

Düşük Hızlı Otomatik Sürüş için Treyler Farkındalıklı Saf Takip Algoritması Trailer Aware Pure Pursuit Algorithm for Low Speed Automated Driving

Mert Sever^{1,2}, Mehmet Selçuk Arslan³, Mehmet Turan Söylemez¹

¹Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
{severme19,soylemez}@itu.edu.tr

²ADAS ve Otonom Sürüş Sistemleri Bölümü
Ford Otosan, İstanbul
{msever1}@ford.com.tr

³Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
{msarslan}@yildiz.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada, düşük hızlı otomatik sürüş uygulamalarında önemli bir yer tutan çekici-treyler tipi araçların yol takibi problemine odaklanılmıştır. Önerilen yöntem, Treyler Farkındalıklı Saf Takip (TAPP) olarak adlandırılmaktadır. TAPP algoritması, çekici ve treyler arka aksının yol takibini eş zamanlı olarak hesaba katmaktadır. Treyler ile çekici arasındaki eklem açısının treylerin sanal dümenleme komutu olarak ele alması sayesinde hem çekici hem de treylerin yol takibini iyileştirir. Benzetim çalışmaları, TAPP algoritmasının geleneksel saf takip algoritmasına kıyasla treylerin yol takibi performansını belirgin şekilde iyileştirdiğini göstermektedir. Çekici ve treyler arka akslarındaki yanıl takip hatalarının maksimum ve ortalama değerlerinde önemli bir iyileşme sağlanmıştır. Bu çalışma, çekici-treyler tipi araçlar için daha etkili ve doğru yol takibi yöntemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Abstract

In this study, the focus is on the path following problem of tractor-trailer vehicles, which play an important role in low-speed automated driving applications. The proposed method is called Trailer-Aware Pure Pursuit (TAPP). The TAPP algorithm simultaneously considers the path following of both the tractor and trailer rear axles. By treating the trailer-to-tractor hitch angle as the virtual steering command for the trailer, the TAPP algorithm improves the path following performance of both the tractor and trailer. Simulation studies demonstrate that the TAPP algorithm significantly enhances the path following performance of the trailer compared to the traditional pure pursuit algorithm. There is a notable improvement in the maximum

and average lateral tracking errors of both the tractor and trailer rear axles. This study contributes to the development of more effective and accurate path following methods for tractor-trailer vehicles.

1. Giriş

Otomatize Sürüş Sistemleri(ADS - Automated Driving Systems)'nin devreye girmesiyle hem yol güvenliği hem de operasyonel verimlilik yönünden büyük iyileşmeler beklenmektedir. Otomotiv Mühendisleri Topluluğu (SAE)'nin tanımına göre düşükten yükseğe 5 seviye ADS bulunmaktadır [1]. Söz konusu seviyelendirme üzerinde Operasyonel Tasarım Alanı (ODD) kavramı önemli bir rol oynamaktadır. ODD kavramı ile ADS'nin çalışmasının uygun olduğu kısıtlar yol tipi, coğrafi sınırlı bölge, hava koşulları ve gün saat bilgileri gibi özelliklerle önden tanımlanmaktadır. Örneğin, seviye 5 ADS ile herhangi bir ODD kısıtı olmadan tüm sürüş görevlerinin gerçekleştirilebilmesi anlatılmaktadır. Seviye 4 ise tüm sürüş görevlerini bir ODD kısıtı altında gerçekleştirmeyi kapsamaktadır. Maden sahaları, limanlar, lojistik merkezler gibi trafiğe kapalı, iş kazalarına yatkın ve yüksek tekrarlamalı operasyonlar seviye 4 sistemler için önemli bir ODD örneği oluşturmaktadır ve ISO22737 [2] ile tanımlanan Düşük Hızlı Otomatize Sürüş (LSAD - Low Speed Automated Driving) kapsamında değerlendirilebilmektedir. Söz konusu LSAD uygulamaları şehir içi veya otoban senaryolarına kıyasla keskin manevralar gerektirme ve dar alanlar içerme gibi karakteristikleriyle ayrılmaktadır. Çekici-treyler tipi araçların pasif treyler nedeniyle eksik eyleyicili olması söz konusu senaryolarda kendine has zorluklar getirmektedir [3].

ADS'lerin geliştirilmesinde kontrol problemi, yol takibi olarak ele alınmaktadır ve büyük ilgi gören bir araştırma alanıdır[4]. LSAD uygulamaları için ise yol takibinde treyler varlığına rağmen iyi performansın sağlanması önemli bir

problem olarak ortaya çıkmaktadır[3]. ADS'lerin yol takibinde en yaygın olarak kullanılan algoritmalar arasında PID[5], geometrik metotlar [6, 7, 8] ve Model Öngörülü Kontrol (MPC) [9, 10, 11] yaklaşımları sayılabilir [4]. Bunlar arasından geometrik metotlar, az sayıda ayar parametrelerine sahip olmaları ve sistem modeline bağımlı olmamaları ile tanınmaktadır. LSAD uygulamalarında düşük hızlarda sürdürülen operasyon ise kinematik modellerin yeterli gelmesine imkan tanıdığı için geometrik metotlarda ihmal edilen sistem dinamikleri dezavantaj olmaktan çıkmaktadır.

