

Otonom Bir Traktörün Yörünge Kontrolü

İkbal ESKİ

Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 32039 KAYSERİ
ikbal@erciyes.edu.tr

(Geliş/Received: 22.05.2016; Kabul/Accepted: 03.08.2016)

Özet

Günümüzde, tarım alanlarında işgücü maliyetini azaltmak için insansız tarım araçlarına ihtiyaç artmaktadır. Bu çalışmada insansız bir traktörün yörünge denetimi için gürbüz PID kontrol organı dizayn edilmiştir. Ayrıca geleneksel PID kontrol organı kullanılarak da, önerilen kontrol sisteminin performansı test edilmiştir. Altı farklı yörünge için sonuçlar grafikler halinde verilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, önerilen kontrol sistemi hem zaman alanı cevabı hem de sürekli rejim cevabı için geleneksel PID kontrol organına göre daha iyi sonuç vermiştir.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Traktör, PID Kontrol, Gürbüz Kontrol.

Trajectory Control of an Autonomous Tractor

Abstract

Nowadays, the need for unmanned agricultural vehicles is increasing to reduce labour costs in agriculture area. In this study, robust PID controller is designed for trajectory control of an unmanned tractor. Also, the performance of proposed control system is tested using conventional PID controller. The results for six different trajectories are given graphically. According to simulation results, the proposed control system for both time domain response and frequency domain response has given better than the conventional PID controller.

Keywords: Unmanned Tractor, PID Controller, Robust Controller.

1. Giriş

Günümüzde, tarımsal alanlarda verimliliği artırmak, işgücü maliyetini azaltmak ve insandan kaynaklanan hataları minimuma indirmek için, otonom zirai araçların kullanımına yönelik çalışmalar bu alandaki araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Çalışmanın bu bölümünde otonom traktörler ve otonom zirai taşıtların kontrolüne yönelik literatürdeki çalışmalara verilmiştir. Kayacan ve arkadaşları [1] otonom bir traktörün yörünge ve yalpa dinamiğini kontrolünü araştırmışlardır. Otonom traktörün yalpa açısı denetiminde model tahmin kontrol yapısı ve hız kontrolünde ise geleneksel PID kontrol organı kullanılmışlardır. Sistemin frekans alanı cevabı grafikler halinde verilmiştir. Deneysel çalışmalar da ise 40 cm ve 60 cm düz çizgi yörüngeleri referans alınmıştır, önerilen kontrol yapısının oldukça düşük hata sonuçları ile istenilen yörüngeleri takip ettiği görülmüştür. Otonom bir traktör-römork sisteminin yörünge kontrolü yine Kayacan ve arkadaşları [2] tarafından araştırılmıştır. Önerilen model tahmin esaslı

kontrol algoritmasının istenilen yörüngeyi olumsuz çevre şartlarına rağmen izlediği görülmüştür. Han ve arkadaşları [3] otomatik yönlendirmeli bir traktörün yörünge kontrolünü araştırmışlardır ve Kore pirinç tarlalarında bu traktörü test etmişlerdir. Gerçek tarım dönüş yörüngeleri kullanılarak kontrolcü dizayn edilmiş ve 60kW Kore yapımı bir traktöre GPS sistemi, yönlendirme bilgisayarı, sürüş kontrolcüsü ve elektrik motorları entegre edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre düz hat boyunca ilerleyen traktör için 3.8-12.8 cm aralığında hata değerleri elde edilmiştir. Traktörlerin yörünge izleme problemi için kademeli PD kontrol organı Zhang ve arkadaşları [4] tarafından integral hata performans indeks kriterine göre dizayn edilmiştir. Önerilen kontrolcünün performansı simülasyon sonuçları ile değerlendirilmiştir. Bayar ve arkadaşları [5], insansız meyve bahçelerinde kullanılan taşıtların yörünge izleme performansını araştırmışlardır. Çalışmalarında tekerlek kayma tahmin yapısı geliştirmişler ve bu yapıyı da insansız taşıta entegre etmişlerdir. Geliştirilen bu yapıyı meyve

