

Doğrusal Olmayan Model Öngörülü Kontrol ile Engelden Kaçınarak Yörünge Takibi

Trajectory Tracking via Non-Linear Model Predictive Control with Obstacle Avoidance

Nural Mammadov¹, Sabri Yılmaz², Atalay Uçkun³, Önder Horoz⁴, Çağdaş Ala⁵

^{1,2,3,4,5} AVL Araştırma ve Mühendislik, İstanbul, Türkiye

nural.mammadov@avl.com
sabri.yilmaz@avl.com
atalay.uckun@avl.com
onder.horoz@avl.com
cagdas.ala@avl.com

Özetçe

Bu çalışmada bisiklet modeline indirgenmiş bir araç modeli kullanılarak sistemin gelecekteki durum değişkenlerinin öngörüsünün yapıldığı ve bu durum değişkenlerinden gelecekteki kontrol işaretlerini üretirken faydalandığı Model Öngörülü Kontrol (MÖK) yöntemiyle bir yörünge planlama yapılmıştır. İlk başta geleneksel araç dinamiği eşitlikleri açıklanmış ardından uygulanan doğrusal olmayan MÖK yöntemi için denklemler uyarlanmıştır. Sonrasında sisteme hareketsiz engel eklenerek engele çarpmadan referans yörünge takibi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem sabit engele sahip haritada yörünge izleme senaryosu üzerinde MATLAB ve CasADi kullanılarak test edilmiştir. Modelde kullanılan amaç ölçütü İç-Nokta İyileştiricisi (IPOPT) ile optimize edilmiştir. Doğrusal olmayan model kullanılarak hızın giriş olarak ele alınmasının ardından karşılaşılan sorunlar açıklanmış ve bu sorunlar ivmenin giriş olarak kullanılmasıyla giderilmiştir. Böylelikle giriş işareti ivmeye kadar indirgenerek tüm durumlar üstünde kısıtlama yapılmasına olanak sağlanmış, böylece engel çarpışmasız yörünge takibi başarılı bir şekilde yapılmış ve önerilen yöntemin simülasyon ortamında sonuçları verilmiştir.

Abstract

In this study, trajectory planning was made using Model Predictive Control (MPC) method, in which the future state variables of the system are predicted by using a vehicle model reduced to the bicycle model and these state variables are utilized while generating the future control signals. Firstly, the traditional vehicle dynamics equations were explained, the equations were rederived and then static obstacle was added to follow non-collision path for the applied MPC method. This method has been simulated using MATLAB by the help of CasADi on referenced by the trajectory tracking scenario. The objective criterion used in the model are optimized with the Interior Point Optimization method. After considering the velocity as an input using nonlinear model the results encountered were explained and these problems were overcome by using acceleration as an input. Thus, by reducing the input signal to acceleration, it allows to make restrictions

on all states, and trajectory tracking has been successfully done and the results of the proposed method are given in the simulation environment.

1. Giriş

Araçlar olumsuz hava koşullarında veya bir engelden kaçınmaları gereken acil bir durum yaşandığında dengelerini kaybetmekte ve hatta yanal sürüklenme eğilimi göstermektedirler. Bu da aracın genel kontrol dengesini bozmakta ve kontrol sağlanamazsa aracın kaza yapmasına neden olmaktadır. Bu durumu önlemek için araç dinamiği ve yörünge planlamaları konusunda literatürde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Fakat bu çalışmaların engel bulunan bir yörüngede yeterliliği tam olarak saptanamamıştır [1].

Amer ve arkadaşları, üç bulanık kontrol uygulamasını kullanarak engellerden kaçınma sürecindeki dinamik hataları azaltan ve kontrol etkisini iyi bir düzeye çıkaran bir algoritma geliştirmiş ve zırlı araçların yörünge izleme kontrolü için uyarlanabilir bir denetleyici olarak önermiştir [2].

Kim ve arkadaşları, LQR'ye dayalı olarak mafsallı araç için düşük hızlarda yörünge takibinin kararlılığını ve hassasiyetini gerçekleştiren aktif bir ön direksiyon kontrolörü önermiştir. Ayrıca sadece Aktif Ön Direksiyon dikkate alınarak bir yol izleme kontrolörü gerçekleştirilirse, büyük takip hatası ve istikrarsızlık gibi bazı sorunlara yol açması muhtemeldir. Bu durumu önlemek ve araç kararlılığını iyileştirmek için Doğrudan Sapma Moment Kontrol yöntemi kullanılması literatürde rastlanılan çözüm yöntemlerinden biridir [3].

Bununla birlikte, kararlılık kontrol yöntemleri ya büyük miktarda hesaplama içerdiğinden ötürü karmaşıktır ya da sadece araçların kararlılık kontrolünü dikkate alır. Bu noktada MÖK yöntemi bu hesap karmaşasını ve bu karmaşadan doğacak hesap yükünü minimize etmek için sıklıkla kullanılan metotlardan biridir. Bu özelliği sayesinde MÖK bir optimizasyon yöntemi olarak da değerlendirilebilir.