Saf Takip (Pure Pursuit) algoritması geometrik metotlar arasında en yaygın olanıdır[4]. Yöntem basitçe, verilen yol üzerinde aracın arka aksına bir bakış mesafesi uzaklığındaki en yakın noktayı arar. Söz konusu bakış mesafesindeki nokta anlık olarak hedef noktasına dönüşür. Sürüş boyunca referans yollar üzerinde değişen hedef noktalarını takip ettiği için "Saf Takip" algoritması olarak isimlendirilir. Aracın arka aksı ile hedef noktası arasında bir yay oturtulduktan sonra yayın eğriliği ve araç boyutlarına bağlı olarak arzu edilen dümenleme açısı hesaplanır. Metodun temel ayar parametresi bakış mesafesi değerinden ibarettir. Snider [7] çalışmasında bakış mesafesini araç hızının bir fonksiyonu olarak belirlemiştir. Stentz vd. [12] hesaplanan eğrilik değerini yönelim hatası ile uyarlayarak kararlılığı iyileştirmişlerdir. Urmson vd. [13] ise araç üzerindeki sensörlerin yerleşim hataları veya dümenleme eyleyicilerindeki ideal-sizlikler sonucunda oluşabilen sürekli hal hatalarını gidermek için arzu edilen eğrilik değerini takip hatasının integrali ile zenginleştirmiştir. Söz konusu integral terimi sadece sifra yakın eğrilik senaryolarında işletildiği için keskin manevralardaki kaçınılmaz takip hataları karşısında birikme yapmamaktadır. Park vd. [14] düzeltme müdahalesini sadece integral yerine yanal hatanın PI geri beslemesiyle uygulamıştır. Saf takip algoritmasına iki özgün yaklaşım da Campbell [15] tarafından önerilmiştir. İlk yaklaşımda, istenen eğrilik nominal saf takip algoritması tarafından belirlenir. Ardından, belirli bir eğriliğe ulaşmak için gereken direksiyon açısını belirlemek için dinamik bir araç modeli kullanılır. İkinci yaklaşımda ise bakış mesafesini optimize etmek hedeflenmiştir. Aynı referans yolun birden fazla bakış mesafesi ile takip edileceği durumlardaki araç yörüngelerini çalışma çevrimi içerisinde tahmin etmek için kinematik araç modeli kullanılır. Elde edilen tahmini yörüngeler üzerinde bir maliyet fonksiyonu kullanarak en iyi bakış mesafesini belirler. Saf Takip yaklaşımının keskin virajlarda içeriden alma problemi yaşadığı bilinmektedir. Bu yönden performans iyileştirmesi elde etmek adına Lombard vd. [16] bir öneride bulunmuştur. Mevcut bakış mesafesi ve temel saf takip yaklaşımıyla aracın tahmini yörüngelerini hesaplayarak referans yol ve araç tahmini yörüngeleri arası kalan alan hesaplanır. Söz konusu alan virajı içeriden alma durumunda pozitif, dışarıdan alma durumunda negatif değere sahip olacak biçimde hesaplanır. Böylece virajı içeriden alma riski karşısında saf takip yasaasının istediği dümenleme komutunu azaltan, dışarıdan alma riski karşısında ise dümenleme komutunu arttıran bir ayar çarpanı kullanılmıştır. Evestedt vd. [17] çalışmalarında çift treylerli bir çekicinin geri manevrası sırasında yol takibi için kademeli bir mimari önermiştir. Eklem açısının kararsızlığa gitmesini önlemek için Altafoni vd. [18] tarafından önerildiği gibi iç döngüde LQR kullanıp, saf takip algoritması ile dış döngüde yol takibi sağlanmıştır. Saf takip algoritması ile geri yöndeki hareket sırasında treyler arka aksı-

