

Speed and Direction Angle Control of Four Wheel Drive Skid-Steered Mobile Robot by Fractional Order Sliding-Mode Control

K. Orman^{1*}, A. Derdiyok²

Abstract: In this study, a Fractional Order Sliding Mode Controller (FOSMC) structure was simulated to control the body speed and direction angle of a four Wheel drive skid-steered mobile robot (4WD SSMR). The body velocity and orientation angle of the mobile robot are calculated using the angular velocity of each motor. The torque signal of each motor for the mobile robot's trajectory tracking and position stability will be generated by the FOSMC. To compare the performance of the FOSMC, a PI controller with well-tuned parameters was applied to the mobile robot using the same references. Simulation studies have shown that the FOSMC provides better results in terms of trajectory tracking accuracy and error levels than the conventional PI controller.

Keywords: Mobile Robot, SSMR, Fractional Order Sliding Mode Control.

Dört Teker Tahrikli Mobil Robotun Gövde Hızı ve Yönelme Açısının Kesir Dereceli Kayan Kipli Kontrolcü ile Kontrolü

Özet: Bu çalışmada dört teker tahrikli mobil robotun (4TT MR) gövde hızı ve yönelme açısının kontrolü için Kesir Dereceli Kayan Kipli Kontrolcü (KDKKK) yapısı benzetim ortamında test edilmiştir. Mobil robotun gövde hızı ve yönelme açısı her bir motorun açısal hızı kullanılarak hesaplanmaktadır. Tasarlanacak olan KDKKK ile mobil robotun yörünge izleme ve konum kararlılığı için her bir motorun tork işareti üretilecektir. KDKKK'nün performansını kıyaslamak için aynı referanslar kullanılarak mobil robota parametreleri iyi ayarlanmış bir PI kontrolcü de uygulanmıştır. Benzetim sonuçları KDKKK'nün geleneksel PI kontrolcüye göre yörünge izleme doğruluğu ve hata büyüklüğü açısından daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Mobil Robot, 4TT MR, Kesir Dereceli Kayan Kipli Kontrol

1. Giriş

Son birkaç yılda, araştırmacılar mobil robotların yörünge izleme sorunlarına odaklanmış ve farklı yaklaşımlar tartışılmıştır. Özellikle, mobil robotun konformik olmayan kısıtlamaları dikkate alınmıştır. Normey-Rico ve arkadaşları (Normey-Rico vd., 2001) sağlam bir PID algoritmasına dayanan bir yol izleme denetleyicisi önermişlerdir. Yöntemlerinde integral alıcı ve bir geciktiriciden oluşan basit bir doğrusallaştırılmış mobil robot modelini kullanmışlardır. Ayrıca bu çalışmada Ziegler-Nichols yöntemine benzeyen kolay bir sentez prosedürü kullanılmış ve elde edilen

kurallar PID kontrolcü için uygulanmıştır. Mobil robotların yalnızca kinematik modeline dayanan kontrolcüler gerçek uygulamalarda özellikle yüksek hızlı manevralarda başarılı sonuçlar veriyse de, (Sun, 2005; Das ve Kar, 2006; Carelli vd., 2006) yüksek hızlı manevralar ile tatmin edici izleme performansını elde etmek zordur. Bu nedenle, denetleyiciyi tasarlarırken, mobil robotun dinamiklerini ve kinematığını aynı anda göz önüne almak zorunlu hale gelir. Bu duruma çözüm olarak kinematik kontrolcü ile entegre olabilen bir dinamik kontrolcü önerilmektedir (Yue vd., 2012). Önerilen yöntemde çift kapalı döngü denetleyicisi kullanılmıştır. Hız kontrolü için dış döngüde geri

¹Erzincan Üniversitesi, Erzincan Meslek Yüksekokulu, Erzincan, Türkiye.

²Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Sakarya, Türkiye.

*Corresponding author (İletişim yazarı): korman@erzincan.edu.tr

Citation (Atıf): Orman, K., Derdiyok, A. (2017). Dört Teker Tahrikli Mobil Robotun Gövde Hızı ve Yönelme Açısının Kesir Dereceli Kayan Kipli Kontrolcü ile Kontrolü. Bilge International Journal of Science and Technology Research, 1 (Special Issue): 38-46.

