

Dört Bacaklı Robot Üzerindeki Silah Kulesinin Stabilizasyon Simülasyonu

Ahmet Burak TATAR^{*} , Oğuz YAKUT 

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

Geliş / Received: 27.02.2019, Kabul / Accepted: 15.12.2019

Öz

Silah kulesi stabilizasyon çalışmaları ile geliştirilen savunma teknolojilerinin önemi günümüzde gittikçe artmaktadır. Robot teknolojisinin gelişmesine bağlı olarak gelecekte savunma sistemlerinde robotların kullanımı da kaçınılmaz olacaktır. Bu çalışmada 4 ayaklı bir robot üzerine yerleştirilmiş silah kulesinin stabilizasyonu ele alınmıştır. Bunun için, üzerine namlu sistemi yerleştirilmiş 4 bacaklı bir robotun düzlemsel hareketini temsil eden bir matematiksel model elde edilmiştir. Sistem, toplamda 12 bağımsız eksen den oluşmaktadır. PID kontrol yöntemi kullanılarak robotun hareketli durumlarında namlunun stabilizasyonu için kontroller gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile, üzerine silah kulesi yerleştirilmiş dört ayaklı bir robotun, savunma sanayisinde kullanılabileceği ve namlu stabilizasyonunun gerçekleştirilebileceği ortaya konulmuştur. Simülasyonlar için MATLAB paket programı kullanılmış ve elde edilen sonuçlar grafiksel olarak irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dört Bacaklı Robot, Namlu Stabilizasyonu, Dinamik Model, PID Kontrol

Realization of the Gun Turret Stabilization on the Four-Legged Robot

Abstract

Nowadays, the importance of defense technologies developed with gun turret stabilization studies is increasing. Due to the development of robot technology, the usage of robots in defense systems in the future will be inevitable. In this study, the stabilization of the gun turret placed on a 4-legged robot is discussed. For this, a mathematical model representing the planar motion of a 4-legged robot with a barrel system was obtained. The system consists of 12 independent axes in total. The controls were performed for stabilization of the barrel in moving situations of the robot using the PID control method. With this study, it was revealed that a four-legged robot with a gun turret placed on it can be used in the defense industry and barrel stabilization can be realized. MATLAB package program was used for the simulations and the results were analyzed graphically.

Keywords: Four-legged robot, Barrel Stabilization, Dynamic Model, PID Control

1. Giriş

Ülkeler daima, birbirine karşı üstünlük sağlamak ve tehditlere karşı caydırıcılığı arttırmak amacıyla güçlü, etkili ve gelişmiş silah sistemlerine sahip olma arzusundadır. Ulusların bu alandaki çalışmaları günümüzde de artan bir hızla devam etmektedir (Işık, 2016).

Günümüz savunma sanayi teknolojisi ile geliştirilen yeni nesil silah sistemlerinin temel amacı, her türlü bozucu etki

karşısında belirlenen hedefin başarılı bir şekilde vurulmasını sağlamaktır. Aynı zamanda, yaşadığımız dönem içerisindeki harp koşullarında, daha hareketli ve daha hızlı tepki verebilen silah sistemleri tercih edilmektedir. Bu silah sistemleri içerisinde, hareketli araç üzerinden yapılan atışın başarılı olması, namlu stabilizasyonu ile mümkündür. Namlu stabilizasyon sistemi, sadece bir hedef takip sistemi değil, aynı zamanda namlunun hedef bölgesinde kalmasını sağlayan, arazi şartlarından en az

etkilenen yüksek vuruş yüzdesi atışlar yapılmasına yardımcı olan bir sistemdir (Songül, 2014).

Dünyada savunma sanayisine katkılar sağlayan robot teknolojisi, özellikle de eklem bacaklı robotlar alanında çok önemli ilerlemeler sağlamıştır. Bacaklı robotlar, tekerlekli mobil robotlara göre zorlu arazi koşullarında manevra kabiliyeti açısından daha çok tercih edilmektedir (Gora vd., 2015). Dört bacaklı robotlar diğer bacaklı robotlara göre daha kararlı ve daha çok yük taşıma kapasitesine sahiptir (Ganesh vd., 2013). Bu çalışmada 4 bacaklı bir robotun düzlemsel dinamik modeli elde edilerek robotun yürüyüş kontrol simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Günümüzde teknolojik ilerlemelerin savunma sanayine adapte edilmesi ile geliştirilen yeni nesil silahlar ortaya çıkarılmaktadır. Bu silah sistemlerinin temel amacı, her türlü bozucu etkiye rağmen belirlenen hedefin başarılı bir şekilde vurulmasını sağlamaktır. Ayrıca harp koşullarında, daha hareketli ve daha hızlı tepki verebilen silah sistemleri tercih edilmektedir. Silahlar, tarih boyunca sürekli olarak öldürücü bir tehdit olmuştur. Bu silahlar, belirli bir mesafeden zarar verme kapasitesine sahip oldukları için her zaman avantaj sağlamıştır (Kline vd., 2019). Burada aşılması gereken sorun, hedef ile mermiler arasındaki hata değerini en aza indirmektir. Bu sebeple atış kontrolünün ayarlanması gerekmektedir (Lee, 2007) Hareketli silah sistemlerinde de tahrip gücü ne kadar iyi olursa olsun, en önemli performans kriteri namlu stabilizasyondur.