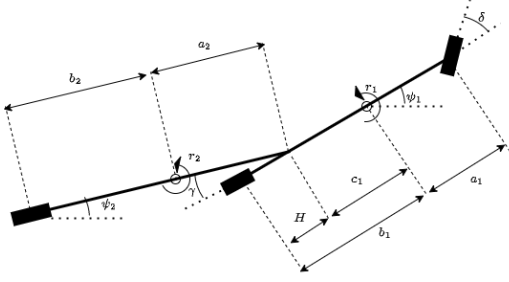
nın yol takip edebilmesi için çekici ile treyler arasındaki eklem açısından sanal bir dümenleme komutu olarak faydalanılmıştır. Eklem açısının treylerler için sanal bir dümenleme açısı olarak kullanımı literatürde yaygın olarak tercih edilmiş bir çözümdür [19]. Manav vd. [20] bir çekici-treyler tipi aracın bir LSAD uygulamasındaki yanaşma manevraları için yol takibinde ileri yönlü sürüşte Lombard vd. [16] tarafından sunulan saf takip algoritmasını, geri yönlü sürüşte ise Evestedt vd. [17] tarafından sunulan saf takip algoritmasını baz almışlardır. Her iki yöndeki sürüş için de bakış mesafesinin ve LQR performans ağırlıklandırma parametrelerinin hız ve takip hatalarına eş zamanlı olarak ilişkilendirildiği kazanç ayarlama stratejisi önerilmiştir. İleri yönlü sürüşte kullanılan saf takip algoritması treylerin yol takip performansını göz ardı etmektedir. LSAD uygulamalarındaki yüklenme boşaltma senaryolarındaki yanaşma manevralarında ileri yönlü hareket genellikle geniş alanlarda gerçekleşmektedir. Yüklenme boşaltma alanları arasındaki opeprasyon ise keskin manevraların dar alanlarda gerçekleştirilmesini gerektirmektedir. İncelenmiş olan çalışmalarda ise çekici-treyler tipi araçların ileri yöndeki sürüşünde çekici ve treylerin yol takibi performansını eş zamanlı olarak dikkate alan bir saf takip algoritması versiyonuna rastlanmamıştır.

Bu çalışmada, çekici-treyler tipi araçlar için özel olarak uyarlanmış yeni bir saf takip algoritması önerilmektedir. Söz konusu algoritma Treyler Farkındalıklı Saf Takip (TAPP- Trailer Aware Pure Pursuit) olarak isimlendirilmiştir. Treyler ile çekici arasındaki eklem açısının treyler için sanal bir dümenleme girişi oluşturması fikrinden yararlanılmıştır [17, 19]. Bu sayede çekicinin ve treylerin arka akslarının yol takibi için eş zamanlı olarak dümenleme ve eklem açısı talepleri hesaplanır. Ardından treylerin yol takibi için talep edilen eklem açısını sağlayacak olan eş değer dümenleme talebi geometrik bağıntılar yardımıyla elde edilir. Böylece çekici ve treyler tarafından arzu edilen iki bağımsız dümenleme talebi elde edilmiş olunur. Söz konusu dümenleme taleplerinin doğrusal kombinasyonu ile nihai dümenleme komutu elde edildiğinde hem çekici hem de treyler için yol takibi performanslarının iyileştirilmesine olanak tanıyan bir yaklaşım tasarlanmış olmaktadır. Önerilen yaklaşımın etkinliği sayısal benzetim çalışmasıyla incelenmektedir. Benzetim çalışmaları sonucunda gelenksel saf takip algoritmasına kıyasla iyileştirilmiş bir treyler yol takip performansı açıkça görülmektedir.

2. Çekici-Treyler Tipi Araç Kinematik Modeli

LSAD uygulamaları gibi düşük hızlı senaryolarda kinematik araç modelleri yeterli doğruluğu sağlayabilmektedir. Çekici-treyler tipi bir aracın geometrisi Şekil 1 ile görülmektedir.

Burada çekicinin dümenleme açısı, δ , çekici ile treyler arasındaki eklem açısı, γ ile verilmektedir. ψ_1 ve ψ_2 değişkenleri sırasıyla çekici ve treyler sapma açılarını göstermektedir. r_1 ve r_2 ile sırasıyla çekici ve treyler sapma hızları gösterilmektedir. a_1+b_1 ve a_2+b_2 değerleri sırasıyla çekici ve treyler aks açıklıklarını ifade etmektedir. H ise treyler bağlantı noktası ile çekici arka aksı arasındaki mesafeyi göstermektedir. Çekici-treyler ki-



Şekil 1: Çekici-treyler tipi aracın geometrisi.

nematik modeli

$$\begin{bmatrix} \dot{r}_1 \\ \dot{\psi}_1 \\ \dot{r}_2 \\ \dot{\psi}_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \frac{\tan(\delta)}{a_1+b_1} \\ r_1 \\ v_x \frac{\sin(\gamma)}{a_2+b_2} + r_1 H \frac{\cos(\gamma)}{a_2+b_2} \\ r_2 \\ v_x \cos(\psi_1) \\ v_x \sin(\psi_1) \\ v_x \cos(\gamma) \cos(\psi_2) - r_1 H \sin(\gamma) \cos(\psi_2) \\ v_x \cos(\gamma) \sin(\psi_2) - r_1 H \sin(\gamma) \sin(\psi_2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

olarak tanımlanmaktadır [20]. Burada eklem açısı, $\gamma = \psi_1 - \psi_2$ olarak elde edilmektedir. Benzetim çalışmalarında, $a_1 = 1.39[m]$, $b_1 = 2.21[m]$, $a_2 = 3.71[m]$, $b_2 = 2.49[m]$ ve $H = 0.8[m]$ olarak alınmıştır.