adımlama yöntemi kullanılmıştır. Aynı zamanda iç döngüye bir bozulma-gözlemci tabanlı kontrolcü uygulanmış ve dinamik kontrolcü olarak kayan kipli kontrol yöntemi kullanılmıştır. Uygulama açısından, dinamik parametreleri elde etmek çok zordur. Yapılan başka bir çalışmada ise birleştirme yapısına dayanan dinamik geri besleme doğrusallaştırma yöntemi önerilmiştir (Ma vd., 2011). Mobil robotun dinamikleri iyi biliniyorsa bu yöntemle iyi sonuçlar almak mümkündür. Mobil robotlarda geri adımlama kontrol yöntemi de yörünge izlemede kullanılır (Huichao vd, 2012; Hwang vd., 2013), ancak denetleyici ve tasarım süreci çok karmaşıktır. Huang ve ark. (Huang vd., 2014), nonholonomik mobil robotlar için yüksek kazançlı bir gözlemci yapısına dayalı uyarlamalı çıkış geri beslemeli yörünge izleme kontrol tasarımı şemasını önermişlerdir. Gözlemcileri sırasıyla bilinmeyen doğrusal ve açılal hızları tahmin etmek için kullanmışlardır. İnsansız kara araçları için yörünge izleme hatasına bağlı kontrol yaklaşımı sunulan çalışmada (Kayacan vd., 2016); yörünge izleme hatasına bağlı model, doğrusal bir model tahmin denetleyicisini tasarlamak için kullanılmış ve kontrol eylemi ileri besleme ve gürbüz kontrol eylemleri ile birleştirilmiştir. Ayrıca bir traktör tarafından çekilen römork sistemi üzerinde farklı rotalar ile test edilmiştir. Model tahminine dayalı bir kontrol yaklaşımında (Hang vd., 2017) ise kontrolcü tasarımı için aracın doğrusal olmayan dinamik modeli doğrusal bir model olarak basitleştirilmiştir. Daha sonra referans yönelme açısı ve referans ilerleme mesafesi olarak ifade edilen referans yolu takip etmek için bir model tahmin kontrol cihazı (MPC) tasarlanmıştır.

Tüm bu gelişmelerin yanı sıra, kesir dereceli hesaplamalar eski bir geçmişe sahip olsa da son zamanlarda artan bir ilgiye sahiptir. Kesir dereceli hesaplamaların başlangıcı G.W. Leibnz (1695) ve L. Euler (1730)'e dayanmaktadır. Bu alanda temel teşkil edecek çalışmalarda; Kesir dereceli hesaplamaların temel matematiği (oldham vd Spainer, 1974), kesir dereceli diferansiyel denklemlerin çözümleri (Podlubny, 1999a; Podlubny, 1999b) ve bu hesaplamaların mühendislikteki bazı kuralları (Das, 2008)'de sunulmuştur.

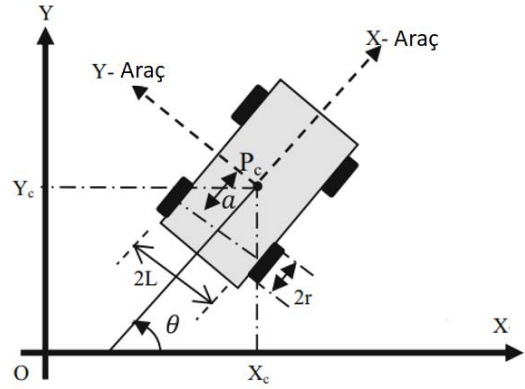
Bu çalışmada, 4 teker tahrikli mobil robotun (4TT MR) sırasıyla hız ve yön açısı kontrolü için Kesir Dereceli Kayan Kipli Kontrolcü (KDKKK) ve parametreleri iyi ayarlanmış PI kontrolcü benzetim ortamında kıyaslanmıştır. Benzetim

sonuçları KDKKK'nün PI kontrolcüye göre ani referans değişimlerine karşı hassasiyet ve hata miktarı açısından daha başarılı olduğunu göstermiştir.

2. Materyal ve Yöntem

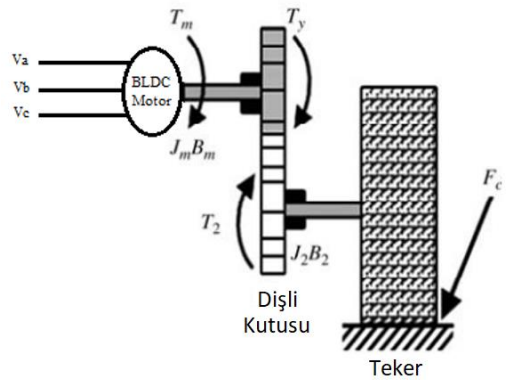
2.1. 4 teker tahrikli mobil robot (4TT MR)

Şekil 1'de iki boyutlu düzlem üzerinde hareket eden 4TT- MR ve eksenler gösterilmiştir (Ertuğrul vd., 1994).



Şekil 1. 4TT MR'un Kinematikleri

4TT MR'un dört sabit tekerleği vardır ve kayarak yönlendirilir. Tekerler Şekil 2'de gösterildiği gibi bir dişli kutusu yoluyla BLDC motor aracılığıyla hareket eder.



Şekil 2. Her tekerleğe ait tahrik sistemi

Mobil robotun kinematik denklemleri aşağıdaki gibi türetilmiştir (Ertuğrul vd., 1994).