Zhang ve arkadaşları, elektrikli araçların hem uzunlamasına hem de yanal kararlılığını iyileştirmek için tork vektörü yoluyla entegre bir tekerlek kayması, yalpalama oranı ve yana kayma açısı kontrolünü araştırmış ve MÖK'e dayalı bir algoritma geliştirmiştir [4].

Bu çalışmada önceki çalışmaların aksine doğrusal sistem yerine doğrusal olmayan sistem modeli kullanılmıştır [1-5]. Doğrusal olmayan model kullanılmasının sebebi hızın giriş işareti olarak kullanılabilmesidir. Aynı zamanda doğrusal olmayan modelde, doğru sınırlandırılmamış hız giriş sinyalinin ele alınan sistemi kararsızlığa götürdüğü gözlemlenmiştir. Engel bulunan haritada giriş sinyalinin hız olarak seçilmesi sistemi kararsızlığa götürüp çarpışmalara yol açabilmektedir. Bu sonuçlar ışığında araç çizgisel ivmesi giriş sinyallerinden biri olarak kabul edilmiştir ve engel çarpışmasız yörüngeyi başarıyla takip etmiştir. Direksiyonun açısal ivmesi ise bir diğer giriş sinyali olarak seçilmiştir. Giriş sinyallerinin ivmeye kadar indirgenmesinin avantajı, hızları ve konumları durum değişkeni olarak seçilebilmesi ve bu durum değişkenlerinin de ayrı ayrı kısıtlanabilme olanağı vermesidir.

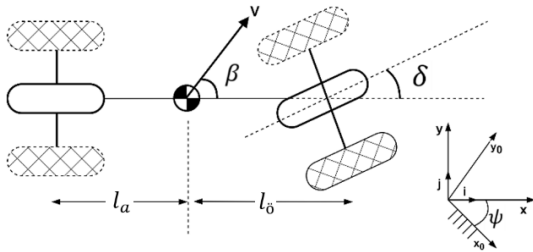
Makalenin geri kalanı aşağıdaki gibi yapılandırılmıştır. Araç dinamiği temelleri ve tasarım adımları ikinci bölümde modelleme başlığı altında açıklanmıştır. Üçüncü bölümde MÖK'ün ana hatlarından bahsedilmiş ve teorik detayları açıklanmıştır. Dördüncü bölümde sabit engelden kaçınma fonksiyonu ve yapısı açıklanmıştır. Beşinci bölümde, fizibilite ve kararlılığı yansıtan simülasyon sonuçları paylaşılmıştır. Altıncı bölümde ise genel sonuçlar anlatılmış ve geleceğe dair yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

2. Araç Modeli

Fiziksel sistemlerin kontrolü üzerine gerçekleştirilen bilimsel çalışmalarda, o fiziksel sistemin incelenmesi ve yeni kontrol metodlarının uygulanabilmesi için öncelikle matematiksel modele ihtiyaç duyulur. Bu matematiksel model yapılan çalışmanın doğasına uygun olarak farklı yaklaşımlar ve varsayımlar altında oluşturulabilir. Araç dinamiği konusu da literatürde sıklıkla çalışılmış ve farklı ihtiyaçlar için farklı modellerin kullanılmış olduğu alanlardan biridir.

Literatürde araç dinamiği alanında karşılaşılan modeller kinematik modeller ve dinamik modeller olarak ikiye ayrılır. Kinematik araç modelleri, araç hareketine etkiyen kuvvetleri dikkate almaksızın araç hareketinin matematiksel bir tanımını sunar. Oluşturulan denklemler sistemin geometrik ilişkilerini temel almaktadır. Kinematik modeller genellikle düşük hızlı manevralar içeren hareket planlamaları için kontrolör tasarlanması amacıyla kullanılır. Yüksek hızlı hareket içeren araç modellerinde ve tekerlek hızının tekerlek yönünde olduğu varsayımının yapılamadığı durumlarda, oluşan kuvveti modellemek adına dinamik modellere ihtiyaç duyulur.

Bu çalışmada aşağıdaki şekilde de görüldüğü üzere tekerlekli ve iki tekerlekli bisiklet modeli, dört tekerlekli bir aracın davranışını modellemek için kullanılmıştır. Bisiklet modelinin iki tekerleği, aracın ön ve arka aksının orta noktasında olacak şekilde yerleştirilmiştir [1].



Şekil 1: Bisiklet modeline indirgenmiş araç modelinin merkez noktasına göre koordinat gösterimi.

Şekil 1'de de gösterildiği üzere V aracın çizgisel hızını, l_a ve l_o , aracın arka ve ön aksının araç merkez noktasına uzaklığını, δ aracın direksiyon açısını, β aracın merkez noktasına göre kayma açısını, ψ araç merkezinin x düzlemine göre sapma açısını temsil etmektedir.

Denklemden yer alan C_o ve C_a aracın ön ve arka aksının katılık katsayısını, I_z aracın z eksenindeki eylemsizliğini, m aracın kütlesini, x ve y aracın sabit eksen takımına göre konumunu temsil etmektedir.