3. TAPP: Treyler Farkındalıklı Saf Takip Algoritması

Bu çalışmada, özgün bir saf takip algoritması, çekici-treyler tipi araçların LSAD uygulamalarındaki yol takibi performansını iyileştirmek için geliştirilmiş ve Treyler Farkındalıklı Saf Takip (TAPP: Trailer Aware Pure Pursuit) olarak isimlendirilmiştir. Geliştirilen yaklaşım

- Çekici için geleneksel saf takip metodu ile arzu edilen dümenleme açısının hesaplanması,
- Treyler için geleneksel saf takip metodu ile arzu edilen eklem açısının hesaplanması,
- Arzu edilen eklem açısına eş değer çekici dümenleme açısının geometrik bağıntılarla türetilmesi,
- Son olarak, bu iki bağımsız dümenleme değerinin doğrusal kombinasyonu ile nihai dümenleme açısının bulunması,

adımlarından oluşmaktadır.

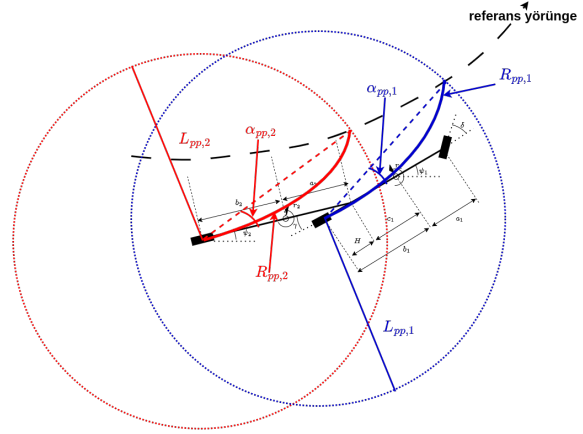
Not: Eklem açısını treyler özelinde sanal bir dümenleme girişi olarak kullanmak, özellikle çekici-treylerlerin geri yönlü yol takibine özgü literatürde görülen bir uygulamadır [17, 19].

Çekici ve treyler için saf takip algoritması üzerinden hesaplanmış olan arzu edilen dümenleme komutları denklem (2) ile verildiği biçimde bir λ parametresi üzerinden doğrusal kombinasyon işlemiyle nihai dümenleme açısı elde edilmektedir.

$$\delta = (1 - \lambda)\delta_{pp,1} + \lambda\delta_{pp,2} \quad (2)$$

$$\delta_{pp,2} = \delta_{ss}(\gamma_{pp,2}) \quad (3)$$

Burada $\delta_{pp,1}$ ve $\gamma_{pp,2}$, arzu edilen çekici dümenleme açısı ve arzu edilen eklem açısı değerleridir. $\delta_{pp,2}$ ile arzu edilen eklem açısını sağlayacak olan dümenleme açısı, δ_{ss} ile arzu edilen eklem açısı ile dümenleme açısı arasındaki sürekli hal bağıntısı ifade edilmektedir. Ayrıca, λ ile verilen parametre 0 – 1 aralığında değer alacak şekilde tasarlanan Treyler Farkındalık Katsayısı (TAC-Trailer Awareness Coefficient) olarak tanımlanmaktadır. Daha önce belirtildiği gibi saf takip algoritmasının çekici ve treyler arka aksları için ayrı ayrı uygulanmasında baz alınan geometri ise Şekil 2 ile gösterilmektedir.



Şekil 2: TAPP geometrisi.

Şekil 2’de gösterildiği gibi, referans yol üzerindeki hedef noktasını bağlayan eğrinin yarıçapı, aşağıdaki denklemlerde verilen çekici ve treyler aks açıklığı parametreleri ile birlikte kullanılır.

$$\delta_{pp,1} = \text{atan} \left(\frac{a_1 + b_1}{R_{pp,1}} \right) \quad (4)$$

$$\gamma_{pp,2} = \text{atan} \left(\frac{a_2 + b_2}{R_{pp,2}} \right) \quad (5)$$

Çekici için, $R_{pp,1}$ ’nin elde edilmesinde üçgen eşitliklerinin özelliklerini kullanarak

$$\frac{L_{pp,1}}{\sin(2\alpha_{pp,1})} = \frac{R_{pp,1}}{\cos(\alpha_{pp,1})} \quad (6)$$

$$\frac{L_{pp,1}}{2\sin(\alpha_{pp,1})\cos(\alpha_{pp,1})} = \frac{R_{pp,1}}{\cos(\alpha_{pp,1})} \quad (7)$$

$$\frac{L_{pp,1}}{2\sin(\alpha_{pp,1})} = R_{pp,1} \quad (8)$$

şekilde hesaplanabilir. Burada çekici için bakış mesafesi ve açısı, $L_{pp,1}$ ve $\alpha_{pp,1}$ ile gösterilmiştir. Treyler için, $R_{pp,2}$ ’nin elde edilmesinde üçgen eşitliklerinin özelliklerini kullanarak

$$\frac{L_{pp,2}}{\sin(2\alpha_{pp,2})} = \frac{R_{pp,2}}{\cos(\alpha_{pp,2})} \quad (9)$$