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ 0 & 0 \\ \frac{r}{L} & -\frac{r}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$v = r * \left[\frac{\omega_r + \omega_l}{2} \right] \quad (2)$$

$$\dot{\theta} = \omega = r * \left[\frac{\omega_r - \omega_l}{L} \right] \quad (3)$$

$$\dot{\theta}_r = \omega_r, \dot{\theta}_l = \omega_l \quad (4)$$

$$v_x = v * \cos(\theta) = r * \left[\frac{\omega_r + \omega_l}{2} \right] * \cos(\theta) \quad (5)$$

$$v_y = v * \sin(\theta) = r * \left[\frac{\omega_r + \omega_l}{2} \right] * \sin(\theta) \quad (6)$$

Araca ait kısıtlar ise;

$$\dot{y}_c * \cos(\theta) - \dot{x}_c * \sin(\theta) = a\dot{\theta} \quad (7)$$

$$\dot{x}_c * \cos(\theta) + \dot{y}_c * \sin(\theta) + L\dot{\theta} = r\dot{\theta}_r \quad (8)$$

$$\dot{x}_c * \cos(\theta) + \dot{y}_c * \sin(\theta) - L\dot{\theta} = r\dot{\theta}_l \quad (9)$$

Burada ‘r’ tekerlerin yarı çapı, ‘2L’ sağ ve sol tekerler arasındaki mesafe, ω_r ve ω_l sağ ve sol tekerlere ait açısal hızlar, ‘v’ ve ‘ θ ’ ise 4TT MR’un gövde hızı ve yönelme açısı, v_x ve v_y ise 4TT MR’un ağırlık merkezi (Pc)’nin x ve y eksenindeki hız bileşenleridir. 4TT MR’un gerçek konumu koordinat ekseninde Pc = (x_c, y_c, θ) ile ifade edilmektedir.

4TT MR’un her bir motoruna ait elektriksel ve mekanik eşitlikler aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = -\frac{R}{L_1} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \frac{1}{L_1} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L_1} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J_m} (T_e - B_m\omega_m - T_{yuk}) \quad (11)$$

$$\varphi_e = \frac{p}{2} \varphi_m \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_a(\varphi)\lambda\omega_m \\ f_b(\varphi)\lambda\omega_m \\ f_c(\varphi)\lambda\omega_m \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$T_e = T_a + T_b + T_c \quad (14)$$

$$T_e = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m\omega_m + T_{yuk} \quad (15)$$

$$T_{yuk} = n^2 J_2 \frac{d^2 \varphi_m}{dt^2} + n^2 B_2 \frac{d\varphi_m}{dt} + n F_c \frac{\dot{\varphi}_m}{|\dot{\varphi}_m|} \quad (16)$$

Burada ‘n’ dişli kutusunun dönüştürme oranı, ‘B_m’ motor ve yükün sürtünme katsayısını, ‘J_m’ motor ataletini, ‘J₂’ dişli kutusunun ataletini, ‘F_c’ Coulomb tork sabitini, ‘f_a(φ)’, ‘f_b(φ)’, ‘f_c(φ)’ zıt emk’lar ile aynı şekillere sahip fonksiyonları, ‘ λ ’ ise dönüş sayısı ve akı linki/iletkeninin çarpımı olarak toplam akı bağlantısını temsil eder, ‘ ω_m ’ motorun açısal hızını, ‘ φ_m ’ rotorun mekanik açısını, ‘ φ_e ’ rotorun elektriksel açısını, ‘p’ rotordaki kutup sayısı, L₁ = L – M, Burada ‘L’ faz başına sargının kendi indüktansını, ‘M’ ise faz başına karşılıklı indüktansını ifade etmektedir.

T_{yuk}; Eşitlik (15)’te yerine yazılarak her motor için aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir,

$$T_e = (J_m + n^2 J_2) \frac{d^2 \varphi_m}{dt^2} + (B_m + n^2 B_2) \frac{d\varphi_m}{dt} + n F_c \text{sign}(\dot{\varphi}_m) \quad (17)$$

BLDC motorun durum denklemleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (18)$$

Burada durumlar ve giriş vektörü aşağıdaki gibi ifade edilmiştir,

$$x(t) = [i_a \ i_b \ i_c \ \omega \ \varphi]^T \quad (19)$$

$$u(t) = [v_a \ v_b \ v_c \ T_{yuk}]^T \quad (20)$$

Sistem matrisleri ise;

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_1} & 0 & 0 & \frac{f_a(\varphi)\lambda}{J_m} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L_1} & 0 & \frac{f_b(\varphi)\lambda}{J_m} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L_1} & \frac{f_c(\varphi)\lambda}{J_m} & 0 \\ \frac{f_a(\varphi)\lambda}{J_m} & \frac{f_b(\varphi)\lambda}{J_m} & \frac{f_c(\varphi)\lambda}{J_m} & -\frac{B_m}{J_m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{p}{2} & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

olarak belirlenmiştir.