Aracın arka ve ön aksına göre ağırlık merkez noktasının referans takip noktası olarak seçtiği klasik araç dinamiği modelinin durum-uzay gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2C_o+2C_a}{mV} & 0 & -V - \frac{2C_o l_o - 2C_a l_a}{mV} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{2C_o l_o - 2C_a l_a}{I_z V} & 0 & -\frac{2C_o l_o^2 + 2C_a l_a^2}{I_z V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_o}{m} \\ 0 \\ \frac{2C_o l_o}{I_z} \end{bmatrix} \delta \quad (1)$$

Burada y_β , y_r ve y_δ olarak gösterilen ve aşağıda açıklanan parametreler, β , r ve δ parametrelerinin bir fonksiyonu olarak yanal kuvvetler ile kayma, sapma ve dönüş açıları arasındaki orantıları temsil eder. [4]

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \beta \\ \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_\beta}{mV} & 0 & \frac{y_r}{mV} - 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{N_\beta}{I_z} & 0 & \frac{N_r}{I_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{y_\delta}{mV} \\ 0 \\ \frac{N_\delta}{I_z} \end{bmatrix} \delta \quad (2)$$

$$y_\beta = -(C_o + C_a) \quad (3)$$

y_β parametresi araç üzerindeki yanal kuvvet ile araç yana kayma açısı arasındaki oranı temsil etmek için kullanılır.

$$y_r = \frac{C_a l_a - l_o}{v} \quad (4)$$

y_r parametresi araç üzerindeki yanal kuvvet ile sapma açısı arasındaki farkı temsil etmek için kullanılır.

$$y_\delta = C_f \quad (5)$$

y_δ parametresi yanal kuvvet ile dönüş açısı arasındaki oranı temsil eder. Araç üzerindeki yanal kuvvetler ile sapma, kayma ve dönüş açıları arasındaki ilişki kurulduktan sonra, moment denklemleri kullanılarak araç üzerindeki momentler ile açıları arasındaki ilişkiler ifade edilecektir.

$$N_\beta = C_a l_a - C_o l_o \quad (6)$$

N_β parametresi sapma momenti ile araç yana kayma açısı arasındaki oranı temsil eder. N_β aynı zamanda belirli bir sapma momenti miktarına karşılık gelen kayma açısını ifade ettiğinden aracın savrulma davranışını ve dolayısıyla yön kararlılığını gösterir. Arka tekerlek ön tekerlekten daha fazla moment üretiyorsa araç kararlıdır ve β açısının etkisini azaltmaya çalışır.

$$N_r = -\frac{(C_o l_o^2 + C_a l_a^2)}{v} \quad (7)$$

N_r parametresi sapma momenti ile sapma oranı arasındaki orantıyı gösterir.

$$N_\delta = C_o l_a \quad (8)$$

N_δ kontrol moment katsayısı olarak adlandırılır ve yalpalama momenti ile direksiyon açısı arasındaki orantıyı gösterir.

Klasik araç dinamiği denklemlerinden görüldüğü üzere hız parametresinin bir giriş işareti olarak kullanılabilceği lineer bir model oluşturulamamaktadır.

Araç çizgisel hız parametresini bir giriş işareti olarak kullanabilmek adına bu çalışmada doğrusal olmayan bir model ve doğrusal olmayan bir kontrolör kullanılmıştır.

3. Model Öngörülü Kontrol

Uzaktan kumanda edilen aracı insan faktöründen arındırarak otonom bir araca dönüştürmenin kritik unsurlarından biri yol veya rota planlamasıdır. Bu yol planlaması, sıklıkla bilinmeyen engellerle karşılaşılacağı için dinamik olmalıdır. Aynı zamanda, bu dinamik yol planlaması gerçek zamanlı uygulama için yeterince hızlı bir şekilde yapılmalıdır.

MÖK, sistemin matematiksel dinamik süreç modelini kullanarak gelecekteki değerleri tahmin etmekte ve kontrol süreci performansını optimize etmektedir [5,6].

3.1. Genel Bakış

MÖK, aracın mevcut durumuna (direksiyon açısı ve hız) bakar ve aracın gelecekteki durumlarını tahmin eder. Bu öngörüye dayanarak, erişim zaman adımında, performans indeksi veya maliyet fonksiyonu, gelecekteki durum ile istenen durum arasındaki hatayı bazı işletme kısıtlamaları sınırları içinde en aza indirir [7].

Bu noktada, MÖK yönteminin temel amacı, belirlenen amaç fonksiyonunu minimize ederek en uygun kontrol parametrelerini tahmin etmektir. Bu işlemin gerçekleştirilmesi için de optimizasyon yöntemleri kullanılır [8].

