



OTOMATİK YÖNLENDİRMELİ BİR ARACIN GÖVDE HIZI VE GÖVDE AÇISININ BULANIK MANTIK İLE GERÇEK ZAMANLI KONTROLÜ

REAL TIME FUZZY BASED SPEED AND DIRECTION ANGLE CONTROL OF AN AUTOMATED GUIDED VEHICLE

Abdullah BAŞÇI^{1*}, Adnan DERDİYOK¹, Emrah MERCAN²

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye.
abasci@atauni.edu.tr, derdiyok@atauni.edu.tr

²Akçakoca Meslek Yüksek Okulu, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye.
emrahmercan@duzce.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 22.11.2013, Kabul Tarihi/Accepted: 01.04.2014
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2014.50023
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, Otomatik Yönlendirmeli Aracın (OYA) gövde hızı ve gövde açısı kontrolü gerçek zamanlı olarak bulanık mantık kontrolcü ile gerçekleştirilmiştir. OYA'nın gövde hızı ve gövde açısı denetimi ile aracın iki boyutlu düzlemde istenilen yörüngeyi takip etmesi sağlanmıştır. Ayrıca, bulanık mantık kontrolcünün performansı PI kontrolcü ile mukayese edilmiş ve deneysel sonuçlar bulanık mantık kontrolcünün PI kontrolcüye oranla daha kararlı ve daha uygun kontrol işaretleri ürettiğini ve dinamik değişimlere daha hızlı cevap verdiğini göstermiştir. Kontrolcü performansları ayrıca ani harici bozucu etki ve ekstra yük için incelenmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Araç sistemi, Yön kontrolü, Yörünge takibi, Bulanık kontrol

Abstract

In this paper a fuzzy controller is applied to velocity and direction angle control of a certain type of wheeled mobile robots called Automated Guided Vehicles (AGVs). The velocity and direction angle of the AGV are controlled to keep the vehicle on desired path. A PI controller is also applied to AGV in order to show the robustness of the fuzzy controller. Experimental results prove that the fuzzy controller shows better tracking performance than the PI controller in terms of robustness, smoothness and fast dynamics. Results are also given for sudden disturbance and extra load conditions and satisfied results are obtained.

Keywords: Vehicle system, Direction control, Path tracking, Fuzzy control

1 Giriş

Robotlar, insanlar açısından yerine getirilmesi güç veya riskli olan görevleri, daha verimli ve güvenilir olarak gerçekleştirerek, insan hayatını kolaylaştırmayı sağlayan araçlardır. Bu özelliklerinden dolayı, mobil robotların kullanıldığı alanlar her geçen gün artmaktadır. Uzay keşif araçları [1], engelli destek sistemleri [2], ev temizlik sistemleri [3], fabrika otomasyon sistemleri [4], lojistik [5],[6] ve ulusal güvenlik alanlarında [7] mobil robotlar üzerine yapılan çalışmalar bu ilginin bir göstergesidir.

Mobil robotlar, hareket sistemleri bakımından değerlendirildiğinde, tekerlekli hareket sistemine sahip mobil robotlar, tasarım sadeliği ve kontrol kolaylığı gibi üstünlükleri ile öne çıkmaktadır. Literatürde Otomatik Yönlendirmeli Araç (OYA) olarak da adlandırılan [4] tekerlekli mobil robotlar, birçok çalışmada kullanılmıştır. Holonomik OYA'ların hareket ve manevra kabiliyetleri yüksek olmasına rağmen, mekanik tasarımlarındaki zorluklardan ve çok sayıda tahrik elemanı gerektirdiklerinden dolayı, çalışmalarda holonomik olmayan OYA'lara nazaran daha az tercih edilmişlerdir. Holonomik olmayan sistemleri holonomik sistemlerden ayıran en önemli özellik, holonomik olmayan sistemlerin yönlendirilebilmesi için konum değişkenlerinin (x,y) , türevlerinin farkına $(\dot{x} - y \neq 0)$ ihtiyaç duyulmasıdır [8].

Otomatik yönlendirmeli araçların kontrolü ile ilgili yapılan çalışmaların çoğunda kullanılan kontrolcüler yalnız aracın kinematiği dikkate alınarak geliştirilmiş olup araç dinamiğini göz önünde bulundurmamışlardır [9]-[11]. Yüksek hız veya

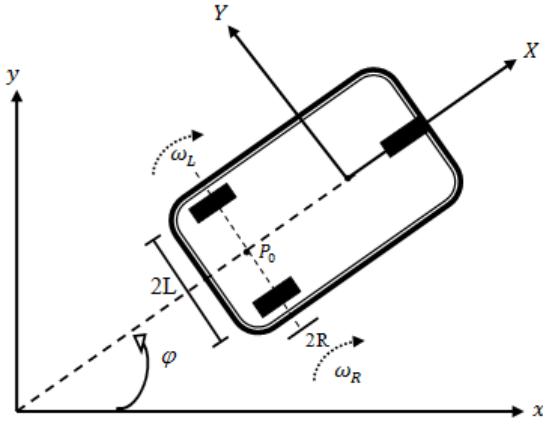
ağır yüklerin taşınması gibi araç dinamiğinin etken olduğu durumlarda istenen yörünge kontrolünü sadece araç kinematiğini dikkate alan kontrolcülerle gerçek zamanlı olarak gerçekleştirmek zor olacağından farklı çözüm önerileri sunulmuştur. İlk olarak araç kinematiğine dayalı olarak geliştirilen kontrolcüler ile araç dinamiğini kullanan kontrolcülerin bütünleştirilmesi önerilmiştir [12]. Ancak, pratikte dinamik parametrelerin elde edilmesi zor ve sistemin tam olarak modellenmesi güç olduğundan, sistemin matematiksel modelinin kesin olarak bilinmesine gerek duymayan kontrolcüler önerilmiştir. Önerilen kontrolcü yapılarının karmaşıklığı ve uygulama zorlukları [13]-[15], gerçek zamanlı olarak çalışmalarında düşük performans sergilemeleri [16],[17] ve üretilen kontrol işaretlerinin yüksek osilasyon içermeleri [18],[19] gibi zorluklar bu kontrolcülerin uygulamalarda yaygın olarak kullanılmasını önlemiştir.