2.2. Kontrolcü tasarımı

Bu çalışmada kullanılacak olan kontrol yöntemi Şekil 3'te gösterildiği gibi açıklanmaktadır. Her bir motor için gereken tork, kontrolcünün çıkışları olarak tanımlanan u_v ve u_θ ile hesaplanmaktadır. Sağ ön ve arka tekerleklerin torku;

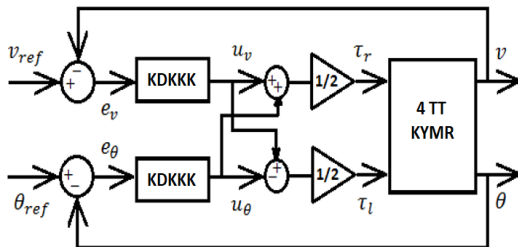
$$\tau_r = \frac{u_v + u_\theta}{2} \quad (23)$$

Sol ön ve arka tekerleklerin torku ise;

$$\tau_l = \frac{u_v - u_\theta}{2} \quad (24)$$

olarak belirlenmiştir.

4TT MR'un gövde hızı ve yönelme açısı, sol ve sağ motorlar için verilen eşitlik (2) ve (3) 'ten hesaplanır. Eşitlik (23) ve (24)'te belirtilen sağ ve sol referans torkularını hesaplamak için KDKKK'ler tarafından u_v ve u_θ kontrol sinyalleri üretilir.



Şekil 3. KDKKK sistemi

2.3. Kesir dereceli hesaplama

Kesir dereceli türev alıcı ${}_a D_t^p$ operatörü ile gösterilebilir, burada “a” ve “t” sınırları ifade eder. Kesir dereceli türev / integral operatörü aşağıdaki gibi tanımlanır,

$${}_a D_t^p = \begin{cases} \frac{d^p}{dt^p} & : p > 0 \\ 1 & : p = 0 \\ \int_a^t (d\tau)^{-p} & : p < 0 \end{cases} \quad (25)$$

burada “p” kesir derecesini ifade eder ve karmaşık bir sayı olabilir, bununla birlikte “p” başlangıç koşulları ile ilgilidir. Kesir dereceli türev ve integral için çeşitli matematiksel tanımlar mevcuttur (Oldham ve Spanier, 1974; Podlubny, 1999a). Bu tanımlar arasında en yaygın olarak kullanılan Grünwald–Letnikov (GL) tanımı ve Riemann–Liouville (RL) tanımıdır. GL tanımı aşağıdaki gibidir;

$${}_a D_t^p f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-p} \sum_{j=0}^{\lfloor \frac{t-a}{h} \rfloor} (-1)^j \binom{p}{j} f(t - jh) \quad (26)$$

Burada $\lfloor \frac{t-a}{h} \rfloor$ ifadesi tam sayı kısmı ifade eder, RL tanımı ise aşağıdaki gibidir.

$${}_a D_t^p f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-p)} \frac{d^n}{dt^n} \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{p-n+1}} d\tau \quad (27)$$

($n - 1 < p < n$) için, $\Gamma(.)$ Euler'in gamma fonksiyonunu, “a” başlangıç zamanını ve “t” ise türev ve integral parametrelerini temsil eder.

2.4. Kesir dereceli kayan kipli kontrolcü (KDKKK)

4 TT KYMR'un gövde hızı ve yönelme açısı hataları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} \varepsilon_v(t) &= v_{ref}(t) - v(t) \\ \varepsilon_\theta(t) &= \theta_{ref}(t) - \theta(t) \end{aligned} \quad (28)$$

Her bir kontrolcüye ait kayma yüzeyleri ise aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$\begin{aligned} s_v(t) &= \lambda_1 \varepsilon_v(t) + \dot{\varepsilon}_v(t) \\ s_\theta(t) &= \lambda_2 \varepsilon_\theta(t) + \dot{\varepsilon}_\theta(t) \end{aligned} \quad (29)$$

kayan kipli kontrol yaklaşımı için aşağıdaki gibi tanımlanan bir sistemi ele alabiliriz (Daewon vd., 2009).

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2, t) \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2, t) + B_2(x_1, x_2, t)u(t) \end{aligned} \quad (30)$$

Bu durum uzayı tanımlamasında, $x_1 \in \mathfrak{R}^{n-m}$, $x_2 \in \mathfrak{R}^m$ ve B ise m*m boyutunda tekil olmayan bir matristir. Kontrol işlemindeki amaç, sistemin durumunu aşağıda tanımlanan kayma yüzeyine yaklaştırmaktır.

$$s = \{x: \tau(t) - \xi(x) = \varepsilon(x, t) = 0\} \quad (31)$$

Burada $\tau(t)$ kayma fonksiyonunun zamana bağlı kısmıdır ve kontrolcüye uygulanacak referans girişleri içerir. $\xi(x)$ ise kayma fonksiyonunun durum denklemlerine bağlı kısmını ifade eder. Kapalı döngü kontrol sisteminin kararlılık analizi için seçilen Lyapunov $V(\varepsilon)$ fonksiyonu ve pozitif tanımlı türevi ise (Jezernik vd., 1994; Sabanovic vd., 1996);

$$V = \frac{1}{2}\varepsilon^T \varepsilon \quad , \quad \dot{V} = \varepsilon^T \dot{\varepsilon} \quad (32)$$