Namlu stabilizasyonuna yönelik çalışmalar için robotun gövdesi üzerine hareketli bir namlu sistemi eklenmiştir. Yürüten veya sıçrayan bir robotun gövde hareketleri namlu sistemi için bozucu etkiye sebep olmaktadır. Bu bozucu etkiler altında namlunun arzu edilen konumda tutulabilmesi için klasik PID kontrol yöntemi uygulanmıştır. Sonuçlar grafiksel olarak sunulmuş ve animasyonlarla desteklenmiştir. Bu çalışma ile dört bacaklı bir robot üzerine yerleştirilen bir namlu sisteminin stabilizasyonunun gerçekleştirilmesi ortaya konulmuştur. Simülasyonlar, MATLAB paket programında geliştirilen Runge-Kutta sayısal yaklaşım metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Runge-Kutta yöntemi, diferansiyel denklemlerin nümerik çözümlerinde sıkça kullanılan bir yöntemdir (Rice, 1983).

2. Dört Bacaklı Robotun Matematiksel Modeli

Düzlemsel 4 bacaklı robotun fiziksel modeli Şekil 1.'de gösterilmiştir. Robotun düzlemsel hareketi göz önünde bulundurularak matematiksel hareket denklemleri elde edilmiştir. Elde edilen bu modele robotun 4 bacağı da eklenmiştir. Dolayısıyla robotun trot(tırıs), gallop(dörtnala), pace(ağır adım) gibi yürüyüş tipleri modele uygulanabilmektedir.

$$V = Mgy + m_1gy_1 + m_2gy_2 + m_3gy_3 + m_4gy_4 + m_5gy_5 + m_6gy_6 + m_7gy_7 + m_8gy_8 + m_ngy_n \quad (4)$$

Kinetik ve potansiyel enerji ifadelerinde görülen fiziksel parametreler Tablo-1’de işlevleriyle belirtilmiştir;

Tablo 1. Robotun Fiziksel Parametreleri

Sembol	Açıklama
M	Robot Gövdesinin Kütlesi
x	Robot Gövdesinin Yatay Eksendeki Konumu
y	Robot Gövdesinin Düşey Eksendeki Konumu
m_{1-8}	Robot Bacak Uzunlarının Kütleleri
x_{1-8}	Robot Bacak Uzunlarının Yatay Eksendeki Konumları
y_{1-8}	Robot Bacak Uzunlarının Düşey Eksendeki Konumları
I	Robot Gövdesinin Atalet Momenti
θ	Robot Gövdesinin Düzleme Dik Eksene Göre Açısal Konumu
θ_{1-8}	Bacak Uzunlarının Açısal Konumları
l_g	Robot Gövdesinin Uzunluğu
l_{1-8}	Bacak Uzunlarının Uzunluğu
a	Kule Uzunluğu
b	Namlu Uzunluğu
α	Namlunun Gövdeye Göre Bağlı Açısal Konumu
x_n	Namlunun Yatay Eksendeki Konumu
y_n	Namlunun Düşey Eksendeki Konumu
m_n	Namlunun Kütlesi

Lagrange-Euler yönteminde hareket denklemlerini elde etmek için öncelikle gövdenin ve tüm bacakların (5)-(22)’de verildiği gibi yatay ve düşey eksenlerdeki konum ifadelerinin belirlenmesi gerekir.

$$x_1 = x - \frac{l_g}{2} \cos \theta + l_1 \cos \theta_1 \quad (5)$$

$$y_1 = y - \frac{l_g}{2} \sin \theta + l_1 \sin \theta_1 \quad (6)$$

$$x_2 = x + \frac{l_g}{2} \cos \theta + l_2 \cos \theta_2 \quad (7)$$

$$y_2 = y + \frac{l_g}{2} \sin \theta + l_2 \sin \theta_2 \quad (8)$$

$$x_3 = x - \frac{l_g}{2} \cos \theta + l_1 \cos \theta_1 + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_3) \quad (9)$$

$$y_3 = y - \frac{l_g}{2} \sin \theta + l_1 \sin \theta_1 + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_3) \quad (10)$$

$$x_4 = x + \frac{l_g}{2} \cos \theta + l_2 \cos \theta_2 + l_4 \cos(\theta_2 + \theta_4) \quad (11)$$

$$y_4 = y + \frac{l_g}{2} \sin \theta + l_2 \sin \theta_2 + l_4 \sin(\theta_2 + \theta_4) \quad (12)$$

$$x_5 = x - \frac{l_g}{2} \cos \theta + l_5 \cos \theta_5 \quad (13)$$

$$y_5 = y - \frac{l_g}{2} \sin \theta + l_5 \sin \theta_5 \quad (14)$$

$$x_6 = x + \frac{l_g}{2} \cos \theta + l_6 \cos \theta_6 \quad (15)$$

$$y_6 = y + \frac{l_g}{2} \sin \theta + l_6 \sin \theta_6 \quad (16)$$

$$x_7 = x - \frac{l_g}{2} \cos \theta + l_5 \cos \theta_5 + l_7 \cos(\theta_5 + \theta_7) \quad (17)$$

$$y_7 = y - \frac{l_g}{2} \sin \theta + l_5 \sin \theta_5 + l_7 \sin(\theta_5 + \theta_7) \quad (18)$$

$$x_8 = x + \frac{l_g}{2} \cos \theta + l_6 \cos \theta_6 + l_8 \cos(\theta_6 + \theta_8) \quad (19)$$

$$y_8 = y + \frac{l_g}{2} \sin \theta + l_6 \sin \theta_6 + l_8 \sin(\theta_6 + \theta_8) \quad (20)$$

$$x_n = x - a \sin \theta + b \cos(\alpha + \theta) \quad (21)$$

$$y_n = y + a \cos \theta + b \sin(\alpha + \theta) \quad (22)$$

Bu konum ifadelerinin zamana göre türevleri kinetik enerji için gerekli hız

ifadelerini verecektir. Bu hız denklemlerinin de kullanımı ile Lagrange ifadesi bulunmuş olur. Elde edilen bu Lagrange ifadesi Ek-1’de verilmiştir.

