösterebilmektedir. Kontrol girişi sınırlamalarına ek olarak hatalı ölçümler ve sistem modellemesindeki eksiklikler bu farklılıkların temel nedenlerini oluşturmaktadır. Direksiyon açısı ölçümünde kullanılan mutlak enkoder direksiyon ünitesindeki boşluk (backlash) etkisinden dolayı ani değişimlerde geri tepmeler sonucu hatalar üretebilmektedir. Sonra yön ölçümündeki IMU, DC motorların manyetik alanından etkilenmektedir. Her ne kadar bunun için bir kalibrasyon yapılmış olsa da test sırasında oluşan değişken manyetik alan okuma hatalarına neden olabilmektedir. Deneysel çalışmalarda GPS verileri ise TUSAGA AKTİF hizmetinin etkisiyle yüksek doğrulukta konum bilgilerini üretebilmiştir.



Şekil 11. Düzgün olmayan yol takibi için yönelim açısı (Orientation angle of the car for the irregular path following)



Şekil 12. Düzgün olmayan yol takibi için direksiyon açısı (Steering angle of the car for the irregular path)

Literatürde MPC üzerine yapılan mobil robot yol takip çalışmalarından büyük olumsuzluk hesaplama süresi olarak ifade edilmiştir. Bizim burada gerçekleştirdiğimiz deneysel çalışmada ise hem kullanılan bilgisayarın işlemci hızının yüksekliği hem de oluşturulan çözüm algoritmasının etkinliğinden dolayı bu olumsuzluk ortadan kaldırılmıştır. Karşılaştırma yapabilmek için benzetim çalışmasında örnekleme süresi 0,74 s olarak alınmıştır. Bu süre deneysel çalışmada bir çevrimde tüm sensör okumaları, kontrolcü hesapları ve Arduino

haberleşmesi ile motorların tahrik için geçen ortalama süreyi göstermektedir. Aslında bu süre tanımlı öngörü ve kontrol ufuk sayılarına bağlı olup benzetim çalışmasında sadece MPC hesabında  $N_p = 40$  ve  $N_c = 30$  değerleri için bir çevrim boyunca ortalama 0,115s'dir. Bu değer ise metodun gerçek zamanlı hesaplamalarda verilen yüksek öngörü ve kontrol ufkuları için oldukça makul değerler olduğunu göstermektedir.

#### 4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu makalede tasarlanıp üretilen bir otonom insansız kara aracının yol takip kontrolü çalışılmıştır. Mobil robotun düşük hızlarda çalıştırılması ve küçük ataletle sahip olmasının yanında uygulamada basitliğinden dolayı araç için kinematik model kullanılmıştır. Doğrusallaştırılmış ve ayrık zamanlı kinematik denklemler üzerine kurulu sistem için doğrusal model öngörülü kontrol (MPC) metodu insansız kara aracının yol takip işlemi için önerilmiştir. Bu optimizasyon metodu tanımlı eğri üzerinde hareket eden referans bir sanal araca göre konum ve yönelim hataları ile direksiyon açısının değişimini ifade eden bir performans fonksiyonunun optimizasyonuna dayanmaktadır. Elde edilen benzetim ve gerçek zamanlı deneysel test sonuçları aracın tasarım performansı ve kontrol stratejisi yönünden irdelenmiştir. Gerçek araç prototipi üzerindeki fiziksel sınırlamalara rağmen ortaya çıkan konum ve yönelim hataları bu tür bir uygulama için makul sınırlar içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle direksiyon açısının aşırı bir salınma maruz kalmaması kullanılan kontrol metodunun iyi bir performans gösterdiğini ifade etmektedir. Bunun yanında MPC kontrol metodu için ortaya çıkan hesaplama yükü ve süresinin oldukça fazla olması problemi yine bu çalışmada önerilen kontrol algoritması, seçilen parametreler ve kullanılan yüksek işlemci hızına sahip bir bilgisayar ile aşılmıştır. İnsansız kara aracı üzerindeki GPS, IMU ve enkoder sensörleri kontrolcü için geri besleme bilgisi üretmişlerdir. GPS'ten alınan ve TUSAGA AKTİF sistemi ile düzeltilen koordinat bilgileri oldukça hassas olmasına karşın IMU ve mutlak enkoderden alınan veriler manyetik ortam ve tanımlanamayan dinamik etkilerden olumsuz etkilenmişlerdir. Bu ise elde edilen sonuçların doğruluğunu önemli ölçüde etkilemiştir.

Yapılan çalışmada engellerin olmadığı bir ortam kabulüne göre sadece yol takip kontrolü üzerinde durulmuştur. Bundan sonraki çalışmalarda statik ve dinamik engellerin bulunduğu bir ortamda mevcut insansız kara aracı üzerinde lidar sensör ve kamera kullanımı ile görüntü ilemeye dayalı bir rota kontrolü üzerine çalışma düşünülmektedir. Buna ek olarak bu çalışmada ortaya çıkan olumsuzluklardan biri de ölçüm ve modelleme belirsizliklerinden dolayı ortaya çıkan hatalardır. Bu konuda diğer bir çalışma ise model ve ölçüm belirsizliklerinin giderildiği etkin bir dinamik modelleme ve hassas bir ölçüme sistemi ile daha doğru sonuçların elde edilmesi üzerine olacaktır.