Lyapunov fonksiyonunun zamana göre türevi aşağıdaki gibi ifade edilebilirse $\varepsilon(x, t) = 0$ çözümü sabit olacaktır (Sabanovic.vd., 1996).

$$\dot{V} = -\varepsilon^T P \varepsilon \quad (33)$$

Burada P pozitif tanımlı bir matristir. Böylece Lyapunov fonksiyonunun türevi negatif olacak ve kararlılık sağlanacaktır. Eşitlik (32) ve (33)'deki türev ifadeleri kullanılarak aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$-\varepsilon^T P \varepsilon = \varepsilon^T \dot{\varepsilon} \quad (34)$$

Eşitlik (31)'de tanımlanan kayma yüzeyi fonksiyonunun türevi ise;

$$\dot{s} = \dot{\varepsilon} = \dot{\tau} - \dot{\xi} \quad (35)$$

Burada,

$$\xi = G_1 x_1 + G_2 x_2 \quad \text{ve} \quad \dot{\xi} = G_1 \dot{x}_1 + G_2 \dot{x}_2 \quad (36)$$

olarak tanımlıdır ve $G_1 \in \mathfrak{R}^{n \times (n-m)}$, $G_2 \in \mathfrak{R}^{n \times m}$ ise kazanç matrisleridir. Eşitlik (35) ve $\dot{\varepsilon} = 0$ şartı kullanılarak equivalent kontrol ifadesi;

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\tau} - \dot{\xi} = \dot{\tau} - (G_1 f_1 + G_2 f_2 + G_2 B_2 u_{eq}) = 0 \quad (37)$$

$$u_{eq} = (G_2 B_2)^{-1} (\dot{\tau} - G_1 f_1 - G_2 f_2) \quad (38)$$

elde edilir, sisteme gelen kontrol işaretini bulmak için eşitlik (34) ve (35) kullanılırsa;

$$\dot{\varepsilon} = -P \varepsilon = \dot{\tau} - \dot{\xi} \quad (39)$$

$$\dot{\tau} - (G_1 f_1 + G_2 f_2 + G_2 B_2 u) = -P \varepsilon \quad (40)$$

Sonuç olarak kısa bir cebirsel işlem yapılarak aşağıdaki ifade elde edilir.

$$u = u_{eq} + (G_2 B_2)^{-1} P \varepsilon \quad (41)$$

Eşitlik (35) kullanılarak kayma fonksiyonunun türevi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\tau} - (G_1 f_1 + G_2 f_2 + G_2 B_2 u) \quad (42)$$

Yukarıdaki eşitliğin her iki tarafı $(G_2 B_2)^{-1}$ ile çarpılırsa

$$\begin{aligned} (G_2 B_2)^{-1} \dot{\varepsilon} &= \\ (G_2 B_2)^{-1} (\dot{\tau} - (G_1 f_1 + G_2 f_2) - u) & \end{aligned} \quad (43)$$

elde edilir ve eşitlik (37) kullanılarak;

$$(G_2 B_2)^{-1} \dot{\varepsilon} = u_{eq} - u \quad (44)$$

elde edilir ve sonuç olarak Eşitlik (44) ve Eşitlik (41) kullanılarak kontrol işareti aşağıda verildiği gibi elde edilir.

$$u(t) = u(t^{-1}) + (G_2 B_2)^{-1} \left(\frac{d\varepsilon}{dt} + P \varepsilon \right) \quad (45)$$

$$t = t^{-1} + \Delta, \quad \Delta \rightarrow 0 \quad (46)$$

Kontrol işaretinin anlık değeri, $(t - \Delta)$ anındaki değeri ve kontrol hatası ε ile türevinin tartılı toplamı üzerinden hesaplanır. Bu sayede 4TT MR'un gövde hızı ve yönelme açısı kontrol yapısında kullanılacak olan ve Şekil 3'te gösterilen u_v ve u_θ kontrol işaretleri aşağıdaki gibi belirlenebilir.

$$\left. \begin{aligned} u_v(t) &= u_v(t^{-1}) + (G_2 B_2)^{-1} \left(\frac{d\varepsilon_v}{dt} + P \varepsilon_v \right) \\ u_\theta(t) &= u_\theta(t^{-1}) + (G_2 B_2)^{-1} \left(\frac{d\varepsilon_\theta}{dt} + P \varepsilon_\theta \right) \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