bahçelerinde test ederek, yüksek hassasiyetle yörünge izleme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Yang ve Naguchi [6], robot traktörlerin güvenli çalışması için engelleri belirleyen bir yöntem geliştirmişlerdir. Önerilen yapıyı otonom traktörlere entegre etmişler ve tarım alanlarında, gün içerisinde farklı çalışma saatlerinde başarı bir biçimde engelleri tespit ettiği görülmüştür. Karkee ve Steward [7] traktörün parametre tahmini için dinamik bir model geliştirmişler ve bu modeli de traktöre entegre etmişlerdir. Deneysel çalışmalarda üç farklı yörünge kullanmışlardır. Bunlar; basamak, rastgele ve testere yörüngeleridir. Traktör için 4,5 m/sn ve iki farklı arazi seçilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, önerilen teknik, 0.05-0.83 m hata değerleri ile istenilen yörüngeyi takip etmektedir. Otomatik yönlendirmeli traktör için görüntü temelli mahsul sırası belirleme metodu Kise ve arkadaşları [8] tarafından geliştirilmiştir. Önerilen sistem soya fasulyesi ekili araziler üzerinde test edilmiştir. Traktörün 3 m/sn çalışma şartlarında 0.05 m den daha az yanal sapma yaptığı görülmüştür. Bodur ve arkadaşları [9] tarafından traktörler için otomatik yörünge izleme sistemi dizayn edilmiştir. Önerilen kontrol sisteminin ana amacı, tipik tarım işlerinde istenilen yörüngeyi izleyebilmesidir. Tu [10] zirai taşıtların farklı dönüş yörüngeleri için geliştirilen kontrol yapılarını araştırmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Otonom traktörün matematiksel modeli

Otonom traktörün sistematik diyagramı Şekil 1'de ve otonom traktöre ait parametreler ise Tablo 1'de verilmiştir. Traktörün \dot{x} ve \dot{y} lineer hızları aşağıda verilmiştir;

$$\cos \emptyset - v_y \sin \emptyset \quad (1)$$

$$\dot{y} = v_x \sin \emptyset + v_y \cos \emptyset \quad (2)$$

Burada v_x ; traktörün ağırlık merkezinin uzunlamasına hızı, v_{xy} ; traktörün ağırlık merkezinin yanal hızı ve \emptyset ; traktörün yalpa açısıdır. Traktörün yanal hareket eşitliği;

$$M(\dot{v}_y + v_x \dot{\emptyset}) = F_{tf} \sin \delta + F_{lf} \cos \delta + F_{lr} \quad (3)$$

Burada M ; traktörün kütlesi, γ ; traktörün yalpa hızı, F_{tf} ; traktörün ön tekerine etkiyen çekiş kuvveti, δ ; traktörün ön tekerinin yönlendirme açısı, F_{lf} ; traktörün ön tekerine etkiyen yanal kuvvet ve F_{lr} ; traktörün arak tekerine etkiyen yanal kuvvettir [1]. Traktörün yalpa hareket eşitliği;

$$I\dot{\gamma} = l_f (F_{tf} \sin \delta + F_{lf} \cos \delta) - l_r F_{lr} \quad (4)$$

Burada l_f ; traktörün ağırlık merkezinin ön aksa olan uzaklığı, l_r ; traktörün ağırlık merkezinin arka aksa olan uzaklığı ve I ; traktörün atalet momentidir.

$$I = M l_f l_r \quad (5)$$

Tekerlek yanal kuvvetlerinin lineer modeli;

$$\begin{aligned} F_{lf} &= -c_{\alpha f} \alpha_f \\ F_{lr} &= -c_{\alpha r} \alpha_r \end{aligned} \quad (6)$$