Buna karşın, dilsel ifadeler kullanılarak oluşturulan kural tabloları yardımıyla, modellenmesi güç ve karmaşık olan sistemler dahi, bulanık Kontrolcüler ile gürbüz olarak kontrol edilebilir. Bundan dolayı, OYA'ların karmaşık kontrol problemleri ile ilgilenenler, çoğunlukla bulanık kontrolcülerini tercih etmiştir [20]-[23].

Bulanık kontrolcülerin, dinamiği tam olarak tanımlanamayan veya elde edilemeyen sistemlere kolayca uygulanabilir olmaları [24]-[26], sistem kararlılığını artırabilmeleri, lineer olmayan dinamik sistemlere kolayca uygulanabilirliği, karmaşık yapıda olmamaları ve esnek olmaları kontrolcü yapılarını güçlü kılmıştır.

2 Araç Modeli

Bu çalışmada, önde iki arkada bir tekerleği olan ve Şekil 1'de gösterilen OYA yapısı üzerinde durulmuştur. OYA'nın ön kısmında bulunan iki tekerlek birbirinden bağımsız olarak denetlenen motorlara bağlıdır. Dolayısıyla tekerleklerin hareketleri birbirlerini etkilemez. Farklı devirlerde hatta ters yönde de dönebilirler. Ön tekerlekler, aracı ileri ve geri hareket ettirirken aynı zamanda farklı devirlerde dönerek aracın yön değiştirmesini de sağlamaktadırlar. Böylece yönlendirme için ayrı bir motor kullanmaya gerek duyulmamaktadır. Bu da hem daha küçük ve hem de daha düşük maliyetli bir araç yapısı elde etmemizi sağlamaktadır. Arkadaki tekerlek serbest dönen tekerlek olup aracı dengede tutmak ve ön tekerlekler üzerine düşen yükün azaltılması için kullanılmıştır.



Şekil 1: Araç modeli.

Kinematik ve dinamik modeli aşağıda [27] detaylı olarak verilen araç için $x-y$ eksenleri global eksenleri, $X-Y$ eksenleri ise lokal eksenleri göstermektedir. P_0 noktası iki tekerlek arasındaki orta noktayı, L her bir tekerleğin P_0 noktasına olan uzaklığını, R tekerlek yarıçapını, ω_R ve ω_L sırasıyla sağ ve sol tekerlek açısal hızlarını, v aracın gövde hızını ve φ araç ekseninin x eksenine yaptığı açığı göstermektedir.

$$v_R = R\omega_R \quad (1)$$

$$v_L = R\omega_L \quad (2)$$

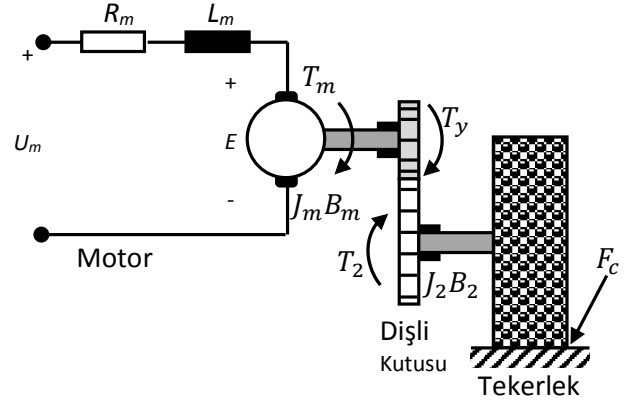
$$v = \frac{v_R + v_L}{2} = \frac{R}{2}(\omega_R + \omega_L) \quad (3)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{R}{2L}(\omega_R - \omega_L) \quad (4)$$

$$\frac{dx}{dt} = v_x = v \cos \varphi \quad (5)$$

$$\frac{dy}{dt} = v_y = v \sin \varphi \quad (6)$$

Şekil 2'de OYA'nın ön tarafında bulunan tekerleklerinden biri ve buna ait sürücü düzeneği görülmektedir. Burada kullanılan serbest uyarlamalı doğru akım motorunun ürettiği moment bir dişli kutusu üzerinden tekerleğe iletilmektedir. Motor tarafından üretilerek dişli kutusuna aktarılan moment aşağıdaki gibi yazılabilir.