Eşitlik (47)'de ' ε_v ' gövde hızı ve ' ε_θ ' yönelme açısı hatalarına ait zamana bağlı türevler kesirli dereceden hesaplanırsa nihai kesir dereceli kayan kipli kontrol işaretleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\left. \begin{aligned} u_v(t) &= u_v(t^{-1}) + (G_2 B_2)^{-1} ({}_a D_t^p \varepsilon_v + P \varepsilon_v) \\ u_\theta(t) &= u_\theta(t^{-1}) + (G_2 B_3)^{-1} ({}_a D_t^p \varepsilon_\theta + P \varepsilon_\theta) \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

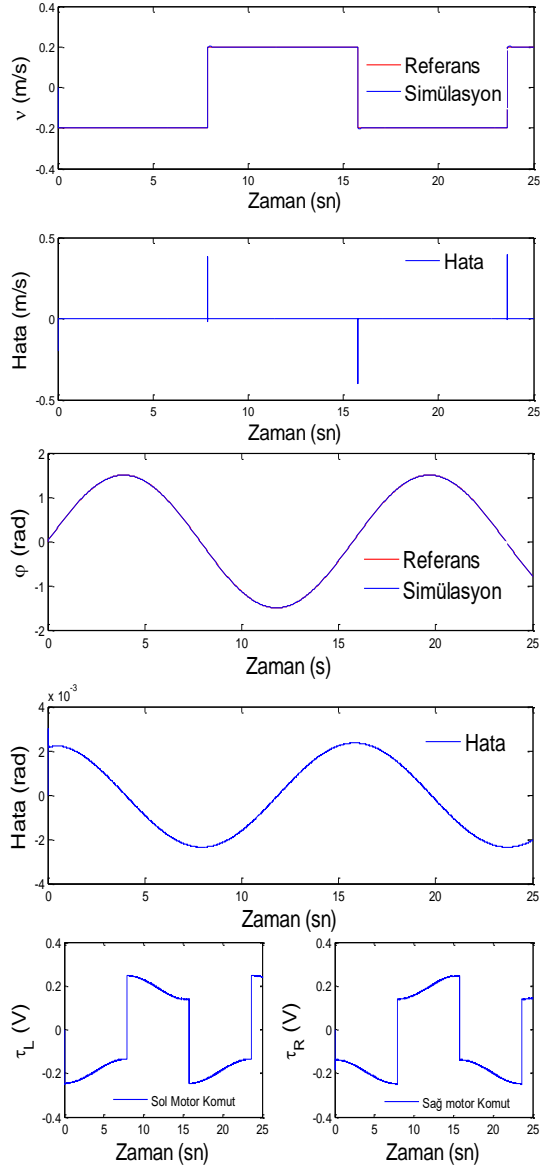
Burada B_2 ve B_3 kontrol işaretlerinin çarpım katsayılarıdır.

3. Benzetim Sonuçları

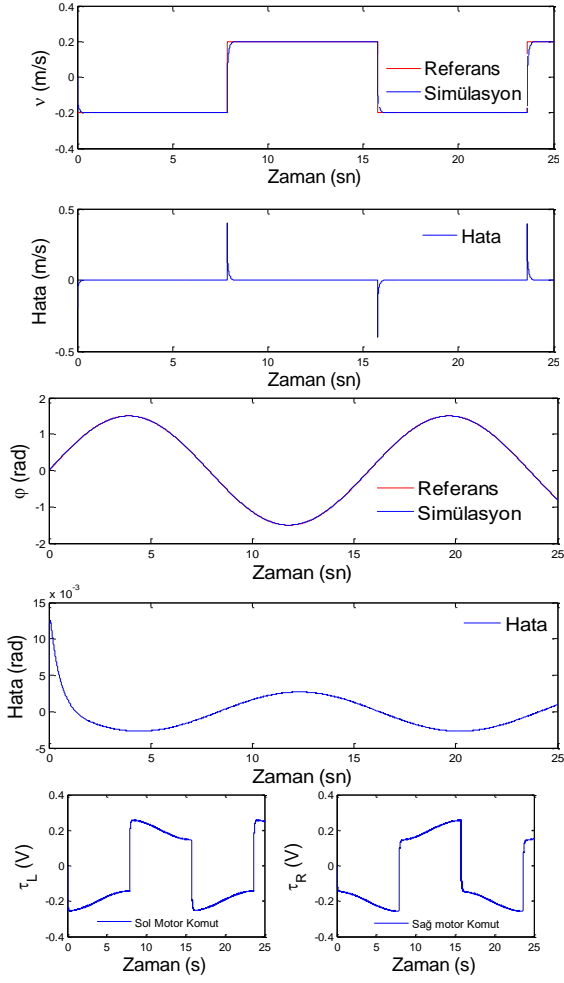
Bu bölümde KDKKK ve PI kontrolcünün performanslarının kıyaslandığı benzetim sonuçları verilmiştir.