Burada $c_{\alpha f}$; ön tekerin cornering stiffness katsayısı, $c_{\alpha r}$; arka tekerin viraj katsayısı, α_f ; ön tekerin yanal kayma açısı ve α_r ; arka tekerin yanal kayma açısıdır. Tekerlek yanal kayma açıları;

$$\begin{aligned} \alpha_f &= \frac{v_y + l_f \gamma}{v_x} - \delta \\ \alpha_f &= \frac{v_y + l_f \gamma - v_x (\delta + \alpha_f)}{\sigma_f} - \delta \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \alpha_r &= \frac{v_y - l_r \gamma}{v_x} \\ \alpha_r &= \frac{v_y - l_r \gamma - v_x \alpha_r}{\sigma_r} \end{aligned} \quad (8)$$

Burada σ_f ; ön lastiğin gevşeme uzunluğu ve σ_r ; arka lastiğin gevşeme uzunluğudur. Traktörler tarım arazilerinde genellikle sabit hızla hareket ederek zirai faaliyetlerini gerçekleştirirler. Bu durumda $\dot{v}_x = 0$ olarak traktörün yönlendirme açısı için doğrusal denklemler aşağıda verilmiştir.

$$M\dot{v}_y = -M v_x \dot{\emptyset} - c_{\alpha f} \alpha_f - c_{\alpha r} \alpha_r \quad (9)$$

$$I\dot{\gamma} = -l_f c_{\alpha f} \alpha_f + l_r c_{\alpha r} \alpha_r \quad (10)$$

Eşitlik 9 ve 10 kullanılarak otonom traktör için ön tekerin yönlendirme açısı transfer fonksiyonu;

$$G(s) = \frac{as^2+bs+c}{ds^4+es^3+fs^2+gs+h} \quad (11)$$

Transfer fonksiyonuna ait parametreler aşağıda verilmiştir.

$$a = \frac{c_{\alpha f} l_f v_x}{I \sigma_f},$$

$$b = \frac{c_{\alpha f} l_f v_x^2}{I \sigma_f \sigma_r},$$

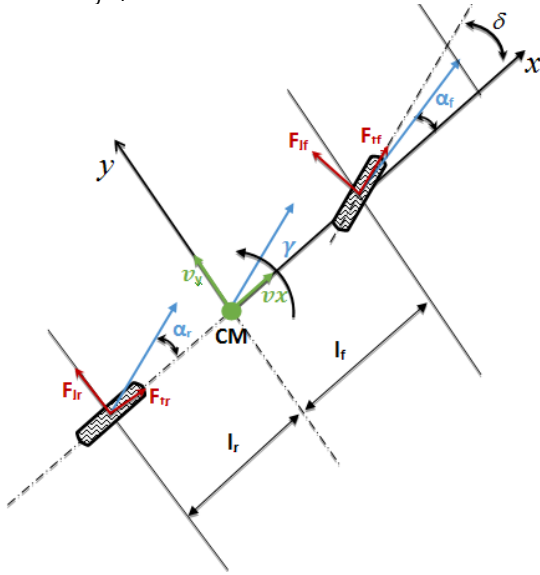
$$c = \frac{c_{\alpha f} c_{\alpha r} (l_f + l_r) v_x}{I M \sigma_f \sigma_r},$$

$$d = 1, \quad e = \frac{(\sigma_f + \sigma_r) v_x}{\sigma_f \sigma_r},$$

$$f = \frac{I(M v_x^2 + c_{\alpha f} \sigma_r + c_{\alpha r} \sigma_f) + M(c_{\alpha f} l_f^2 \sigma_r + c_{\alpha r} l_r^2 \sigma_f)}{I M \sigma_f \sigma_r}$$

$$g = \frac{I(c_{\alpha f} + c_{\alpha r}) + M v_x (c_{\alpha f} l_f^2 + c_{\alpha r} l_r^2 - c_{\alpha f} l_f \sigma_r + c_{\alpha r} l_r \sigma_f)}{I M \sigma_f \sigma_r}$$

$$h = \frac{c_{\alpha f} c_{\alpha r} (l_f + l_r)^2}{I M \sigma_f \sigma_r}$$



Şekil 1. Otonom traktörün bisiklet modeli

Tablo 1. Otonom traktörün parametreleri[1]