Şekil 2: Tekerlek ve sürücü düzeneği.

$$T_m = J_m \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m}{dt} + T_y \quad (7)$$

Burada, J_m atalet momenti katsayısını, B_m sürtünme momenti katsayısını ve T_y yük momentini göstermektedir. Yük momenti,

$$T_y = n^2 J_2 \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} + n^2 B_2 \frac{d\theta_m}{dt} + n F_c \frac{\theta'_m}{|\theta'_m|} \quad (8)$$

olarak verilir. Burada, n dişli çevrim oranı, F_c ise Coulomb sürtünme momenti katsayısıdır.

(7) ve (8) eşitlikleri yardımıyla,

$$\frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = -\alpha_1 \frac{d\theta_m}{dt} - \alpha_2 \text{sign}(\theta'_m) + \alpha_3 T_m \quad (9)$$

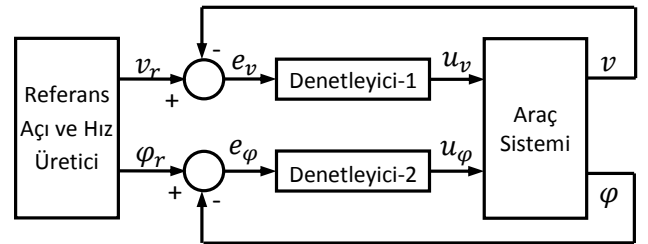
denklemini yazılabilir. Burada $\text{sign}(\cdot)$ durum değişkenlerinin işaretlerini ifade eder ve α_1, α_2 ve α_3 katsayıları ise,

$$\alpha_1 = \frac{B_m + n^2 B_2}{J_m + n^2 J_2}, \alpha_2 = \frac{n F_c}{J_m + n^2 J_2}, \alpha_3 = \frac{1}{J_m + n^2 J_2} \quad (10)$$

denklemleri ile belirtilmektedir.

3 Bulanık Mantık Kontrolcü

Şekil 3'te blok diyagramı verilen bulanık mantık kontrolcü, araç gövde hızı ve gövde açısının referans gövde hızı ve gövde açısını takip etmesini sağlamaktadır. Araç gövde hızı ve gövde açısı denklem (3) ve (4)'te gösterildiği gibi her bir motorun açısal hızlarının kullanılması ile elde edilir. Blok diyagramından da görüldüğü gibi, kontrolcü gövde hızı ve gövde açısı hata değerlerini (e_v, e_φ) kullanarak, çıkış olarak u_v ve u_φ kontrol işaretlerini üretmektedir.



Şekil 3: Sistem blok diyagramı.

Blok diyagramından da görüldüğü gibi denetleyici iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım hız hatasını ikinci kısım ise açı

hatasını işlemektedir. Her iki denetleyici aynı kural tablosunu kullanmaktadır. Denetleyici girişine sistemin hatası $e(k)$ ile bu hatanın değişimi $de(k)$ gelmektedir. Hata ile hatanın değişimi bulanıklaştırma işlemine tabi tutularak, bulanık kümelerle göre üyelik dereceleri belirlenir. Bu üyelik derecelerine göre denetim işaretinin ne kadar artırılması veya azaltılması gerektiğini belirleyen $du(k)$ 'nin üyelik derecesi bulunur. Daha sonra durulaştırma işlemi ile $du(k)$ hesaplanır. Son adımda bir önceki denetim işareti $u(k)$ ile $du(k)$ toplanarak denetim işareti $u(k + 1)$ hesaplanmıştır olur.

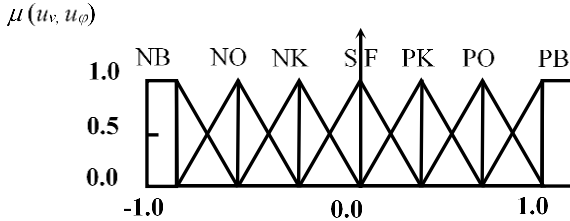
$$u(k + 1) = u(k) + du(k) \quad (11)$$

Araç sistemi için oluşturulan kurallar Tablo 1'de gösterilmiştir. Yedi adet üyelik fonksiyonu oluşturulduğu için tablo 49 kuraldan oluşmuştur.

Tablo 1: Bulanık mantık kural tablosu.

e de	NB	NO	NK	SF	PK	PO	PB
NB	NB	NB	NB	NO	NK	NK	SF
NO	NB	NO	NO	NO	NK	SF	PK
NK	NB	NO	NK	NK	SF	PK	PO
SF	NB	NO	NK	SF	PK	PO	PB
PK	NB	NK	SF	PK	PK	PO	PB
PO	NB	SF	PK	PO	PO	PO	PB
PB	NB	PK	PK	PO	PB	PB	PB

Hata, hatanın değişimi ve kontrol girişi için tanımlanan üyelik fonksiyonları aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 4: Üyelik fonksiyonları.