Robotun hareketini temsil eden bağımsız diferansiyel denklemlerin herbiri, (1) no’lu ifadede gösterilen genel Lagrange denklemi yardımıyla elde edilebilmektedir. Hareketli robotun bacaklarının yer ile teması sonucunda oluşan zemin tepki kuvvetlerinin robot gövdesine olan tesirlerinin hesaplanabilmesi için Jakobien matrislerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ele alınan düzlemsel hareket için zemin tepki kuvvetlerinin sadece x ve y bileşenleri göz önünde bulundurulmuş ve gerekli jakobien matrisi (23) ifadesi kullanılarak elde edilmiştir. Namlunun gövdeye etkisini bulmak için kullanılması gereken jakobien matrisi de (24)’te verilmiştir.

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_i}{\partial x} & \frac{\partial x_i}{\partial y} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_3} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_4} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_5} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_6} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_7} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_8} \\ \frac{\partial y_i}{\partial x} & \frac{\partial y_i}{\partial y} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta_3} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta_4} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta_5} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta_6} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta_7} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta_8} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_n}{\partial x} & \frac{\partial x_n}{\partial y} & \frac{\partial x_n}{\partial \theta} & \frac{\partial x_n}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial y_n}{\partial x} & \frac{\partial y_n}{\partial y} & \frac{\partial y_n}{\partial \theta} & \frac{\partial y_n}{\partial \alpha} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Bu çalışma kapsamında ele alınan 4 bacaklı robot ve üzerine yerleştirilen silah kulesine ait parametreler sayısal olarak Tablo 2.’de verilmiştir.

Tablo 2. Robotun Fiziksel Parametrelerine Ait Sayısal Değerler

Parametre	Sayısal Değer
M	12 kg
l_g	0,8 m
l_1, l_2, l_5, l_6	0,24 m
	0,2 m

l_3, l_4, l_7, l_8	1,5 kg
m_1, m_2, m_5, m_6	0,5 kg
m_3, m_4, m_7, m_8	0,1 m
a	0,3 m
b	1 kg
m_n	

3. Robotun PID Kontrolü ve Yürüyüş Simülasyonları

Klasik PID kontrol yöntemi, kapalı çevrim kontrol yapısına sahiptir. Kapalı çevrim kontrol yapısına geri beslemeli kontrol yapısı adı da verilmektedir. PID kontrol yöntemine göre kontrol işaret sinyali (25)’te görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

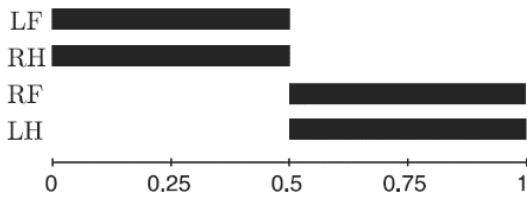
$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (25)$$

Burada K_p ; oransal kazancı (proportional gain), K_d ; türevsel kazancı (derivative gain), K_i ; integral kazancı (integral gain), $e(t)$ ise hata değerini ifade etmektedir. Oransal kazanç; kontrol hatasının anlık değerlerine bağlı bir katkı sağlar. Türevsel kazanç; kontrol hatasının değişme oranına etki eder ve sonuç olarak hatayı sıfıra götüren hızlı bir moddur.

İntegral kazanç; birikmiş hatayla orantılı olan ve yavaş bir reaksiyon kontrol modu anlamına gelen bir kontrolör çıkışı verir. Bu da, kalıcı durum hatasını sıfıra zorlar(Goodwin, 2000). PID kontrolünün optimal parametreleri, kontrolün uygulandığı sistem üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir (Feng vd., 2018). Bu çalışmada tasarlanan kontrolörde oransal, türevsel ve integral katsayıları deneme yanılma tekniği ile $K_p=500$, $K_d=50$, $K_i=0,1$ olarak belirlenmiştir.

Robota ait herbir bacak eklemine izlemesi gereken açısız referans konumları, yörünge planlaması ile belirlenmiştir. Daha sonra eklemler PID kontrol ile bu referans konumlara götürölmek üzere kontrol edilmiştir. Bacak hareket mekanizması çok karmaşık bir problemdir. Herbir bacak ileriye ve geriye doğru hareket ettirilir.

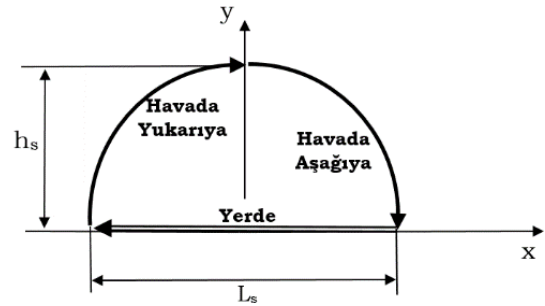
Böceklerin hareketinden türetilen adım hareketi, bacak havada (swing) ve bacak yerde (stance) olmak üzere 2 aşamaya sahiptir (Jakimovski, 2011). Quadruped (dört bacaklı) robotlar 4 tip yürüyüşe sahiptir. Bu yürüyüşlere “yürüme, tırıs, ağır adım ve dörtlü” isimleri verilmiştir (Pei vd., 2012). Bu çalışmada simülasyonlar için Şekil 2’de gösterilen yürüyüş dizisi kullanılmıştır (Santos vd., 2011). Bu yürüyüş dizisinin ilk yarı periyodunda robotun sol ön bacağı ile sağ arka bacağı yer ile temas halindedir. Yürüyüş dizisinin son yarı periyodunda ise robotun sağ ön bacağı ile sol arka bacağı yer ile temas halindedir. Bu yürüyüş dizisinin robot gövdesinde yol açtığı hareketlilik namı stabilizasyonuna bozucu etki olarak yansımaktadır.