Süspansiyon Parametresi	Değeri
M	800 kg
l_f	1 m
l_r	0.5 m
$c_{\alpha f}$	8500 Ns/m
$c_{\alpha r}$	9000 Ns/m
I	280 kg m ²
σ_f	0.2 m
σ_r	1.6 m

2.2. Gürbüz PID kontrol sistemi (GPID)

Otonom traktörün yörünge kontrolünde gürbüz esaslı PID kontrol sistemi kullanılmıştır. Önerilen kontrol sisteminin performansını test etmek için, ayrıca klasik PID kontrol organı da kullanılmıştır. Önerilen kontrol sistem sinyali;

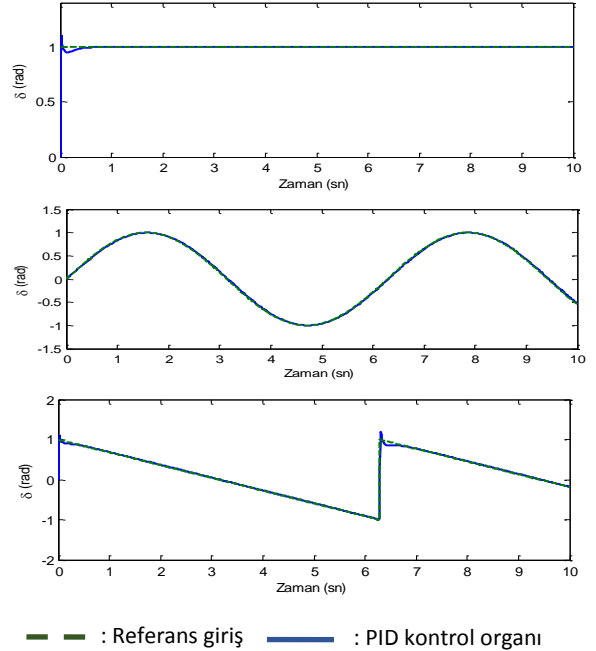
$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} (e^{-Rt}) \quad (12)$$

$$e(t) = q_r(t) - q_a(t)$$

Burada $q_r(t)$ referans yörünge, $q_a(t)$ gerçekleşen yörünge değeridir. PID kontrol organının parametreleri Matlab tune özelliği kullanılarak ayarlanmıştır. Orantı, integral ve türev kazanç parametreleri sırasıyla; 7.56, 38.32 ve 0.375 olarak tespit edilmiştir. Gürbüz yapının R parametresi ise 200000 olarak belirlenmiştir.