4 Deneysel Sonuçlar

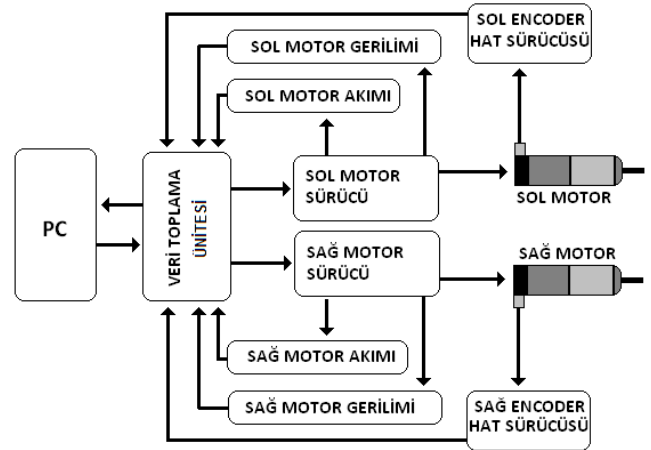
Şekil 5'te uygulamaların gerçekleştirildiği araç 0.80 m yükseklik, 0.45 m genişlik ve 0.70 m uzunluğunda olup toplamda 17 kg'dır. Blok diyagramı Şekil 6'da verilen araç üzerinde enkoder ve redüktörlü yapıda iki DC motor, PC-DAQ kartı, analog motor sürücü devresi ile uygulama yazılımının gerçekleştirildiği işletim sistemi ve bilgisayar bulunmaktadır. Motor sürücü kartı üzerinde, sağ ve sol motoru ayrı ayrı sürmek için iki adet sürücü devresi bulunmaktadır. Bu sürücü devreler, veri toplama kartından gelen analog sinyalin genliği ile doğru orantılı olarak, çıkış sinyalinin genliğini ayarlamaktadırlar. Araç gövde hızı ve gövde açısı değerleri tekerleklerde kullanılan DC motorlar üzerindeki enkoder'ler vasıtasıyla hesaplanmaktadır. Araç kinematik denklemleri kullanılarak araç gövde hızı ve açısından araç yörüngesi elde edilmektedir.

Araç gövde hızı ve gövde açısı kontrolü gerçek zamanlı olarak bulanık mantık kontrolcünün performansını göstermek için

farklı durumlar altında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bulanık kontrolcünün performansı PI kontrolcü ile mukayese edilmiştir. İlk olarak kontrolcü performansları sinüs gövde hızı ve sinüs gövde açısı referansları için test edilmiştir. Referans işaretlerin maksimum genlikleri gövde hızı için 0.25 m/s ve gövde açısı için 1 rad olarak verilmiştir. Her iki referans işaret için frekans değerleri 0.1 Hz olarak alınmıştır. Uygulama sonuçları aracın 15 saniyelik hareketini göstermektedir.



Şekil 5: Otomatik yönlendirmeli araç.



Şekil 6: Araç blok diyagramı.

Araç kontrol sisteminde PI kontrolcü kullanılması sonucu gerçekleşen uygulama sonuçları Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekilde, referans ve ölçülen araç gövde hızı ve gövde açısı ile birlikte motor kontrol işaretleri, referans ve gerçek yörünge verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi araç gerçek gövde hızı ve gövde açısı referans gövde hızı ve gövde açısını çok az hata ile takip etmektedir. Kontrolcünün ürettiği kontrol işaretinin küçük genlikli salınımlar içermesinden dolayı gerçek araç gövde hızı ve gövde açısının referans gövde hızı ve açısı etrafında sürekli olarak küçük salınım yapmasına neden olmuştur. Kontrolcünün araç gövde hızı ve gövde açısının referans gövde hızı ve gövde açısı takibini çok küçük hatalar ile gerçekleştirmesinden dolayı gerçek yörünge ile referans yörünge birbirini çok az hata ile takip etmiştir.

Kontrol sisteminde bulanık kontrolcü kullanılması sonucu gerçekleşen uygulama sonuçları Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi bulanık kontrolcü araç gövde hızı ve gövde açısı kontrolünü PI kontrolcüye oranla daha az hata ile gerçekleştirmektedir. Bulanık kontrolcünün ürettiği kontrol

işaretinin PI kontrolcüye oranla daha küçük salınım içermesi gövde hızı ve gövde açısı hata değerlerinin küçülmesine neden olmuştur.

Son olarak, kontrolcü performansları sinüs gövde hızı ve sinüs gövde açısı referanslarının anlık bozucu etki ve ekstra yük altında testi gerçekleştirilmiştir. Kontrolcünün yük değişimleri ve anlık bozucu etkiye karşı gürbüzlüğünü test etmek amacıyla araç yüküne 13 kg ayrıca yük eklenmiş ve araç hareketi esnasında yaklaşık olarak 7-8. saniye civarında anlık bozucu etki uygulanmıştır. Harici anlık bozucu etki, araç hareket yönüne yanal olarak kuvvet uygulanması sonucu gerçekleştirilmiştir.