Şekil 2. Dört Bacaklı Robot için Tırıs Yürüyüş Dizisi

Dört bacaklı robot yürüyüşü esnasında bir bacak adım atarken ayak ucu Şekil 3.’te x-y düzleminde gösterilen eğri yolunu takip etmektedir. Her bir adım havada ve yerde olan aşamalardan oluşmaktadır. Bacağın yer ile temasının kesildiği anda havadaki

aşama başlamaktadır. Bacaklar hareketini havadayken sinüzoidal olarak gerçekleştirmektedir. Bacağın yere temas etmeye başladığı anda havadaki aşama bitmekte ve yerdeki aşama başlamaktadır. Yerdeki aşamada bacak yere sürekli temas etmektedir ve ayak ucu zemine paralel olarak düz doğrusal hareket ettirilmektedir. Bu sayede yerdeki aşamada robot gövdesi bacak tarafından yere paralel biçimde itilmektedir. Dört bacaklı robot, tırıs yürüyüş periyodu boyunca daima 2 bacak üzerinde taşınmaktadır.



Şekil 3. Robot Bacağının Bir Adımında İzleyeceği Yörünge

Bacağın havadaki aşamasında izlemesi gereken yörüngeyi matematiksel olarak ifade edebilmek için (26) no’lu eşitlikte verilen sinüzoidal fonksiyon kullanılmıştır. Burada h_{step} bacağın yerden kalkma yüksekliğidir. Fonksiyona ait ω parametresi, adım hareketinin frekansını ifade etmektedir.

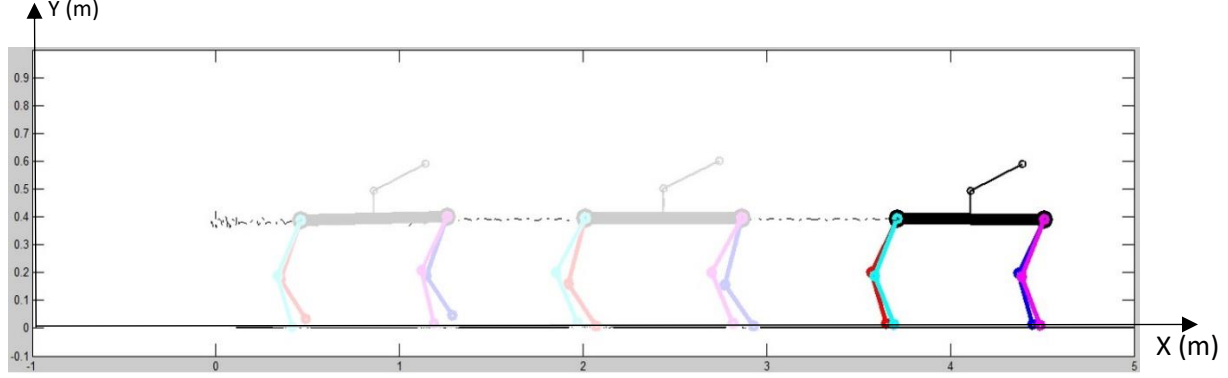
$$h_s = h_{step} \sin(2\pi\omega t) \quad (26)$$

Yer aşamasında L_s olarak belirtilen kenar uzunluğu, bacağın bir adımında x-ekseni doğrultusundaki ilerleme miktarını göstermektedir. Yer aşamasında geçen süre, bir periyotluk yürüyüş için geçen toplam sürenin $\frac{1}{2}$ ’sine eşittir. Yürüyüşün bir periyotluk toplam süresi T_G saniye olarak

gösterilirse, robotun ilerleme hızı V_r , (27)'de görüldüğü gibi L_s adım uzunluğuna bağlı olarak hesap edilebilmektedir. Adım uzunluğu, adım yüksekliği ve yürüyüş periyodu gibi parametrelerin değiştirilmesi

ile adım karakteristikleri düzenlenebilmektedir.

$$V_r = \frac{L_s}{T_G} \quad (27)$$

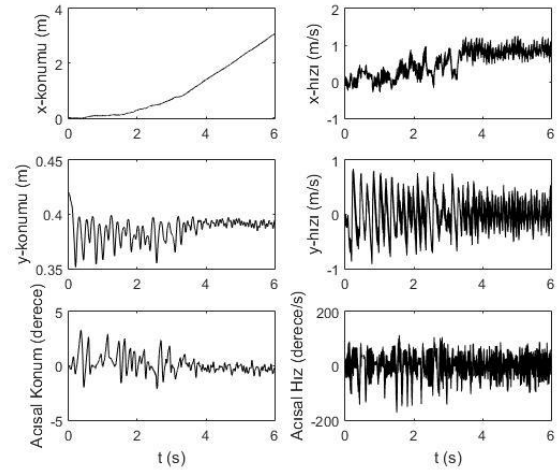


Şekil 4. Dört Bacaklı Robotun Tırıs Yürüyüş Simülasyonu

Dinamik modeli elde edilmiş dört bacaklı robotun tırıs yürüyüşü, Matlab paket programında simüle edilerek gerçekleştirilmiştir. Yürüyüş simülasyonunun farklı aşamalarından elde edilmiş görüntü, Şekil 4'te verilmiştir.