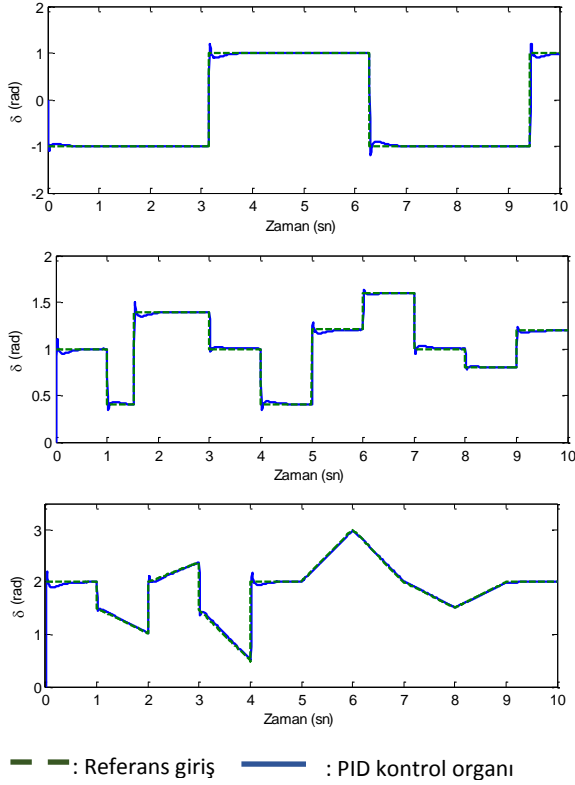
3. Sonuçlar

Bu bölümde altı farklı yörünge için otonom traktörün denetimi için dizayn edilen PID kontrol organı ve Gürbüz PID kontrol sisteminin sonuçları verilmiştir. Şekil 1'de birim basamak, sinüzoidal ve testere şeklinde direksiyon açıları için PID kontrol organının sonuçları verilmiştir.

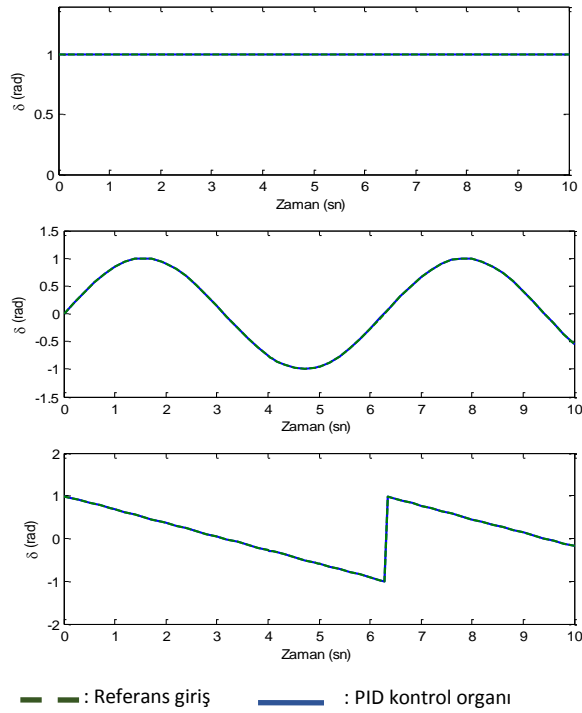


— — : Referans giriş — — : PID kontrol organı

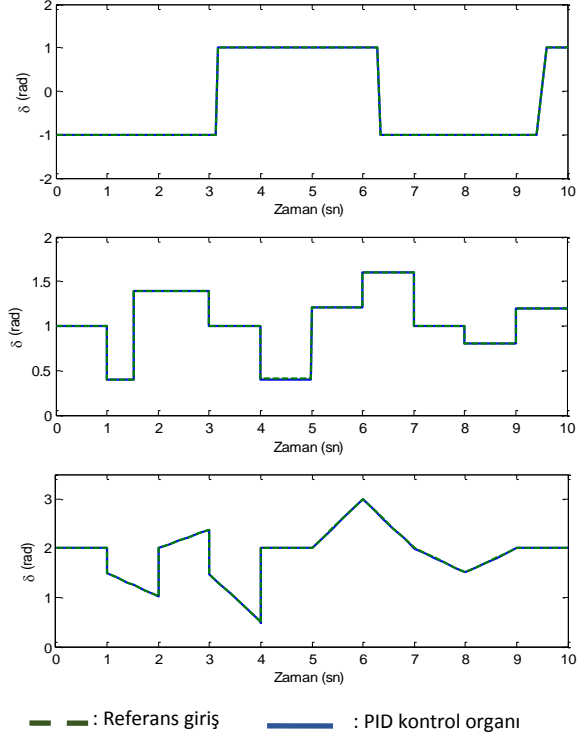
Şekil 2. Basamak, sinüzoidal ve testere direksiyon giriş açıları için otonom traktörün PID kontrol organı sonuçları



Şekil 3. Kare, rastgele 1 ve rastgele 2 direksiyon giriş açıları için otonom traktörün PID kontrol organı sonuçları



Şekil 4. Basamak, sinüzoidal ve testere direksiyon giriş açıları için otonom traktörün GPID kontrol sistemi sonuçları



Şekil 5. Kare, rastgele 1 ve rastgele 2 direksiyon giriş açıları için otonom traktörün GPID kontrol sistemi sonuçları

Şekil 2'den de görüldüğü gibi PID kontrol organı sinüzoidal açı değişimlerini iyi takip edebilmekte, basamak ve testere sinyallerinde, değişim noktalarında aşma meydana gelmektedir.