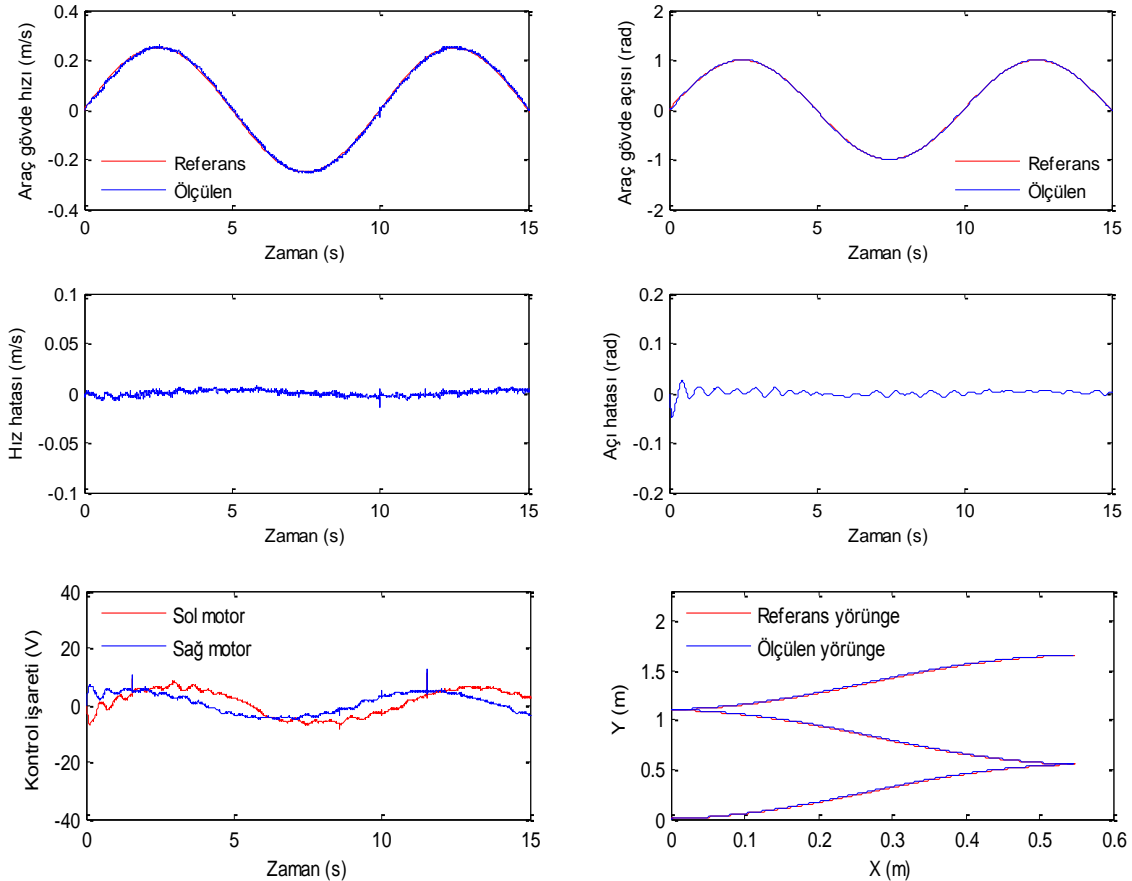
Araç kontrol sisteminde PI kontrolcü kullanılması sonucu gerçekleşen uygulama sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi araç sisteminde yük değişiminden sonra PI kontrolcünde referans gövde hızı ve gövde açısının takibinde hata miktarı artmıştır. Ayrıca, gerçek hız ve açının referans değerler etrafında yaptıkları salınımın genlik değerlerinin de arttığı görülmektedir.

Şekilden PI kontrolcünün uygulanan harici anlık bozucu etkiye hızlı cevap veremediği görülmüştür. Kontrolcünün uygulanan harici anlık bozucu etkiye geç telafi etmesi, bozucu etki süresince referans gövde hızı ve gövde açısı değerleri ile gerçek gövde hızı ve gövde açısı değerleri arasındaki hatanın artmasına neden olmuştur. Gerek yük değişimlerinden dolayı referans hız ve açı etrafında yapılan salınımın ve gerekse de PI kontrolcünün uygulanan anlık bozucu etkiden fazla etkilenmesi gerçek yörünge ile referans yörünge arasındaki hatanın artmasına neden olmaktadır.

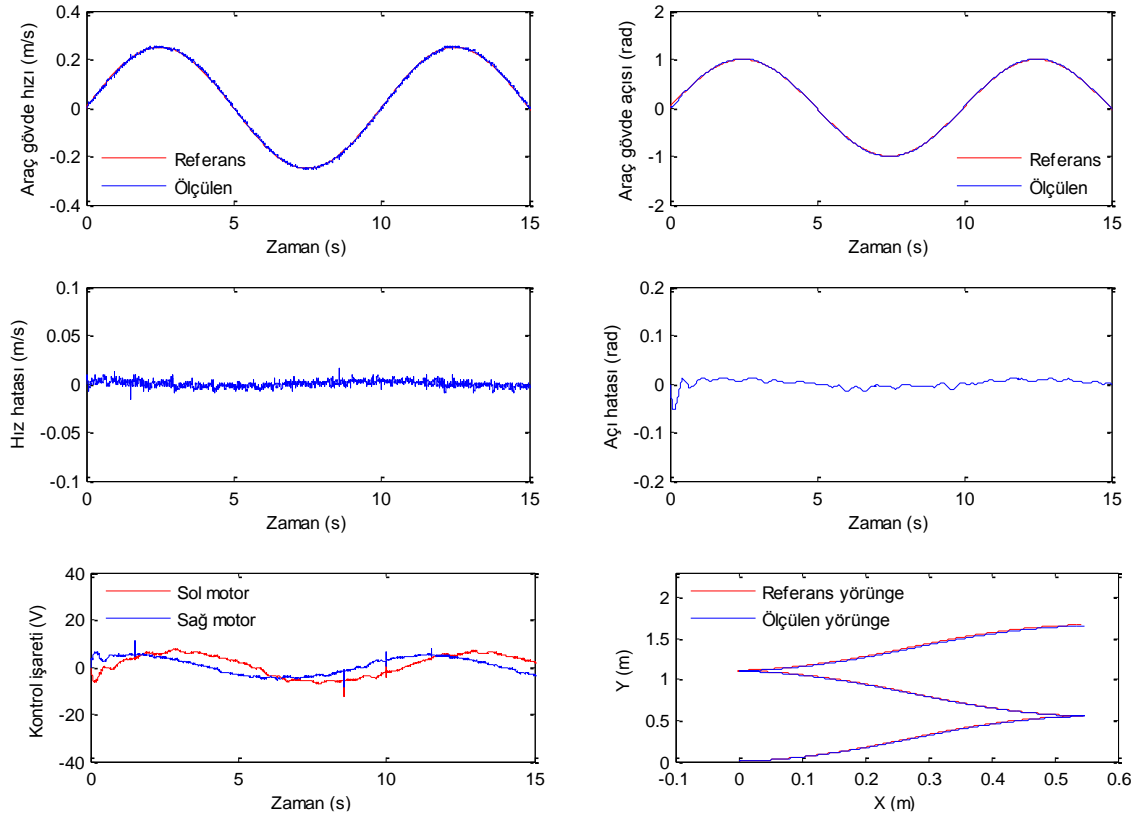
Araç kontrol sisteminde bulanık kontrolcü için araçtaki yük değişimi ve uygulanan anlık bozucu etki sonucu gerçekleşen uygulama sonuçları Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi bulanık kontrolcü gövde hızı ve gövde açısı takibini PI kontrolcüye oranla daha az aşım ile gerçekleştirmektedir. Ayrıca, kontrolcünün uygulanan ekstra yüke verdiği cevabı yük olmama durumuna karşı verdiği cevapla mukayese edildiğinde referans gövde hızı ve gövde açısı takibinde oluşan hatada önemli bir değişimin olmadığı görülmektedir. Hatada kayda değer bir artışın olmaması kontrolcünün dinamik değişimlerden önemli ölçüde etkilenmediğini göstermektedir.