$$\frac{L_{pp,2}}{2\sin(\alpha_{pp,2})\cos(\alpha_{pp,2})} = \frac{R_{pp,2}}{\cos(\alpha_{pp,2})} \quad (10)$$

$$\frac{L_{pp,2}}{2\sin(\alpha_{pp,2})} = R_{pp,2} \quad (11)$$

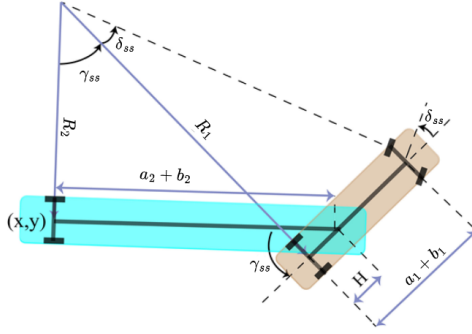
Burada treyler için bakış mesafesi ve açısı, $L_{pp,2}$ ve $\alpha_{pp,2}$ ile verilmektedir. Bu aşamada $\delta_{pp,2}$ ile $\gamma_{pp,2}$ arasındaki

$$\delta_{ss}(\gamma_{ss}) = \text{atan} \left(\frac{L_1 \sin(\gamma_{ss})}{L_2 - H \cos(\gamma_{ss})} \right) \quad (12)$$

bağıntısının kullanılmasıyla nihai dümenleme komutunu elde etmek için gerekli olan denklemler tamamlanmış olur. Denklem (12)'in detaylı türetilişi sonraki altbölümde adım adım anlatılmıştır.

3.1. Eklem Açısı ile Dümenleme Açısı Arasındaki Sürekli Hal Yanıtı Bağntısı

Bu bölümde $\delta_{pp,2}(\gamma_{pp,2})$ bağıntısının türetilmesinde rehberlik edecek sürekli hal yanıtı ilişkisine dair geometri Şekil 3 ile verilmektedir.



Şekil 3: Dümenleme ve eklem açısı arasındaki sürekli hal yanıtı ilişkisi [20].

Burada, R_1 'i iki farklı üçgenle eşit olarak ifade etmek gereklidir. İlk üçgen açıkça kamyon dingil mesafesi, L_1 , kamyonun eğim yarıçapı, R_1 ve direksiyon açısı δ_{ss} 'den oluşur. İlk eşitlik aşağıdaki gibi verilir:

$$R_1 = \frac{L_1}{\tan(\delta_{ss})}. \quad (13)$$

İkinci üçgen için, treyler dingil mesafesi, L_2 , bağlantı noktasının aks dışında mesafesi, H , bağlantı açısı, γ_{ss} ile oluşur. İkinci eşitlik aşağıdaki gibi verilir:

$$(R_1 - H \tan(\gamma_{ss})) \sin(\gamma_{ss}) = L_2 - \frac{H}{\cos(\gamma_{ss})}. \quad (14)$$

Sağ tarafı $\cos(\gamma_{ss})$ 'nin ortak paydasıyla tekrar yazıp, sol tarafı $\sin(\gamma_{ss})$ ile bölelim.

$$(R_1 - H \tan(\gamma_{ss})) = \frac{L_2 \cos(\gamma_{ss}) - H}{\cos(\gamma_{ss}) \sin(\gamma_{ss})} \quad (15)$$

Sol tarafı $\cos(\gamma_{ss})$ 'nin ortak paydasıyla tekrar yazıp, ardından sağ tarafın paydasından $\sin(\gamma_{ss})$ 'yi sadeleştirerek $\cos(\gamma_{ss})$ 'nin ortak paydasıyla tekrar yazın.

$$\frac{R_1 \cos(\gamma_{ss}) - H \sin(\gamma_{ss})}{\cos(\gamma_{ss})} = \frac{L_2 \cot(\gamma_{ss}) - H / \sin(\gamma_{ss})}{\cos(\gamma_{ss})} \quad (16)$$

Denklemin her iki tarafını $\cos(\gamma_{ss})$ ile çarparak paydaları kaldırılır.

$$R_1 \cos(\gamma_{ss}) - H \sin(\gamma_{ss}) = L_2 \cot(\gamma_{ss}) - H / \sin(\gamma_{ss}) \quad (17)$$

Sağ tarafı düzenleyerek, $H \sin(\gamma_{ss})$ 'yi sol taraftan uzaklaştırılır.

$$R_1 \cos(\gamma_{ss}) = \frac{L_2 \cos(\gamma_{ss})}{\sin(\gamma_{ss})} - \frac{H}{\sin(\gamma_{ss})} + H \sin(\gamma_{ss}) \quad (18)$$

Sağ tarafı, $\sin(\gamma_{ss}) \cos(\gamma_{ss})$ 'nin ortak paydasında tekrar yazılır.