Şekil 3'de ise kare ve rastgele giriş sinyalleri için PID kontrol organının sonuçları verilmiştir. Yine sinyallerin değişim noktalarında aşma meydana gelmektedir.

GPID kontrol sisteminin aynı direksiyon giriş sinyalleri için sonuçları Şekil 4 ve 5'de verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi önerilen kontrol sistemi verilen giriş sinyallerini, endüstride yaygın olarak kullanılan PID kontrolcüye göre çok daha iyi izleyebilmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, otonom bir traktörün yörünge kontrolünde klasik PID kontrol organı ve Gürbüz PID kontrol sistemi kullanılmıştır. Altı farklı yörünge için önerilen kontrol sisteminin performansı test edilmiştir. Yörüngelerin maksimum ve minimum noktalarında PID kontrol organı tam olarak yörüngeyi

izleyememektedir. Önerilen kontrol sistemi ise, yörüngelerin minimum ve maksimum noktaları da dâhil yörüngeleri çok daha iyi takip ettiği görülmüştür. Gürbüz yapıdaki eksponansiyel ifade hatayı hızlı bir şekilde azalttığı için farklı yörüngeleri çok daha iyi takip etmiştir.

5. Kaynaklar

1. Kayacan, E., Kayacan, E., Ramon, H. and Saeys, W. (2015). Towards agrobots: Identification of the yaw dynamics and trajectory tracking of an autonomous tractor. *Comput. Electron. Agric.*, **115**: 78–87.
2. Kayacan, E., Kayacan, E., Ramon, H. and Saeys, W. (2014). Distributed nonlinear model predictive control of an autonomous tractor–trailer system. *Mechatronics*, **24**: 926–933.
3. Han, X.Z., Kim, H.J., Kim, J.Y., Yi, S.Y., Moon, H.C., Kim, J.H. and Kim, Y.J. (2015). Path-tracking simulation and field tests for an auto-guidance tillage tractor for a paddy field. *Comput. Electron. Agric.*, **112**: 161–171.
4. Zhang, M., Lin, X. and Yin, W. (2013). An improved tuning method of fractional order proportional differentiation (FOPD) controller for the path tracking control of tractors. *Biosyst. Eng.*, **116**: 478–486.
5. Bayar, G., Bergerman, M., Konukseven, E. and Koku, A.B. (2016). Improving the trajectory tracking performance of autonomous orchard vehicles using wheel slip compensation. *Biosyst. Eng.*, **146**: 149–164.
6. Yang, L. and Noguchi, N. (2012). Human detection for a robot tractor using omni-directional stereo vision. *Comput. Electron. Agric.*, **89**: 116–125.
7. Karkee, M. and Steward, B.L. (2011). Parameter estimation and validation of a tractor and single axle towed implement dynamic system model. *Comput. Electron. Agric.*, **77**: 135–146.
8. Kise, M., Zhang, Q. and Mas, F.R. (2005). Stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance. *Biosyst. Eng.*, **90**: 357–367.
9. Bodur, M., Kiani, E. and Hacışevki, H. (2012). Double look-ahead reference point control for autonomous agricultural vehicles. *Biosyst. Eng.*, **113**: 173–186.
10. Tu, X. (2013). Robust navigation control and headland turning optimization of agricultural vehicles. Doktora tezi, Iowa State University Ames, Iowa, 180s.