4 TT KYMR'a aynı anda gövde hızı ve yönelme açısı referansı olarak önce hız olarak kare ve yönelme açısı olarak sinus referans işareti uygulanmıştır. Hız referansı olarak kare referans kontrolcülerin ani değişim anlarındaki performanslarını kıyaslamak açısından önemlidir. Şekil 4 ve Şekil 5'te sırasıyla KDKKK ve PI kontrolcü benzetim sonuçları görülmektedir. Yönelme açısı kontrolü açısından her iki kontrolcü benzer sonuçlar vermiştir. Bununla birlikte Şekil 5'te PI kontrolcünün yönelme açısı hatasının KDKKK ye oranla daha fazla olduğu görülmektedir. Hız referansını takip açısından PI kontrolcünün ani değişim anlarında gecikme olduğu ve referanstan ayrıldığı görülmektedir. Ek olarak her iki kontrolcü tarafından üretilen $u_v - u_\theta$ kontrol işaretleri kullanılarak elde edilen, sağ ve sol tekerlere gönderilen komut işaretleri τ_r ve τ_l de verilmiştir.

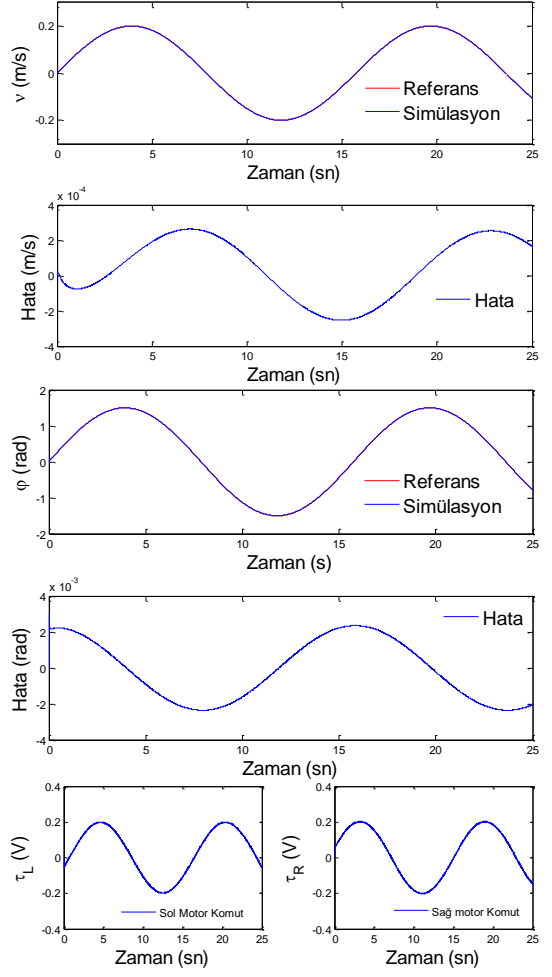
İkinci referans işareti olarak gövde hızı sinus ve yönelme açısı sinus işaret uygulanmıştır. Şekil 6 ve Şekil 7'de sırasıyla verilen KDKKK ve PI kontrolcü benzetim sonuçlarında; değişimin gövde hızı ve yönelme açısı olarak daha yumuşak olduğu bu referans işareti için her iki kontrolcü de takip açısından benzer performanslar sergilemiştir. Gövde hızı ve yönelme açısı hata miktarlarında KDKKK'nün PI kontrolcüye oranla daha az hata ile referans işaretleri takip ettiği görülmektedir. Ayrıca her iki kontrolcü tarafından üretilen $u_v - u_\theta$ kontrol işaretleri kullanılarak elde edilen, sağ ve sol tekerlere gönderilen komut işaretleri τ_r ve τ_l de verilmiştir.



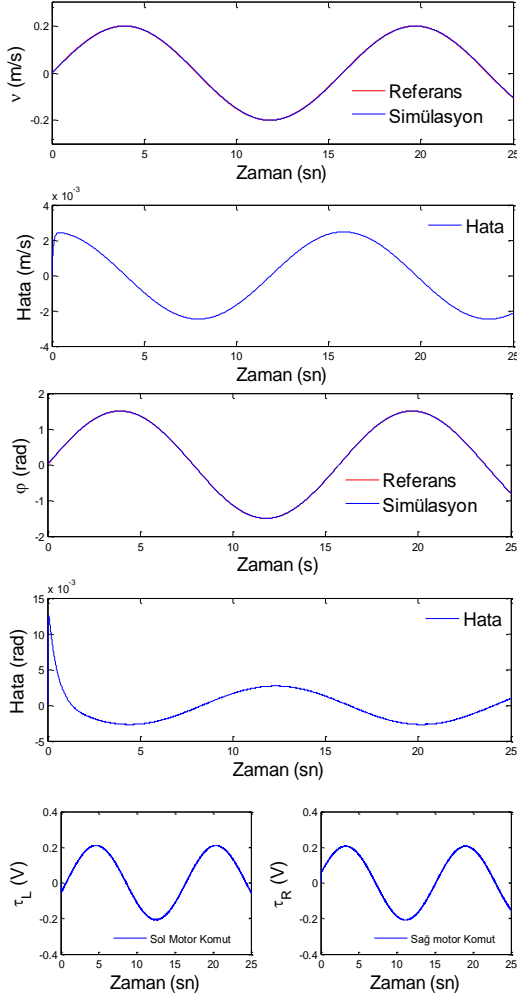
Şekil 4. Hız Kare/Yönelme Açısı Sinüs referans KDKKK benzetim sonuçları