$$R_1 = \frac{L_2 \cos(\gamma_{ss}) + H(\sin^2(\gamma_{ss}) - 1)}{\sin(\gamma_{ss}) \cos(\gamma_{ss})} \quad (19)$$

Bilindiği üzere, $\sin^2(\cdot) - 1 = -\cos^2(\cdot)$ olduğundan, denklemin sağ tarafı aşağıdaki gibi tekrar yazılır.

$$R_1 = \frac{L_2 \cos(\gamma_{ss}) - H \cos^2(\gamma_{ss})}{\sin(\gamma_{ss}) \cos(\gamma_{ss})} \quad (20)$$

Daha sonra, sağ tarafı $\cos(\gamma_{ss})$ ile hem payda hem de paydandan bölünmesi yoluyla basitleştirerek aşağıdakini elde edilir

$$R_1 = \frac{L_2 - H \cos(\gamma_{ss})}{\sin(\gamma_{ss})}. \quad (21)$$

(13) ve (21) denklemlerinde verilen bu iki üçgeni tek bir denklemde birleştirerek,

$$\delta_{ss}(\gamma_{ss}) = \text{atan} \left(\frac{L_1 \sin(\gamma_{ss})}{L_2 - H \cos(\gamma_{ss})} \right) \quad (22)$$

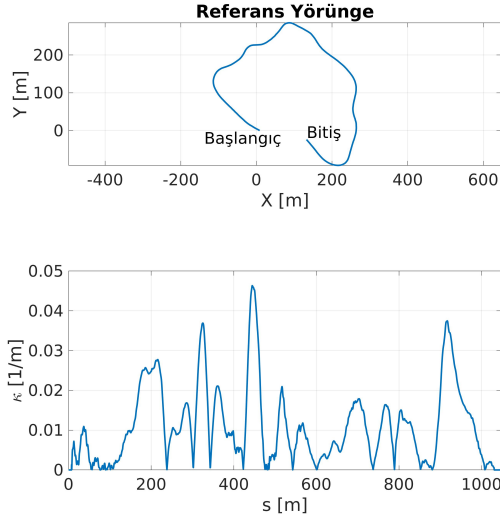
elde edilir. Denklem (22), istenen eklem açısının sürekli hareket durumunda sürekli durum dümenleme açısı olan δ_{ss} 'nin dönüşümünü sunar.

4. Benzetim Çalışmaları

Bu bölümde önerilen TAPP algoritmasının performansı geleneksel saf takip algoritması ile karşılaştırılacaktır. Referans yolun kartezyen koordinatları ve eğriliği Şekil 4 ile görülmektedir.

Bu çalışma özelinde LSAD uygulamaları referans alınarak seviye 4 bir ADS için maden sahası, inşaat alanı, liman ve lojistik depo gibi trafiğe kapalı alanlarda çekici-treyler tipi araçlara yönelik olarak TAPP algoritması önerilmiştir. Bu bilgiler ışığında Şekil 4 incelendiğinde görülen yüksek eğrilik, κ değeri yaklaşık 21.58 metrelik bir minimum dönüş yarıçapına karşılık gelmektedir. Otoban gibi senaryolarda kanunen 360 metre ile sınırlanan dönüş yarı çapı ile kıyaslandığında LSAD uygulamalarındaki yüksek eğrilikli karakteristik görülmektedir.

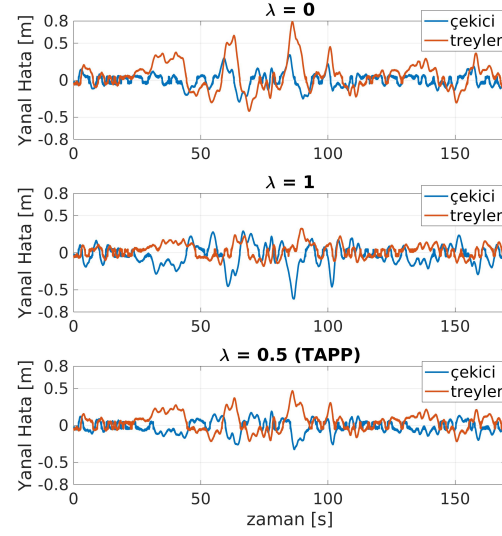
Benzetim çalışmalarında çekici bakış mesafesi, $L_{pp,1} = 8[m]$, treyler bakış mesafesi, $L_{pp,2} = 8[m]$, ve araç boylamasal hızı, $v_s = 5[m/s]$ olarak alınmıştır. Şekil 5 içerisinde $\lambda = 0, 0.5, 1.0$ değerleri için elde edilen yol takip performanslarını kıyaslamak adına yanal hataların zaman yanıtları verilmektedir. Burada $\lambda = 0$ seçildiğinde treyler için arzu edilen eklem açısı yok sayıldığından geleneksel saf takip algoritması elde edilmektedir. $\lambda = 1$ seçildiğinde ise çekicinin yol takibi performansı göz ardı edilerek sadece treylerin arka aksını referans yol üzerinde tutacak şekilde nihai dümenleme komutu