Bulanık kontrolcünün, uygulanan ekstra yük ve ani değişimleri yakalamak için PI kontrolcüye oranla daha uygun kontrol işaretleri üreterek kendisini sistemde meydana gelen değişimlere adapte ettiği görülmektedir. Bulanık kontrolcünün uygulanan harici anlık bozucu etkiye PI kontrolcüye oranla daha hızlı cevap verdiği ve anlık bozucu etkinin sistem üzerindeki etkisini daha kısa sürede elimine ettiği görülmektedir. Bu da bulanık kontrolcünün araç yörünge kontrolünü PI kontrolcüye oranla daha az hata ile gerçekleştirmesini sağlamıştır. Üretilen kontrol işaretlerine bakıldığında bulanık kontrolcünün PI kontrolcüye oranla daha düzgün bir işaret ürettiği görülmektedir.

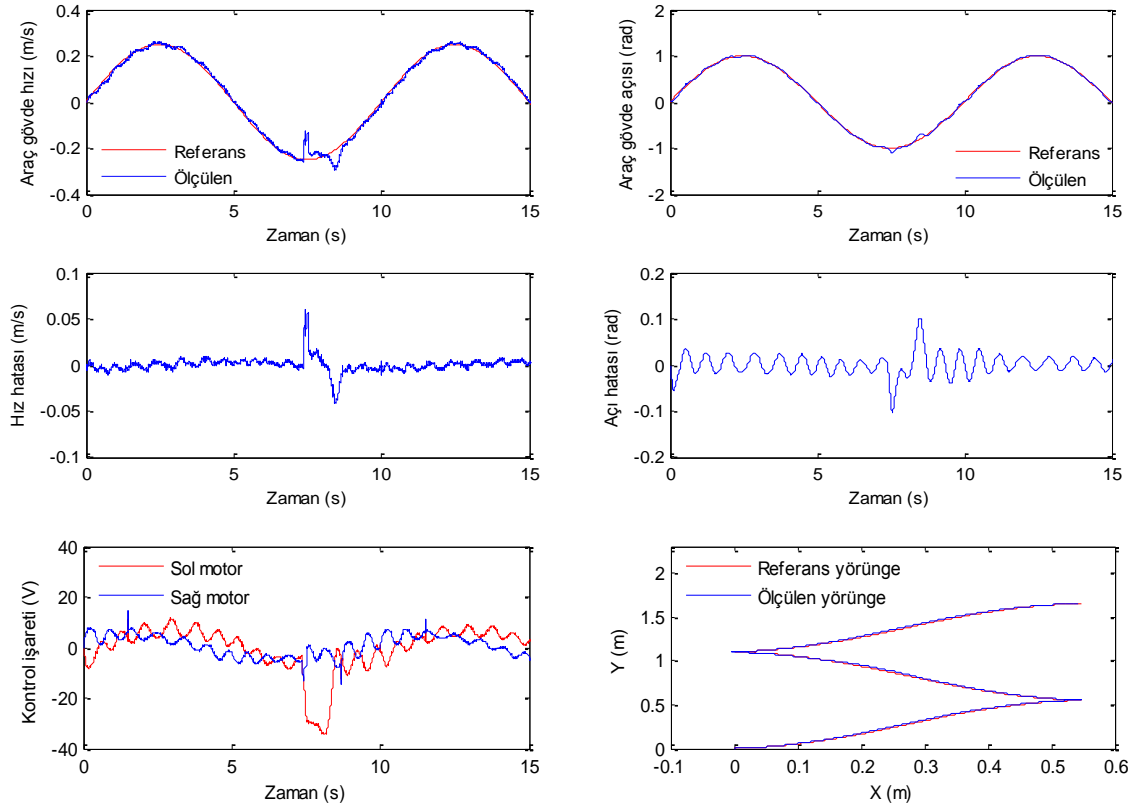
Sonuç olarak, bulanık kontrolcünün araç sisteminde gerek yük gerekse de bozucu etkiden dolayı meydana gelen değişimlere hızlı cevap vererek hatalarda oluşacak artışları önlediği görülmüştür. PI kontrolcünün sabit parametre yapısından dolayı değişimler karşısında hata artışından kurtulamadığı görülmektedir.