#### Teşekkür (Acknowledgement)

Bu araştırma, VAN Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FBA-2016-5062 nolu proje kapsamında desteklenmiş olup katkılarından dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

#### Kaynaklar (References)

1. Bayar G., Long distance autonomous trajectory tracking for an orchard vehicle. *Industrial Robot: An International Journal*, 40 (1), 27-40, 2013.
2. Bogue R., Growth in e-commerce boosts innovation in the warehouse robot market, *Industrial Robot*, 43 (6), 583-587, 2016.

3. Bettemir Ö.H. ve Tombaloğlu B., Design and manufacture of a small scale autonomous construction machine for grading, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28 (3), 617-625, 2013.
4. HAVELSAN, Unmanned ground vehicle (UGV), Barkan <https://www.havelsan.com.tr/en/news/daily/unmanned-ground-vehicle-ugv-barkan-will-soon-be-on-the-field>, Erişim tarihi:07.11.2021.
5. Mars Exploration Rovers, NASA, <https://mars.nasa.gov/mer/index.cfm>, Erişim tarihi:05.11.2021.
6. Kıvanç Ö.C., Mungan T.E., Atilla B., Tosun G., An integrated approach to development of unmanned ground vehicle: design, analysis, implementation and suggestion, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (4), 1957-1973, 2019.
7. Tüysüz B., Development of semi-real time multi-frequency band supported passive radar system for aerial target detection, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1), 191-200, 2019.
8. Rezaei, S. ve Sengupta, R., Kalman filter-based integration of DGPS and vehicle sensors for localization. *IEEE transactions on control systems technology*, 15 (6), 1080-1088, 2007.
9. Soetanto D., Lapierre L., Pascoal, A., Adaptive, non-singular path-following control of dynamic wheeled robots. In 42nd IEEE international conference on decision and control, 2, 1765-1770, 2003.
10. Keighobadi J. ve Menhaj M.B., From nonlinear to fuzzy approaches in trajectory tracking control of wheeled mobile robots, *Asian Journal of Control*, 14 (4), 960-973, 2012.
11. Yang K., Tang X., Qin Y., Huang Y., Wang H., Pu, H., Comparative study of trajectory tracking control for automated vehicles via model predictive control and robust H-infinity state feedback control, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 34 (1), 1-14, 2021.
12. Jin T.S. ve Tack H.H., Path following control of mobile robot using Lyapunov techniques and PID controller, *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, 11 (1), 49-53, 2011.
13. Solea R. ve Nunes U. Trajectory planning and sliding-mode control based trajectory-tracking for cybercars, *Integrated Computer-Aided Engineering*, 14 (1), 33-47, 2007.
14. Dang T.S., Duong D.T., Le V.C., Banerjee S., A combined backstepping and adaptive fuzzy PID approach for trajectory tracking of autonomous mobile robots, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43 (3), 1-13, 2021.
15. Almayahi A., Wang W., Hussein A.A. Birch P., Motion control design for unmanned ground vehicle in dynamic environment using intelligent controller, *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 10 (4), 530-548, 2017.
16. Elsheikh E.A., El-Bardini M.A., Fkirin M.A., Practical path planning and path following for a non-holonomic mobile robot based on visual servoing, In 2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, 401-406, 2016.
17. Yu Y., Guo C., Yu H., Finite-time predictor line-of-sight-based adaptive neural network path following for unmanned surface vessels with unknown dynamics and input saturation, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15 (6), 1-14, 2018.
18. Singh M.K. ve Parhi D.R., Path optimization of a mobile robot using an artificial neural network controller, *International Journal of Systems Science*, 42 (1), 107-120, 2011.
19. Cherubini A., Chaumette F., Oriolo G., Visual servoing for path reaching with nonholonomic robots, *Robotica*, 29 (7), 1037-1048, 2011.
20. Zhang Z., Wu Z., Rincon D., Garcia C., Christofides P.D., Operational safety of chemical processes via Safeness-Index based MPC: Two large-scale case studies, *Computers & Chemical Engineering*, 125, 204-215, 2019.
21. Joe J. ve Karava P., A model predictive control strategy to optimize the performance of radiant floor heating and cooling systems in office buildings, *Applied Energy*, 245, 65-77, 2019.
22. Zhao C., Wang D., Hu J., Pan Q., Nonlinear model predictive control-based guidance algorithm for quadrotor trajectory tracking with obstacle avoidance, *Journal of Systems Science and Complexity*, 34 (4), 1379-1400, 2021.
23. Dai L., Yu Y., Zhai D.H., Huang T., Xia Y., Robust model predictive tracking control for robot manipulators with disturbances, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68 (5), 4288-4297, 2020.
24. Klaučo M., Kaluz M., Kvasnica M., Real-time implementation of an explicit MPC-based reference governor for control of a magnetic levitation system, *Control Engineering Practice*, 60, 99-105, 2017.
25. Kuhne F., Lages W.F., da Silva Jr, J.G., Model predictive control of a mobile robot using linearization, In *Proceedings of mechatronics and robotics*, 525-530, 2004.
26. Lages W.F. ve Alves J.A.V., Real-time control of a mobile robot using linearized model predictive control, *IFAC Proceedings Volumes*, 39 (16), 968-973, 2006.
27. Guo H., Cao D., Chen H., Sun Z., Hu Y., Model predictive path following control for autonomous cars considering a measurable disturbance: Implementation, testing, and verification, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 118, 41-60, 2019.
28. Kanjanawanishkul K., Hofmeister M., Zell A. Path following with an optimal forward velocity for a mobile robot. *IFAC Proceedings Volumes*, 43 (16), 19-24, 2010.