Şekil 4: Benzetim çalışmalarında kullanılan referans yolun kartezyen koordinatları ve eğriliği

elde edilmektedir. $\lambda = 0.5$ alındığında ise çalışmamızda önerilen TAPP algoritmasının sonuçları görülmektedir. Şekil 5 incelendiğinde, TAPP algoritması tercih edilmediğinde çekici veya treylerin yanıl hatalarının 0.8 metreye yaklaştığı görülmektedir. TAPP yaklaşımı ise maksimum yanıl hata değerlerini eş zamanlı olarak çekici için 0.33 metre, treyler için 0.47 metreye kadar düşürebilmektedir. Ayrıca RMS yanıl hata değerleri de önceki bulguları pekiştirmektedir. TAPP sayesinde maksimum yanıl hatalar analiz edilirse çekici tarafında $\lambda = 0$ senaryosuna kıyasla %47 iyileşme, treyler tarafında ise $\lambda = 1$ senaryosuna kıyasla %40 iyileşme sağlanmıştır.

Şekil 6 ile her üç λ değerinde yanıl takip hatasının zirveye çıktığı kısımdaki performansı kartezyen koordinatlar üzerinden inceleyebiliriz. Çekiciye odaklanan, $\lambda = 0$ tasarımında treylerin virajı içeriden aldığı görülmektedir. Treylere odaklanan, $\lambda = 1$ tasarımında ise çekicinin virajı dışarıdan aldığı görülmektedir. TAPP ile $\lambda = 0.5$ seçildiğinde ise hem çekicinin dışarıda kalma miktarı hem de treylerin içeride kalma miktarı azaldığı için çok daha istenen bir yol takibi karakteristiği ortaya çıkmaktadır. Şekil 7 ile her üç durumda hesaplanan nihai dümenleme komutları görülmektedir. Şekil 7 incelendiğinde TAPP ile yükselen takip performansına karşın dikkate değer bir genlik artışı veya çatırdama benzeri istenmeyen karakteristiklere rastlanmamıştır. Sayısal olarak sonuçları kıyaslamak istediğimizde ise maksimum genliklerde TAPP için $\lambda = 0$ olan durumdan %11 artış, $\lambda = 1$ olan durumdan %11 düşüş görülmüştür. RMS değerlerinde ise TAPP için $\lambda = 0$ olan durumdan %3 artış, $\lambda = 1$ olan durumdan %5 düşüş görülmüştür. Bu bilgiler ışığında kontrol eforunda problem yaratacak bir değişiklik yaşanmadan treyler takip performansının iyileştirilmiş olması yöntemin gücünü ortaya koymaktadır.



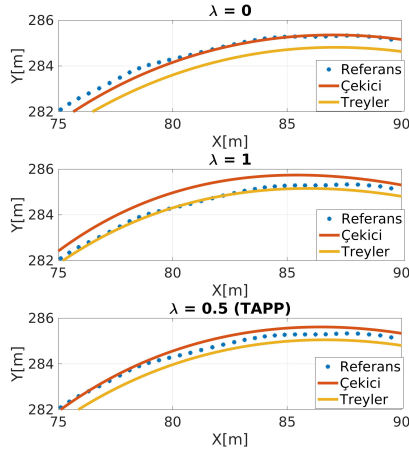
Şekil 5: Farklı λ değerleri için elde edilen yol takibi performanslarının yanıl takip hataları üzerinden karşılaştırılması.

5. Sonuçlar

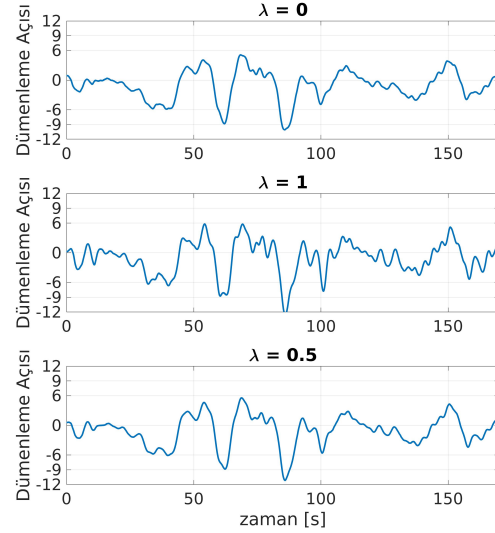
Bu çalışmada, çekici-treyler tipi araçların yörünge takibine yönelik olarak Treyler Farkındalıklı Saf Takip (TAPP) algoritması önerilmiştir. Benzetim çalışmaları, TAPP algoritmasının geleneksel saf takip algoritmasına kıyasla treylerin yol takibi performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, TAPP algoritmasının çekici ve treylerin arka akslarının yol takibini eş zamanlı olarak dikkate alarak daha arzulanan bir yol takibi karakteristiği sağladığını göstermektedir. Bu çalışma, çekici-treyler tipi araçlar için daha etkili yol takibi yöntemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Gelecekteki araştırmalar, TAPP algoritmasında λ parametresinin belirlenmesinde yenilikler üzerine odaklanabilir.