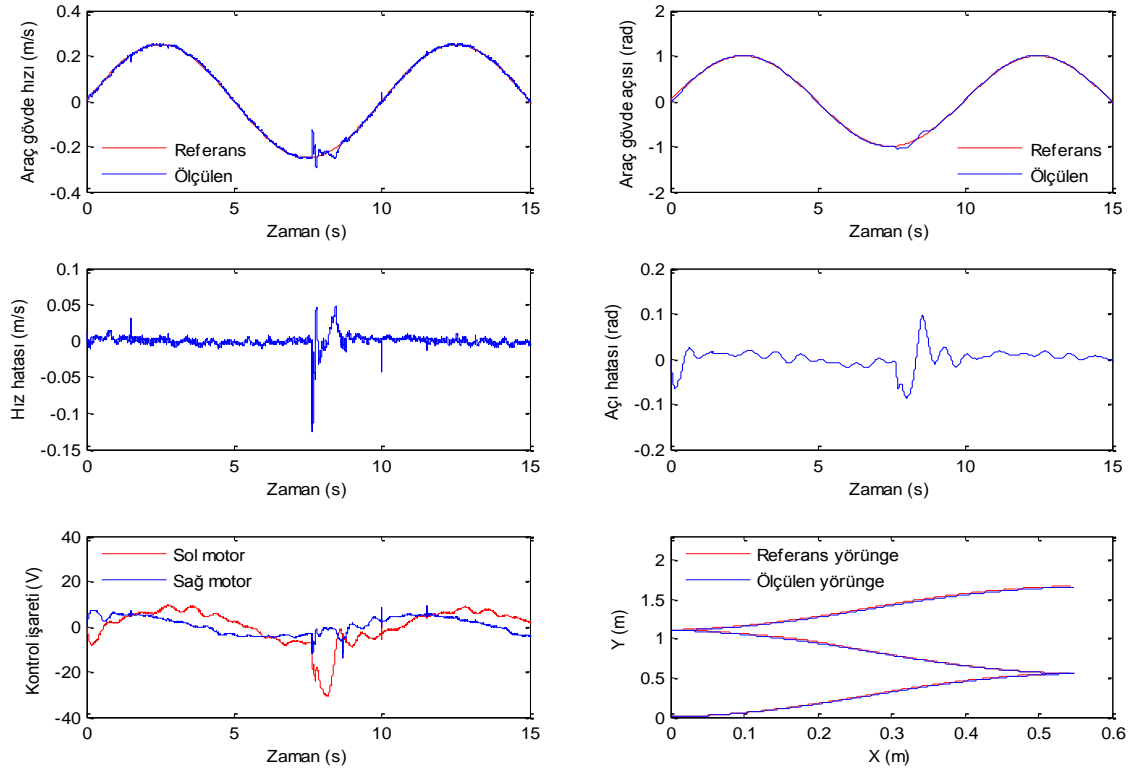
Şekil 7: Sinüs gövde hızı ve sinüs gövde açısı referansları için PI kontrolcü deney sonuçları.



Şekil 8: Sinüs gövde hızı ve sinüs gövde açısı referansları için bulanık mantık kontrolcü deney sonuçları.



Şekil 9: Sinüs gövde hızı ve sinüs gövde açısı referanslarının ani bozucu etki ve 30 kg yük altında PI kontrolcü deney sonuçları.



Şekil 10: Sinüs gövde hızı ve sinüs gövde açısı referanslarının ani bozucu etki ve 30 kg yük altında bulanık mantık kontrolcü deney sonuçları.

5 Sonuçlar

Araç gövde hızı ve gövde açısı kontrolü farklı durumlar için bulanık kontrolcü ile gerçekleştirilmiş ve bulanık kontrolcünün performansını göstermek adına PI kontrolcü ile aynı durumlar için karşılaştırılma yapılmıştır. Bulanık kontrolcünün referans gövde hızı ve gövde açısı işaretlerinin takibini PI kontrolcüye oranla daha küçük hatalar ile gerçekleştirdiği ve araç sisteminde gerek yük gerekse de bozucu etkiden dolayı meydana gelen değişimlere PI kontrolcüye oranla daha hızlı cevap vererek hatalarda oluşacak artışları önlediği görülmüştür.