Robot durağan halden harekete başlamış ve 6 saniyelik simülasyon sonunda yaklaşık 4 metre kadar yol almıştır. Simülasyon süresince robot gövde merkezinin yatay x-ekseninde ve dikey y-eksenindeki zamana göre yer değişimleri, düzleme dik eksen etrafındaki açılma yer değişimi Şekil 5.'te gösterilmiştir. Bu grafiklerle birlikte ayrıca robot gövde merkezinin doğrusal ve açılma hız değişimlerini gösteren grafikler de sunulmuştur. Yürüyüşün ilk anlarında robot gövde merkezinin dikeydeki iniş ve kalkış biçimindeki salınımının genliği 3-4 cm dolaylarında olduğu görülmektedir. Aynı biçimde robot gövde merkezinin yalpalama genliği ise 2-3 derece dolaylarında olduğu görülmüştür. Simülasyonun 3. saniyesinden itibaren bu salınım ve yalpalama genliklerinde büyük oranda azalmalar oluşmuştur. Bununla birlikte robot, simülasyonun 4. saniyesinden itibaren 1 m/s

büyükliğünde doğrusal hıza sahip olarak yatayda ilerlemeye devam etmektedir.



Şekil 5. Dört Bacaklı Robotun Tırıs Yürüyüş Simülasyonundan Elde Edilen Yatay Eksendeki Konum ve Hız Grafikleri

Robotun yatay eksendeki hareketinden elde edilen Şekil 5'teki grafiğe bakıldığında, simülasyonda verilen değerlerde olduğu gibi 1 m/sn'lik hıza ulaşmış ve 4 metrelik yolu katettiği görülmüştür. Dikey eksendeki harekete bakıldığında; robotun gövdesini dikeyde yaklaşık 0,4 m yükseklikte tutmaya çalıştığı görülecektir. Dolayısıyla bu hareketi yaptığı anda dikey

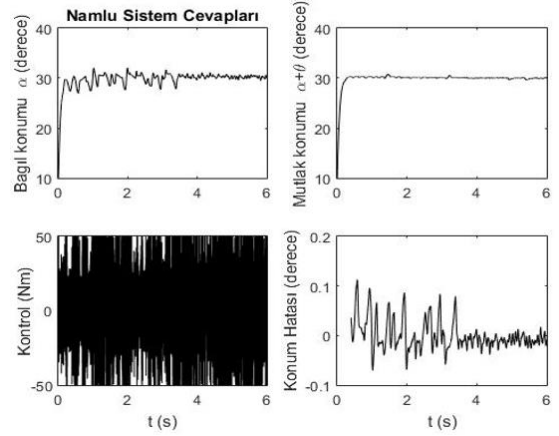
eksendeki hızının yaklaşık olarak 0 m/sn olduğu görülmektedir.

4. Silah Kulesinin Stabilizasyonu

Bu çalışmada robot üzerine yerleştirilmiş silah kulesinin namlu açısı hedeflenen konumda tutulmak istenmiştir. Robotun yürümesi sonucu gövdesi üzerinde oluşan salınım ve yalpalama hareketleri silah kulesine bozucu bir etki olarak tesir etmektedir. Namluyu hedeflenen açısal konumda tutabilmek için klasik PID kontrol yöntemi uygulanmıştır. Namlu için belirlenen kontrol kazanç katsayıları $K_p=1100$, $K_d=70$, $K_i=0,35$ olarak belirlenmiştir. Bu katsayılar deneme yanılma tekniği ile elde edilmiştir. Bu çalışmada namlunun 3 farklı referans açısı için robot yürüyüşü esnasında kontroller gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda namlu başlangıç açısı 10° olarak kabul edilmiştir.

Referans Açısı -1;

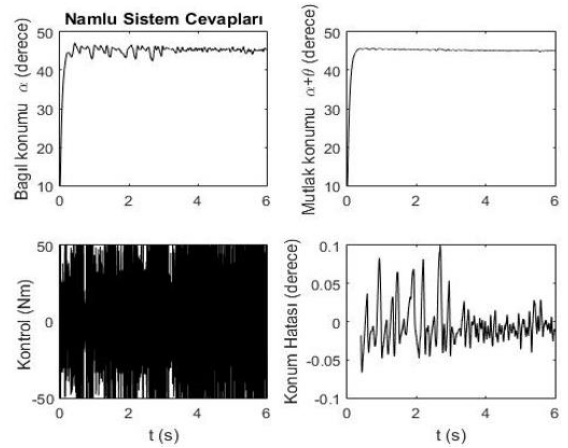
Namlu açısının yere göre 30° 'de tutulmak istenmesi ile uygulanan kontrol ve gerçekleştirilen simülasyonun sistem cevapları Şekil 6.'da grafiksel olarak sunulmuştur. Namlunun gövdeye göre bağıl açısal konumu α , gövde hareketleri ile ilişkili olarak salınlı olduğu görülmüştür. Kontrolör, namlunun yatay x-eksenine göre mutlak açısal konumunu ($\alpha + \theta$), oldukça küçük hata ve salınımlarla hedef açısında tutulabilmiştir. Referans konum etrafında namlunun açısal hata büyüklüğü en fazla $0,15^\circ$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 6. Simülasyonda 30° için Namluya Ait Sistem Cevapları

Referans Açısı-2;

Namlu açısını yere göre 45° 'de tutmak için uygulanan kontrol ve simülasyonun sistem cevapları grafiksel olarak Şekil 7.'de verilmiştir. Namlu açısal konumunun, referans açısal konumu küçük bir miktar hata payı ile izleyebildiği görülmüştür. Referans konum etrafında namlunun açısal hata büyüklüğü en fazla $0,08^\circ$ olarak elde edilmiştir.