MÖK yönteminde kullanılan amaç fonksiyonları, farklı MÖK tekniklerinde farklı şekillerde kullanılan, zamanla değişmeyen doğrusal bir sistemin ayrık-zamanlı durum uzayı modelini içerir (Denklem 9, 10).

$$\dot{x}(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (9)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (10)$$

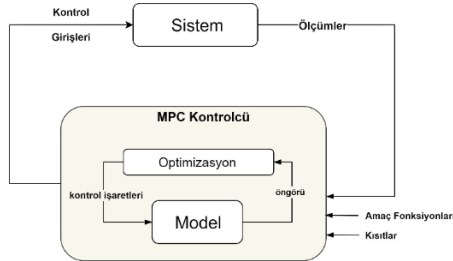
Kısıtlamalar, kullanılan donanım sistemi için fiziksel çalışma sınırlarının matematiksel temsiline dayanır (Denklem 11, 12).

$$x_{\min} < x < x_{\max} \quad (11)$$

$$u_{\min} < u < u_{\max} \quad (12)$$

MÖK metodunun genel blok diyagramı aşağıdaki Şekil-2'de belirtilmiştir. Sisteme uygulanacak giriş, belirlenen optimizasyon fonksiyonu, sistemin kısıtları ve sistemin fonksiyonu kullanılarak optimize edilir.

Bu işlem, her adımda belirlenen aralık kadar referans yörünge ile öngörülen çıkışın farkı kullanılarak gerçekleştirilir. Sonuç olarak her adımda bu hataya ve diğer parametrelere bakarak MÖK metodunun ürettiği sisteme uygulanacak olan girişler güncellenir.



Şekil 2: Model Öngörülü Kontrol blok diyagramı

3.2. Doğrusal Olmayan Problemin Oluşturulması

Bu çalışmada, sistem modelinde araç ivmesinin sisteme giriş olarak kullanılması, araç hızını değişken hale getirir. Aracın boylamsal ve yanal hızlarının elde edilmesi, trigonometrik eşitlikler kullanılması nedeniyle sistem modelini doğrusal olmayan hale getirir. Bu nedenle, doğrusal olmayan MÖK metodu sistem kontrolü için tercih edilmiştir.

Çalışmada, klasik araç dinamiği yaklaşımından ve matematiksel eşitliklerden bahsedilmiş ve ardından MÖK metodu açıklanmıştır. MÖK metodunun teorik ve matematiksel altyapısı açıklandıktan sonra bu bilgiler ışığında doğrusal olmayan modele adım adım yaklaşılmıştır.

Matematiksel denklemler, hızın giriş olarak kullanılması nedeniyle yeniden tanımlanmıştır ve sistemi kararsızlığa götürebilecek durumlardan kaçınmak için aracın ivmesi giriş olarak kullanılmıştır. Bu değişiklikler yapılarak araç dinamiği durum-uzay eşitlikleri, MÖK metodu için uygun hale getirilmiştir.

Engellerden kaçınmak için MÖK yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem kullanılarak aracın engelleri güvenli ve etkin şekilde aşmasını sağlayacak algoritmaların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede araç, sistemin çalışma sınırları ve engelden kaçınma gerekliliği dahilinde, yüksek hızlarda bile başarıyla karmaşık yön değiştirme eylemlerini gerçekleştirebilecektir.

Aracın x ve y eksenlerindeki hızlarını elde etmek için, aracın yana kayma açısı ve sapma açısından yararlanılmaktadır. Bu iki açı, aracın yönündeki değişimi ve konumunu belirlemek için gerekli parametreler olarak kullanılır. Aracın global koordinat sistemindeki hızını tanımlayan V_x ve V_y parametrelerinin kinematik diferansiyel denklemleri aşağıdaki şekilde türetilir;

$$V_x = V \cos(\psi + \beta) \quad (13)$$

$$V_y = V \sin(\psi + \beta) \quad (14)$$

Eşitliklerin tümü göz önüne alındığında ve (4), (5) ve (6) numaralı denklemler yerine konulduğunda aracın yana kayma açısının moment denklemleri aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\dot{\beta} = \left(\frac{y\beta}{mV}\right) \beta + \left(\frac{y_r}{mV} - 1\right) \psi + \left(\frac{y\delta}{mV}\right) \delta \quad (15)$$

Aracın sapma açısı momenti eşitliği, (7), (8) ve (9) numaralı denklemler kullanılarak elde edilmiştir [11].

$$\dot{\psi} = \left(\frac{N\beta}{I_z}\right) \beta + \left(\frac{N_r}{I_z}\right) \psi + \left(\frac{N\delta}{I_z}\right) \delta \quad (16)$$

Bu yapılan değişikliklerle araç dinamiği durum-uzay denklemlerinde elde edilen parametreler, öncelikli olarak hızı giriş işareti olarak kullanma imkanı sağlamıştır. Ancak, hızın paydada yer alması nedeniyle hızı sınırlama açısından doğru bir yaklaşım olmadığı durumlarda sistemi kararsızlığa götürebildiği gözlemlenmiştir.

Bu sebeple araç hızı yerine araç ivmesi girişlerden biri olarak kabul edilmiştir. Aynı şekilde, diğer bir giriş olarak direksiyon açısız ivmesi seçilmiştir. Problemin bu şekilde yeniden tanımlanmasıyla, durumlar $\beta, \psi, \dot{\psi}, V, x, y, \delta, \dot{\delta}$ ve girişler δ ve α olarak belirlenmiştir. Girişleri ivmeye kadar indirgemenin bir diğer avantajı, hızları ve konumları ayrı ayrı kısıtlama olanağı vermesidir. Bu sayede, sistem kontrolünde daha esnek ve etkili bir yaklaşım benimsenmiştir.