6 Kaynaklar

- [1] Yamaguchi T, Sato E, Takama Y. "Intelligent Space and Human Centered Robotics". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 50(5), 881-889, 2003.
- [2] Ding D, Cooper R. "Electric-Powered Wheelchairs: A Review of Current Technology and Insight into Future direction". *IEEE Control Systems Magazine*, 25(2), 22-34, 2005.
- [3] Palaci'n J, Salse J, Valgano'n I, Clua X. "Building a Mobile Robot for A floor-Cleaning Operation in Domestic Environments". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, 53(5), 1418-1424, 2004.
- [4] Lee SY, Yang HW. "Navigation of Automated Guided Vehicles Using Magnet Spot Guidance Method". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(3), 425-436, 2012.
- [5] Oh SY, Lee JH, Choi DH. "A New Reinforcement Learning Vehicle Control Architecture for Vision-Based Road Following". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 49(3), 997-1005, 2000.
- [6] Lee TC, Tsai CY, Song KT. "Fast Parking Control of Mobile Robots: A Motion Planning Approach with Experimental Validation". *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 12(5), 661-676, 2004.
- [7] Colona E, Honga P, Habumuremyia JC. "An Integrated Robotic System for Antipersonnel Mines Detection". *Control Engineering Practice*, 10(11), 1283-1291, 2002.
- [8] Siegwart R, Nourbakhsh IR. *Introduction to Autonomous Mobile Robot*, 1st ed., USA, 2004.
- [9] Das T, Kar IN. "Design and Implementation of an Adaptive Fuzzy Logic-Based Controller for Wheeled Mobile Robots". *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 14(3), 501-510, 2006.
- [10] Carelli R, Santos J, Roberti F, Tosetti S. "Direct Visual Tracking Control of Remote Cellular Robots". *Robotics and Autonomous Systems*, 54(10), 805-814, 2006.
- [11] Sun S. "Designing Approach on Trajectory-Tracking Control of Mobile Robot". *Robotics Computer-Integrated Manufacturing*, 21(1), 81-85, 2005.
- [12] Fierro R, Lewis FL. "Control of a Nonholonomic Mobile Robot: Backstepping Kinematics into Dynamics". *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, New Orleans, LA, USA, 13-15 December 1995.
- [13] Ping JZ, Nijmeijer H. "Tracking Control of Mobile Robot: A Case Study in Backstepping". *Automatic*, 33(7), 1393-1399, 1997.

- [14] Guo WW, Tang CH, Wang YJ. "Global Trajectory Tracking Control of Mobile Robots". *Acta Automatica Sinica*, 27(3), 326-331, 2001.
- [15] Pourboghrat F, Karlsson MP. "Adaptive Control of Dynamic Mobile Robots with Nonholonomic Constraints". *Computers and Electrical Engineering*, 28(4), 241-253, 2002.
- [16] Das T, Kar IN. "Design and Implementation of an Adaptive Fuzzy Logic-Based Controller for Wheeled Mobile Robots". *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 14(3), 501-510, 2006.
- [17] Martins FN, Celeste WC, Carelli R, Sarcinelli-Filho M, Bastos-Filho T. "An Adaptive Dynamic Controller for Autonomous Mobile Robot Trajectory Tracking". *Control Engineering Practice*, 16(11), 1354-1363, 2008.
- [18] Keighobadi J, Mohamadi Y. "Fuzzy Sliding Mode Control of Non-holonomic Wheeled Mobile Robot". *9th IEEE International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics*, Smolenice, Slovakia, 27-29 January 2011.
- [19] Chen C, Li T, Yeh Y. "EP-Based Kinematic Control and Adaptive Fuzzy Sliding-Mode Dynamic Control for Wheeled Mobile Robots". *Information Sciences*, 179(1-2), 180-195, 2009.
- [20] Hwang CL, Chang LJ, Yu YS. "Network-Based Fuzzy Decentralized Sliding-Mode Control for Car-Like Mobile Robots". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(1), 574-585, 2007.
- [21] Antonelli G, Chiaverini S, Fusco G. "A Fuzzy-Logic-Based Approach for Mobile Robot Path Tracking". *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 15(2), 211-221, 2007.
- [22] Başçı A, Derdiyok A. "Real-Time Velocity and Direction Angle Control of an Automated Guided Vehicle". *International Journal of Robotics and Automation*, 3(29), 227-233, 2014.
- [23] Başçı A, Mercan E, Derdiyok A. "Otomatik Yönlendirmeli Aracın (OYA) Gerçek Zamanlı Bulanık Mantık Kontrolü". *TOK Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, Malatya, Türkiye, 26-28 Eylül, 2013.
- [24] Hsiao MC, Chen Tsai S, Liu S. "Combined Interval Type-2 Fuzzy Kinematic and Dynamic Controls of the Wheeled Mobile Robot with Adaptive Sliding-Mode Technique". *FUZZ-IEEE 2009*, Korea, 20-24 August 2009.
- [25] Sepúlveda R, Castillo O, Melin P, Rodríguez-Díaz A, Montiel O. "Experimental Study of Intelligent Controllers Under Uncertainty Using Type-1 and Type-2 Fuzzy Logic". *Information Sciences*, 177(10), 2023-2048, 2007.
- [26] Lin WS, Huang CL, Chuang MK. "Hierarchical Fuzzy Control for Autonomous Navigation of Wheeled Robots". *IEEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 152(5), 598-606, 2005.
- [27] Ertugrul M, Sabanoviç A, Kaynak O. "Various VSS Techniques on the Control of Automated Guided Vehicles and Autonomous Mobile Robots". PROJECT Report of CAD/CAM Robotics Dept. TUBITAK Marmara Research Center, Gebze-Kocaeli, Turkey, 1994.