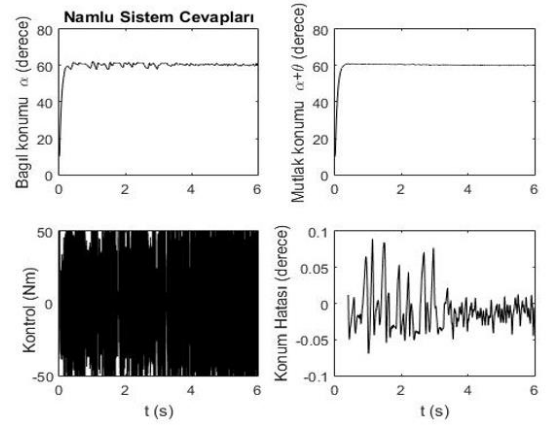


Şekil 7. Simülasyonda 45° için Namluya Ait Sistem Cevapları

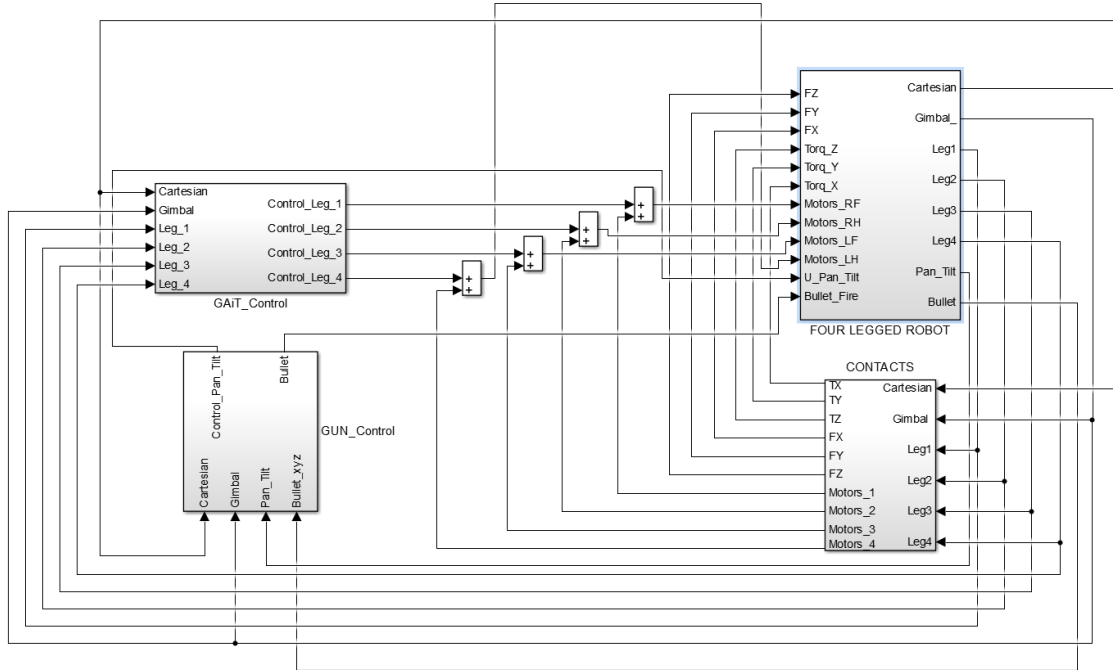
Referans Açısı-3;

Namlu açısının yere göre 60° 'de tutulması için uygulanan kontrol ve gerçekleştirilen simülasyonun sistem cevapları Şekil 8.'de grafiksel olarak sunulmuştur. Namlu açısal konumunun, referans açısal konumu

izlerken referans konum etrafındaki açısıl hata büyüklüğünün maksimum $0,12^\circ$ olduğu görülmüştür.



Şekil 8. Simülasyonda 60° İçin Namluya Ait Sistem Cevapları



Şekil 9. Matlab/Simulink Simülasyon Görşeli

Sistemi simüle edebilmek için oluşturulan Matlab/Simulink programının bir görşeli Şekil 9.'da verilmiştir.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada namlu stabilizasyonu için dört ayaklı bir robot üzerine bir silah kulesi yerleştirilmiştir. Düzlemsel olarak ele alınan sistemin dinamik hareket denklemleri matematiksel olarak elde edilmiştir. Robotun tırıs yürüyüşü sağlanarak simülasyonlar

gerçekleştirilmiştir. Bu yürüyüş esnasında robot gövdesinde meydana gelen yalpa ve salınım hareketleri silah kulesine bozucu etki olarak tesir ettirilmiştir. Namlunun stabilizasyonu için klasik PID kontrol yöntemi uygulanmıştır. Kontrol kazanç katsayıları deneme yanılma tekniği ile elde edilmiştir. Simülasyonlar neticesinde elde edilen sistem cevaplarında namlunun referans konumlarını belirli bir hata ile oldukça başarılı bir biçimde kontrol edebildiği görülmüştür. Ancak, kontrol kazanç katsayılarının optimum değerlerinin

kullanımı ile bu başarının artacağı beklenmektedir. Bununla birlikte, farklı kontrol yöntemlerinin uygulanması ve bu kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması ile bu başarının sonuçları ortaya konulabilecektir. Bu çalışmada üzerine silah kulesi yerleştirilmiş dört ayaklı bir robotun savunma sanayisinde kullanılabileceği ve namlu stabilizasyonunun gerçekleştirilebileceği ortaya konulmuştur.

6. Kaynaklar

Dhaouadi, R., Hatab, A. A. 2013. Dynamic Modelling of Differential-Drive Mobile Robots Using Lagrange and Newton-Euler Methodologies: A Unified Framework. *Advanced in Robotics and Automation Vol. 2*, pp. 3.