Ayrıca araç ivmesinin ve direksiyon açısız ivmesinin girdi olarak kullanıldığı diferansiyel denklemler ve sistemin durum denklemleri aşağıda gösterilmiştir.

$$\dot{X} = f(X, u) \quad (17)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \beta \\ \psi \\ \dot{\psi} \\ V \\ x \\ y \\ \delta \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{y_\beta}{mV}\right) \beta + \left(\frac{y_r}{mV} - 1\right) \psi + \left(\frac{y_\delta}{mV}\right) \delta \\ \dot{\psi} \\ \left(\frac{N_\beta}{I_z}\right) \beta + \left(\frac{N_r}{I_z}\right) \psi + \left(\frac{N_\delta}{I_z}\right) \delta \\ a \\ V \cos(\psi + \beta) \\ V \sin(\psi + \beta) \\ \dot{\delta} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\beta(k+1) = \beta(k) + \dot{\beta}(k) * dt \quad (19)$$

$$\dot{\psi}(k+1) = \dot{\psi}(k) + \ddot{\psi}(k) * dt \quad (20)$$

4. Engelden Kaçınma Algoritması

Sürücüsüz araçlar seyir esnasında birçok engel veya acil duruma karşı karşıya gelebilir. Bu durumlarda aracın çok hızlı karar vererek o durumdan güvenli bir şekilde kurtulması gerekir. Bu acil durumlar bazen diğer bir aracın tehlikeli bir şekilde yaklaşması olabilirken, bazen de sabit bir engel olabilir. Her iki durumda da araç bunu önceden fark ederek durumu güvenli bir şekilde atlatmalıdır.

Engelden kaçınma algoritmaları bu sorunun çözümü için araştırmacılar tarafından çalışılan popüler konulardan biridir. Özellikle otonom araç teknolojisinin hızlı gelişimi ile araç üzerindeki hesap kapasitesinin artması, araçlarda daha fazla otonom fonksiyon denemesi imkanını artırmıştır.

Önceki bölümlerde doğrusal olmayan bir model oluşturulmuş ve geliştirilmiş MÖK yöntemi ile aracın belirtilen yörüngeyi takip etmesi incelenmiştir. Burada hızın değişken olması yeni bir model oluşturma ihtiyacı doğurmuş ve bu model MÖK için bir altyapı olmuştur.

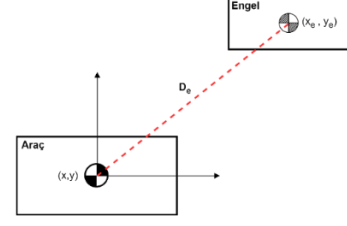
Bu bölümde ise aracın MÖK ile takip ettiği bu yörünge üzerinde bir engel ile karşılaşması durumunda, engelden güvenli bir şekilde kaçınabilmesi için bir Engelden Kaçış Fonksiyonu açıklanacaktır.

4.1. Engelden Kaçınma Fonksiyonu

Genel olarak MÖK, bir optimum girdi dizisinin sonlu bir zaman boyunca ve her bir zaman adımında bir performans kriterine göre hesaplanması olarak tanımlanabilir. Bu hesaplama özelliği bu yöntemi farklı durum ve şartlar için kullanma imkânı tanımaktadır. Araçların engelle karşılaşma durumlarında kaçınma örneği bunlardan biridir.

Bu engel bilgilerinin performans indeksinde nasıl formüle edildiğine bağlı olarak, ortaya çıkan yörüngeler birbirinden farklı olabilir. Literatürde engel durumunu formüle etmenin en bilinen yöntemi engellere olan yakınlığı tespit etmek ve cezalandırmaktır. Bu tür mesafe tabanlı yöntemler, birçok yol planlama algoritmasında yaygın olarak kullanılmaktadır [9,10].

Bu çalışmada engel durumu, aracın koordinat eksenindeki anlık x ve y konumları ile engelin merkezinin koordinat eksenindeki konumları kullanılarak elde edilen bir formül ile belirlenmiştir. Burada model her adımda aracın engele ne kadar yaklaştığını bilmektedir. Bu mesafe değişkeni D_e ile gösterilmektedir.

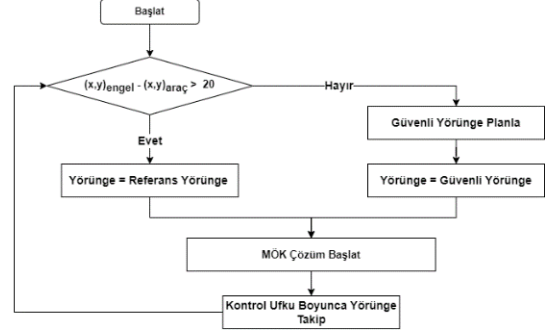


Şekil 3: Araç-Engel Mesafe Tespiti

Engelin bulunduğu noktanın koordinatları (x_e, y_e) ve aracın anlık olarak konumu (x, y) ile gösterilmektedir.

$$D_e = \sqrt{(x_e - x)^2 + (y_e - y)^2} \quad (21)$$

Araç ve engel arasındaki mesafenin hesaplanması, modelin engelden kaçınma fonksiyonunu ne zaman devreye alacağına karar vermesi için çok önemlidir. Model ve algoritmaya göre bu limit değiştirilebilir. Bu çalışmada kullanılan modelde aracın engel ile arasında 20 m mesafe kaldığında engelden kaçınma fonksiyonunun devreye alınabileceği bir algoritma tasarlanmıştır. Aşağıda engelden kaçınma algoritması kısaca açıklanmıştır.