Şekil 5. Hız Kare/Yönelme Açısı Sinüs referans PI kontrolcü benzetim sonuçları



Şekil 6. Hız Sinüs/Yönelme Açısı Sinüs referans KDKKK benzetim sonuçları



Şekil 7. Hız Sinüs/Yönelme Açısı Sinüs referans PI kontrolcü benzetim sonuçları

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Dört Teker Tahrikli Mobil Robotun (4TT MR) benzetim ortamında gövde hızı ve yönelme açısının kontrolü için Kesir Dereceli Kayan Kipli Kontrolcü (KDKKK) performansı test edilmiştir. Önerilen Kesir Dereceli Kayan Kipli Kontrolcü (KDKKK)'nün performansını kıyaslamak için parametreleri iyi ayarlanmış bir PI kontrolcüsü de ayrı referanslar kullanılarak test edilmiştir. Benzetim sonuçları KDKKK'nün PI kontrolcüye göre referanstaki ani değişimlere daha hızlı cevap verme, referanstan ayrılmama ve daha az hata miktarı açısından üstün olduğunu göstermektedir. İlerleyen çalışmalarda önerilen kontrolcünün deney düzeneği üzerinde gerçek zamanlı performansının test edilmesi planlanmaktadır.

Kaynaklar

- Carelli, R., Santos-Victor, J. Roberti, F. Tosetti, S., (2006). Direct visual tracking control of remote cellular robots, *Robotics and Autonomous Systems*, 54, 805–814.
- Das T., Kar, I.N., (2006). Design and implementation of an adaptive fuzzy logic based controller for wheeled mobile robots, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 14, 501–510.
- Das, S., (2008). *Functional Fractional Calculus for System Identification and Controls*, Springer, 1st Edition,
- Ertuğrul M, Sabanoviç A, Kaynak O., (1994). 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
- Hang, P., Luo, F., Fang, S., Chen, X. (2017). Path tracking control of a four-wheel-independent-steering electric vehicle based on model predictive control. In *Control Conference (CCC), 2017 36th Chinese* (pp. 9360-9366). IEEE.
- Huang, J., Wen, C., Wang, W., Jiang, Z. P. (2014). Adaptive output feedback tracking control of a nonholonomic mobile robot. *Automatica*, 50(3), 821-831.
- Huichao, M., Shurong, L., Haiyang, C., (2012). “Robust backstepping tracking control for mobile robots”, *Control Conf. (CCC)*, Chinese, 4842–4846.
- Hwang, E.J., Kang, H.S., Hyun, C.H., Park, M., (2013). Robust backstepping control based on a lyapunov redesign for skidsteered wheeled mobile robots, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(26).
- Jezernik, K., Curk, B., Harnik, J., (1994). Observer based sliding mode control of robotic manipulator, *Robotica*, vol. 12, no. 5, pp. 443–448. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/S0263574700017999>
- Kayacan, E., Herman, R., Wouter. S., (2016). Robust trajectory tracking error model-based predictive control for unmanned

ground vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 21.2: 806-814.

- Lee, D., Jin Kim, H., Sastry. S. (2009). Feedback linearization vs. adaptive sliding mode control for a quadrotor helicopter. *International Journal of control, Automation and systems* 7.3: 419-428.
- Ma, M., Hong, C., Xiangjie, L., (2011). Tracking and stabilization control of WMR by dynamic feedback linearization”, *Control and Decision Conf. (CCDC)*, Chinese, 3430–3435.
- Normey-Rico, J. E., Alcalá, I., Gómez-Ortega, J., Camacho, E. F. (2001). Mobile robot path tracking using a robust PID controller. *Control Engineering Practice*, 9(11), 1209-1214.
- Oldham, K.B., Spanier, J., (1974). *The Fractional Calculus*, Academic Press,
- Podlubny, I., (1999a). *Fractional Differential Equations*, Academic Press, San Diego, California.
- Podlubny, I., (1999b). Fractional-order systems and PI λ D μ controllers”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 44(1), pp. 208–214.
- Sabanovic, A., Jezernik, K., Wada, K., (1996). Chattering-free sliding modes in robotic manipulators control, *Robotica*, vol. 14, no. 1, pp. 17–29,[Online].
- Sun, S., (2005). Designing approach on trajectory-tracking control of mobile robot, *Robotics Computer-Integrated Manufacturing*, 21, 81–85.
- Yue, M., Tang, F., Liu, B., Yao, B., (2012). Trajectory-tracking control of a nonholonomic mobile robot: Backstepping kinematics into dynamics with uncertain disturbances, *Applied Artificial Intelligence*, 26(10), 952–966.