Feng, H., Yin, C. B., Weng, W. W., Ma, W., Zhou, J. J., Jia W, H., Zhang, Z. 2018. Robotic excavator trajectory control using an improved GA based PID controller. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 105, 153-168.

Ganesh, K. K., Pushparaj, M. P. 2013. Dynamic Modelling & Simulation of a Four Legged Jumping Robot With Compliant Legs. *Robotic and Autonomous Systems*, 61, pp. 221-228.

Goodwin, C. G., Graebe, S. F., Salgado, M. E. 2000. *Control System Design*, Prentice Hall, pp. 158-159.

Gor, M. M., Pathak, P. M., Samantaray, A. K., Yang, J. M., Kwak, S. W. 2015. Control Oriented Model-Based Simulation and Experimental Studies on a Compliant

Legged Quadruped Robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 72, pp. 217-234.

Işık, H. 2016. Namlu İçerisindeki Balistik Parametrelerin Modellenmesi. *The Journal of Defense Sciences*, Vol. 15, pp. 159.

Jakimovski, B. 2011. *Biologically Inspired Approches for Locomotion, Anomaly Detection and Reconfiguration for Walking Robots*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Kline, A., Ahner, D., Hill, R. 2019. The weapon-target assignment problem. *Computers and Operations Research*, 105, 226-236.

Lee, Y, W. 2007. Neural solution to the target intercept problems in a gun fire control system. *Neurocomputing*, 70, 689-696.

Pei, Z., Song, L., Chen, B., Guo, X. 2012. Adaptive Control of a Quadruped Robot Based on Central Pattern Generators. *IEEE-2012*.

Rice J. R. 1983. *Numerical Methods, Software and Analysis*, Mc-Graw Hill, New York.

Santos, C. P., Matos, V. 2011. Gait Transition and Modulation in a Quadruped Robot: A Brainstem-Like Modulation Approach, 59, pp.620-634.

Songül, S. 2014. Tank Namlusu Stabilizasyon Sisteminin Arduino İle Uygulanması ve Deneysel Düzeneğinin Hazırlanması. Master Tezi, Trakya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, pp. 20.