Şekil 4: Engel Tespit Algoritması

5. Simülasyon Sonuçları ve Analizi

Bu bölümde modellenmesi yapılan ve engelden kaçış algoritması detaylı olarak açıklanan sistemin performansını test etmek için simülasyon sonuçları incelenecektir. Doğrusal olmayan MÖK algoritmasına dayalı kontrolör MATLAB ortamında CasADi kütüphanesi kullanılarak geliştirilmiştir. Amaç fonksiyonunun optimizasyonu için İç-Nokta İyileştiricisi metodu kullanılmıştır. Standart çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada sabit bir hız değeri kullanılmamıştır. Kontrolörün aracın referans yörüngesini en az hatayla takip etmesini sağlayan değişken değerlerinin belirlendiği bir model oluşturulmuştur. Modelde kullanılan parametrelerin değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Sistem sabitleri

Parametre	Değer	Birim
C_δ	80000	N/rad
C_a	80000	N/rad
l_δ	1.0988	m
l_a	1.5812	m
I_z	2873	$kg.m^2$
m	1573	kg
T_ξ	0.01	s

Sistem giriş ve durum işaretlerinin sağlanması istenen kısıtlar modele eklenmiştir. Maksimum ve minimum değerler Tablo 2'de verilmiştir. Araç çizgisel ivmesi a ile belirtilmiştir.

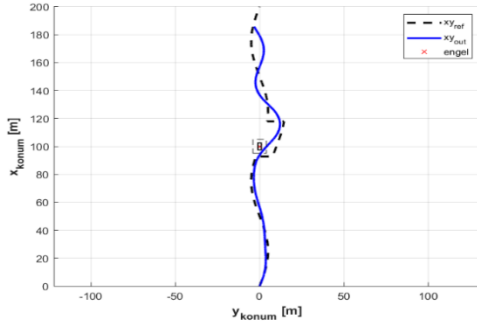
Tablo 2: Sistem kısıtları.

Parametre	Maksimum	Minimum	Birim
V	14	0	m/s
δ	30	-30	$^\circ$
$\dot{\delta}$	20	-20	$^\circ/s$
$\ddot{\delta}$	20	-20	$^\circ/s^2$
a	4	-4	m/s^2

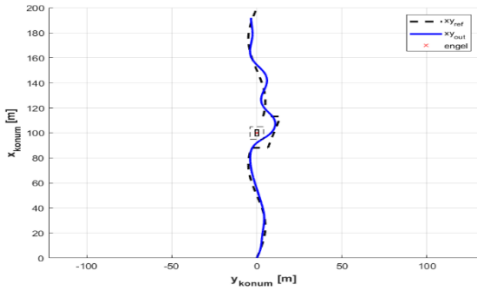
Simülasyonlarda aracın standart yörüngesi üzerine bir engel yerleştirilmiş ve kontrolcünün duran engellere karşı engellerden kaçınma performansı incelenmiştir. Testlerde örnekleme periyodu $dT = 0.01s$ ve kontrol süresi alanı $T_f = 40s$ olarak seçilmiştir. Referans parkuru üzerindeki engelin boyutları $5m \times 2m$ ve engelin merkezinin koordinat eksenindeki konumu $(100, 0)$ olarak belirlenmiştir.

Engel belirlenirken, engelin merkez noktasına bağlı olarak bir güvenli mesafe aralığı belirlenir. Şekildeki kesikli çizgili bölge engelin çarpmadan geçilmesi için model içerisinde kullanılan güvenli bölgeyi temsil etmektedir. Güvenli bölge belirlenirken x eksenini için $\pm 5m$ ve y eksenini için $\pm 4m$ seçilmiştir.

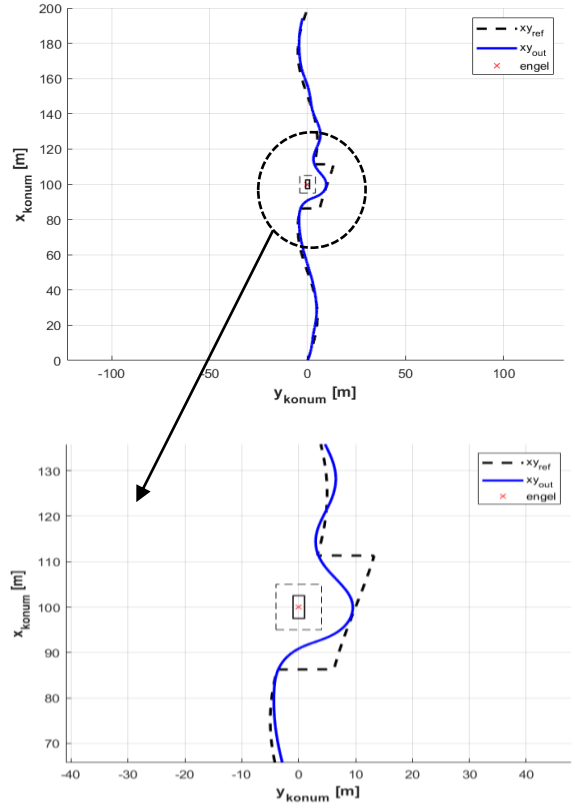
N değerinin sonuçlar üzerinde etkisini gözlemleyebilmek için kontrol ufkunun farklı değerleri ile test edilmiştir. Aşağıda N kontrol ufkunun 3 farklı değerine göre sonuçlar gösterilmiştir.