6. Kaynakça

- [1] J3016, *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, SAE - Society of Automotive Engineers, 2021.
- [2] ISO22737, *Intelligent transport systems - Low-speed automated driving (LSAD) systems for predefined routes - Performance requirements, system requirements and performance test procedures* SAE - Society of Automotive Engineers, 2021.
- [3] J. David ve P.V. Manivannan, "Control of truck-trailer mobile robots: a survey," *Intelligent Service Robotics*, Vol. 7, pp. 245-258, 2014.
- [4] N.H. Amer, H. Zamzuri, K. Hudha ve Z.A. Kadir, "Modelling and control strategies in path tracking control for autonomous ground vehicles: a review of state of the art and challenges," *Journal of intelligent & robotic systems*, Vol. 86, pp. 225-254, 2017.



Şekil 6: Farklı λ değerleri için elde edilen yol takibi performanslarının kartezyen koordinatlarında karşılaştırılması.



Şekil 7: Farklı λ değerleri için hesaplanan nihai dümenleme koutlarının karşılaştırılması.

- [5] R. Marino, S. Scalzi, ve M. Netto, "Nested PID steering control for lane keeping in autonomous vehicles," *Control Engineering Practice*, Vol. 19, No. 12, pp. 1459-1467, 2011.
- [6] R.C. Coulter, *Implementation of the pure pursuit path tracking algorithm*, Carnegie Mellon University, The Robotics Institute, 1992.
- [7] J.M. Snider, *Automatic steering methods for autonomous automobile path tracking*, Robotics Institute, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU-RITR-09-08, 2009.
- [8] S. Thrun, M. Montemerlo, H. Dahlkamp, D. Stavens, A. Aron, J. Diebel, P. Fong, J. Gale, M. Halpenny, G. Hoffman ve K. Lau, "Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge," *Journal of field Robotics*, Vol. 23, No. 9, pp. 661-692, 2006.
- [9] P. Falcone, F. Borrelli, J. Asgari, H.E. Tseng, ve D. Hrovat, "Predictive active steering control for autonomous vehicle systems," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 15, No. 3, pp. 566-580, 2007.
- [10] P.F. Lima, M. Nilsson, M. Trincavelli, J. Mårtensson, ve B. Wahlberg, "Spatial model predictive control for smooth and accurate steering of an autonomous truck," *IEEE Trans. on Intelligent Vehicles*, Vol. 2, No. 4, pp. 238-250, 2017.
- [11] G. Chen, J. Yao, H. Hu, Z. Gao, L. He ve X. Zhang, "Design and experimental evaluation of an efficient MPC-based lateral motion controller considering path preview for autonomous vehicle," *Control Engineering Practice*, Vol. 123, 105164, 2022.
- [12] A. Stentz, C. Dima, C. Wellington, H. Herman ve D. Stager, "A system for semi-autonomous tractor operations," *Autonomous Robots*, Vol. 13, pp. 87-104, 2002.
- [13] C. Urmson, C. Ragusa, D. Ray, J. Anhalt, D. Bartz, T. Galatali, A. Gutierrez, J. Johnston, S. Harbaugh, H. Kato Yu

ve W. Messner, "A robust approach to high-speed navigation for unrehearsed desert terrain," *Journal of Field Robotics*, Vol. 23, No. 8, pp. 467-508, 2006.

- [14] M. Park, S. Lee ve W. Han, "Development of steering control system for autonomous vehicle using geometry-based path tracking algorithm," *ETRI Journal*, Vol. 37, No. 3, pp. 617-625, 2015.
- [15] S.F. Campbell, *Steering control of an autonomous ground vehicle with application to the DARPA urban challenge*, Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [16] A. Lombard, X. Hao, A. Aabbas-Turki, A. El Moudni ve S. Galland, "Lateral control of an unmaned car using GNSS positioning in the context of connected vehicles," *Procedia Computer Science*, Vol. 98, pp. 148-155, 2016.
- [17] N. Evestedt, O. Ljungqvist ve D. Axehill, "Path tracking and stabilization for a reversing general 2-trailer configuration using a cascaded control approach," *Proc. of the 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Gothenburg, Sweden, 1156-1161, 2016.
- [18] C. Altafini, A. Speranzon ve K.H. Johansson, "Hybrid control of a truck and trailer vehicle," *International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control*, Berlin, Germany, 21-34, 2002.
- [19] J. Morales, J.L. Martínez, A. Mandow ve A.J. García-Cerezo, "Steering the last trailer as a virtual tractor for reversing vehicles with passive on-and off-axle hitches," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 12, pp. 5729-5736, 2013.
- [20] A.C. Manav, I. Lazoglu ve E. Aydemir, "Adaptive Path-Following Control for Autonomous Semi-Trailer Docking," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 71, No. 1, pp. 69-85, 2022.