Şekil 5: Engelden Kaçınma Takip Performansı (N=10)



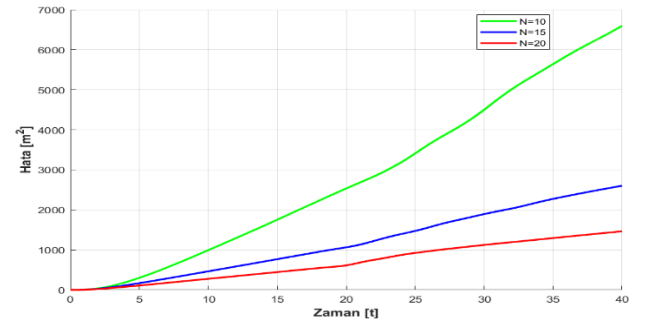
Şekil 6: Engelden Kaçınma Takip Performansı (N=15)



Şekil 7: Engelden Kaçınma Takip Performansı (N=20)

Sonuçlarda da görüldüğü üzere yapılan testlerde en iyi sonuç N kontrol ufkunun 20 olarak seçildiği denemede elde edilmiştir. Bu teste model hem referans yörüngesini başarılı bir şekilde takip ederken, hem de yörünge üzerinde bulunan engelle çarpmadan geçebilecek alternatif yörüngesini planlamış ve bu yörüngesini yüksek doğrulukla takip etmiştir.

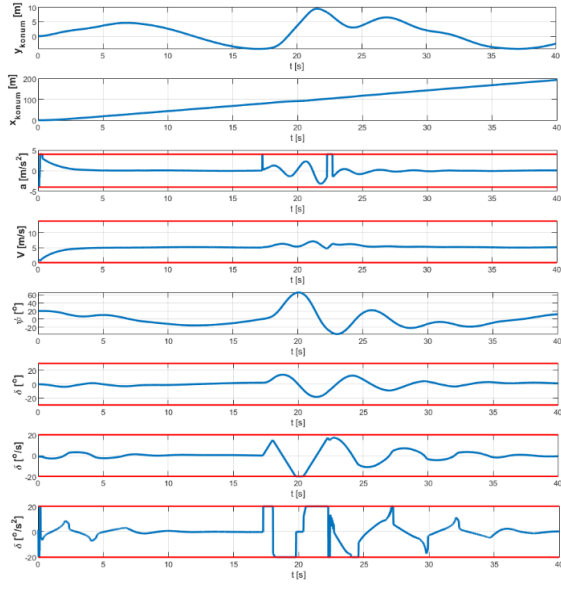
Aşağıdaki grafikte ise takip performansı incelenen bu 3 ayrı kontrol ufkunun referans takip hataları incelenmiştir. Bu hataları incelemek için ISE (Integral Square Error) metodu kullanılmıştır. Sonuçlarda da görüldüğü gibi kontrol ufkunun 5 seçildiği durum en fazla takip hatasına sahipken, kontrol ufkunun 20 seçildiği durum en az takip hatasına sahiptir.



Şekil 8: Referans Takip Hataları

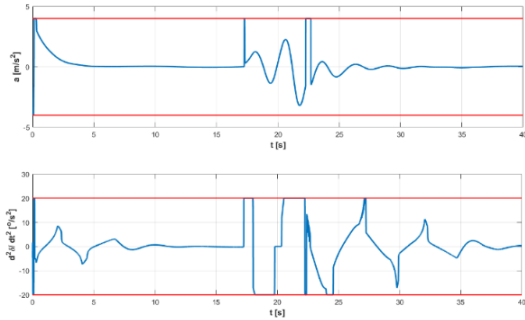
Aracın sistem durumlarının yörünge süresi boyunca değişimleri aşağıdaki grafikte gösterilmiştir. Kırmızı çizgiler uygulanan kısıtları göstermektedir. Grafikler sırasıyla aracın y eksenindeki konumu, aracın x eksenindeki konumu, aracın ivmesi, aracın çizgisel hızı, sapma açısı, direksiyon açısı ve

direksiyon açılma hızının zamana göre değişimlerini göstermektedir.



Şekil 9: Sistem durumlarının zamana göre değişimleri

Aşağıdaki şekilde seçilen 2 giriş işaretinin kontrol ufkunun 20 seçildiği senaryodaki zamana karşı değişimleri gösterilmiştir. Kırmızı çizgiler uygulanan kısıtları göstermektedir. Şekildeki grafikler sırasıyla direksiyon açılma hızının ve araç çizgisel ivmesinin zamana göre değişimini göstermektedir. Elde edilen çözümde 2 giriş işareti de kısıtlara ulaşmış ve beklendiği gibi MÖK kısıtlara bağlı kalarak çözüm üretmiştir.



Şekil 10: Giriş işaretlerinin zamana göre değişimleri.

Direksiyon açılma hızının ve araç çizgisel ivmesinin sonuçlarında da görüldüğü üzere aracın engeli fark ettiği anda planlanan alternatif güvenli yörüngeyi takip etmesi için çözüm üretmeye çalışmaktadır. İlk anlarda kısıtlara ulaşsa da zamanla kararlı hale gelerek kendini kontrol edebilmiş ve yörüngeyi başarılı bir şekilde takip etmiştir.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada doğrusal olmayan bir MÖK algoritması ile bir bisiklet modeli üzerinde yörünge takibi ve engelden kaçınma fonksiyonları test edilmiştir. Model içerisinde yaygın çalışmalardan farklı olarak araç çizgisel ivmesi ve direksiyon açılma hızının zamana göre değişimini göstermektedir. Elde edilen çözümde 2 giriş işareti seçilmiştir.

Bu farklılık model algoritması içerisinde hızların sistem durumları olarak değerlendirilmesini ve kısıtlanabilmelerini sağlamıştır. Bu sayede olası sistem kararsızlığı durumları engellenmiştir.

Literatürde genellikle kullanılan doğrusal model; doğrusal olmayan modele uyarlanmış, uygun olan kontrol ufkunu seçimiyle verilen referans yörünge takibi gerçekleştirilmiş, simülasyon sonuçları elde edilmiş ve sistem başarısı simülasyon sonuçlarıyla gösterilmiştir.

Aynı zamanda modele, aracın engelden kaçınabilmesini sağlayan fonksiyon eklenmiş ve test edilmiştir. Sonuçlar engelden kaçınma fonksiyonunun başarılı bir şekilde çalıştığını, algoritmanın olası bir engel acil durumunda güvenli bir şekilde alternatif yörünge planladığını ve başarılı bir şekilde takip ettiğini göstermiştir.

Çalışmanın geliştirilmesine yönelik yapılacak olası çalışmalarda daha detaylı araç dinamiklerini kapsayan doğrusal olmayan modeller için yörünge takip kontrol algoritmaları geliştirilebilir ve gerçek zamanlı araç testleriyle pratik uygulanabilirliği test edilebilir.

Kaynakça

- [1] S. Yılmaz, N. Mammadov, Ç. Ala, Ö. Horoz, A. Uçkun, "Doğrusal Olmayan Model Öngörülü Kontrol ile 4 Tekerlekli Bir Araç için Bisiklet Modeli Kullanarak Yörünge Takibi" TOK (2022)
- [2] Amer, N. H., Hudha, K., Zamzuri, H., Aparow, V. R., Abidin, A. F. Z., Abd Kadir, Z., & Murrad, M. (2018). Adaptive modified Stanley controller with fuzzy supervisory system for trajectory tracking of an autonomous armoured vehicle. Robotics and Autonomous Systems, 105, 94-111.
- [3] K. Kim, H. Guan, B. Wang, R. Guo, F. Liang, "Active steering control strategy for articulated vehicles," Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2016,17(6):576-586.
- [4] L. Zhang, H. Chen, Y. Huang, et al. "Model predictive control for integrated longitudinal and lateral stability of electric vehicles with in-wheel motors," IET Control Theory and Applications, 2020, 14(18):2741-2751.
- [5] Falcone, P., Borrelli, F., Asgari, J., Tseng, H. E., & Hrovat, D. (2007). Predictive active steering control for autonomous vehicle systems. IEEE Transactions on control systems technology, 15(3), 566-580.
- [6] Bayar, G., Bergerman, M., Koku, A. B., & Ilhan Konukseven, E. (2015). Localization and control of an autonomous orchard vehicle. Computers and Electronics in Agriculture, 115, 118-128.
- [7] Bulsara, A., Raman, A., Kamarajugadda, S., Schmid, M., & Krovi, V. N. (2020). Obstacle avoidance using model predictive control: An implementation and validation study using scaled vehicles. SAE Technical Paper Series, 1.
- [8] U. Dursun, F. Yıldız Taşçıkaraoğlu, & I. Üstoğlu (2020). "An algebraic and suboptimal solution of constrained model predictive control via tangent hyperbolic function." Asian Journal of Control, s:1-11, 2020.
- [9] Kim, H. J., Shim, D. H., and Sastry, S. Nonlinear model predictive control for rotorcraft-base unmanned aerial vehicles. In Proceedings of the American control conference, Anchorage, Alaska, 2002, pp. 3576-3581 (IEEE, Piscataway, New Jersey, USA).
- [10] Fahimi, F. Non-linear model predictive formation control for groups of autonomous surface vessels. Int. J. Control, 2007, 80(8), 1248-1259.