EKLER

Ek-1

$$\begin{aligned}
L = & \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} M \dot{y}^2 + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 + \frac{m_1 \dot{x}^2}{2} + \frac{m_1 \dot{y}^2}{2} + \frac{m_1 l_g^2 \dot{\theta}^2}{8} + \frac{m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2}{2} \\
& + \frac{m_1 l_g \dot{x} \dot{\theta} \sin \theta}{2} \\
& - m_1 \dot{x} l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 - \frac{m_1 l_g \dot{y} \dot{\theta} \cos \theta}{2} + m_1 \dot{y} l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 - \frac{m_1 l_g l_1 \dot{\theta} \dot{\theta}_1 \cos(\theta - \theta_1)}{2} \\
& + \frac{m_2 \dot{x}^2}{2} + \frac{m_2 \dot{y}^2}{2} + \frac{m_2 l_g^2 \dot{\theta}^2}{8} + \frac{m_2 l_2^2 \dot{\theta}_2^2}{2} - \frac{m_2 l_g \dot{x} \dot{\theta} \sin \theta}{2} - m_2 \dot{x} l_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 + \frac{m_2 l_g \dot{y} \dot{\theta} \cos \theta}{2} \\
& + m_2 \dot{y} l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 + \frac{m_2 l_g l_2 \dot{\theta} \dot{\theta}_2 \cos(\theta - \theta_2)}{2} + \frac{m_3 \dot{x}^2}{2} + \frac{m_3 \dot{y}^2}{2} + \frac{m_3 l_g^2 \dot{\theta}^2}{8} + \frac{m_3 l_1^2 \dot{\theta}_1^2}{2} \\
& + \frac{m_3 l_3^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)^2}{2} + \frac{m_3 l_g \dot{x} \dot{\theta} \sin \theta}{2} - m_3 \dot{x} l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 - m_3 \dot{x} l_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \sin(\theta_1 + \theta_3) \\
& - \frac{m_3 l_g \dot{y} \dot{\theta} \cos \theta}{2} + m_3 \dot{y} l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + m_3 \dot{y} l_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \cos(\theta_1 + \theta_3) \\
& - \frac{m_3 l_g l_1 \dot{\theta} \dot{\theta}_1 \cos(\theta - \theta_1)}{2} - \frac{m_3 l_g l_3 \dot{\theta} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \cos(\theta - \theta_1 - \theta_3)}{2} + m_3 l_1 l_3 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \cos \theta_3 \\
& + \frac{m_4 \dot{x}^2}{2} + \frac{m_4 \dot{y}^2}{2} + \frac{m_4 l_g^2 \dot{\theta}^2}{8} + \frac{m_4 l_2^2 \dot{\theta}_2^2}{2} + \frac{m_4 l_4^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4)^2}{2} - \frac{m_4 l_g \dot{x} \dot{\theta} \sin \theta}{2} - m_4 \dot{x} l_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\
& - m_4 \dot{x} l_4 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4) \sin(\theta_2 + \theta_4) + \frac{m_4 l_g \dot{y} \dot{\theta} \cos \theta}{2} + m_4 \dot{y} l_4 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4) \cos(\theta_2 + \theta_4) \\
& + m_4 \dot{y} l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 + \frac{m_4 l_g l_2 \dot{\theta} \dot{\theta}_2 \cos(\theta - \theta_2)}{2} + \frac{m_4 l_g l_4 \dot{\theta} (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4) \cos(\theta - \theta_2 - \theta_4)}{2} \\
& + m_4 l_2 l_4 \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4) \cos \theta_4 + \frac{m_5 \dot{x}^2}{2} + \frac{m_5 \dot{y}^2}{2} + \frac{m_5 l_g^2 \dot{\theta}^2}{8} + \frac{m_5 l_5^2 \dot{\theta}_5^2}{2} + \frac{m_5 l_g \dot{x} \dot{\theta} \sin \theta}{2} \\
& - m_5 \dot{x} l_5 \dot{\theta}_5 \sin \theta_5 - \frac{m_5 l_g \dot{y} \dot{\theta} \cos \theta}{2} + m_5 \dot{y} l_5 \dot{\theta}_5 \cos \theta_5 - \frac{m_5 l_g l_5 \dot{\theta}_5 \cos(\theta - \theta_5)}{2} \\
& + \frac{m_6 \dot{x}^2}{2} + \frac{m_6 \dot{y}^2}{2} + \frac{m_6 l_g^2 \dot{\theta}^2}{8} + \frac{m_6 l_6^2 \dot{\theta}_6^2}{2} - \frac{m_6 l_g \dot{x} \dot{\theta} \sin \theta}{2} - m_6 \dot{x} l_6 \dot{\theta}_6 \sin \theta_6 + \frac{m_6 l_g \dot{y} \dot{\theta} \cos \theta}{2} \\
& + m_6 \dot{y} l_6 \dot{\theta}_6 \cos \theta_6 + \frac{m_6 l_g l_6 \dot{\theta} \dot{\theta}_6 \cos(\theta - \theta_6)}{2} + \frac{m_7 \dot{x}^2}{2} + \frac{m_7 \dot{y}^2}{2} + \frac{m_7 l_g^2 \dot{\theta}^2}{8} + \frac{m_7 l_5^2 \dot{\theta}_5^2}{2} \\
& + \frac{m_7 l_7^2 (\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_7)^2}{2} + \frac{m_7 l_g \dot{x} \dot{\theta} \sin \theta}{2} - m_7 \dot{x} l_5 \dot{\theta}_5 \sin \theta_5 - m_7 \dot{x} l_7 (\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_7) \sin(\theta_5 + \theta_7) \\
& - \frac{m_7 l_g \dot{y} \dot{\theta} \cos \theta}{2} + m_7 \dot{y} l_5 \dot{\theta}_5 \cos \theta_5 + m_7 \dot{y} l_7 (\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_7) \cos(\theta_5 + \theta_7) \\
& - \frac{m_7 l_g l_5 \dot{\theta}_5 \cos(\theta - \theta_5)}{2} - \frac{m_7 l_g l_7 \dot{\theta} (\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_7) \cos(\theta - \theta_5 - \theta_7)}{2} + m_7 l_5 l_7 \dot{\theta}_5 (\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_7) \cos \theta_7 \\
& + \frac{m_8 \dot{x}^2}{2} + \frac{m_8 \dot{y}^2}{2} + \frac{m_8 l_g^2 \dot{\theta}^2}{8} + \frac{m_8 l_6^2 \dot{\theta}_6^2}{2} + \frac{m_8 l_8^2 (\dot{\theta}_6 + \dot{\theta}_8)^2}{2} - \frac{m_8 l_g \dot{x} \dot{\theta} \sin \theta}{2} - m_8 \dot{x} l_6 \dot{\theta}_6 \sin \theta_6
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -m_8 \dot{x} l_8 (\dot{\theta}_6 + \dot{\theta}_8) \sin(\theta_6 + \theta_8) + \frac{m_8 l_g \dot{y} \dot{\theta} \cos \theta}{2} + m_8 \dot{y} l_6 \dot{\theta}_6 \cos \theta_6 \\
 & + m_8 \dot{y} l_8 (\dot{\theta}_6 + \dot{\theta}_8) \cos(\theta_6 + \theta_8) + \frac{m_8 l_g l_6 \dot{\theta} \dot{\theta}_6 \cos(\theta - \theta_6)}{2} + \frac{m_8 l_g l_8 \dot{\theta} (\dot{\theta}_6 + \dot{\theta}_8) \cos(\theta - \theta_6 - \theta_8)}{2} \\
 & + m_8 l_6 l_8 \dot{\theta}_6 (\dot{\theta}_6 + \dot{\theta}_8) \cos \theta_8 + \frac{m_n \dot{x}^2}{2} + \frac{m_n \dot{y}^2}{2} + \frac{m_n a^2 \dot{\theta}^2}{2} + \frac{m_n b^2 (\dot{\alpha} + \dot{\theta})^2}{2} - m_n \dot{x} a \dot{\theta} \cos \theta \\
 & - m_n \dot{x} b (\dot{\alpha} + \dot{\theta}) \sin(\alpha + \theta) - m_n \dot{y} a \dot{\theta} \sin \theta + m_n \dot{y} b (\dot{\alpha} + \dot{\theta}) \cos(\alpha + \theta) \\
 & + m_n a b \dot{\theta} (\dot{\alpha} + \dot{\theta}) \sin \alpha - M g y - m_1 g y + m_1 g \frac{l_g}{2} \sin \theta - m_1 g l_1 \sin \theta_1 - m_2 g y \\
 & - m_2 g \frac{l_g}{2} \sin \theta - m_2 g l_2 \sin \theta_2 - m_3 g y + m_3 g \frac{l_g}{2} \sin \theta - m_3 g l_1 \sin \theta_1 \\
 & - m_3 g l_3 \sin(\theta_1 + \theta_3) - m_4 g y + m_4 g \frac{l_g}{2} \sin \theta - m_4 g l_2 \sin \theta_2 - m_5 g y \\
 & + m_5 g \frac{l_g}{2} \sin \theta - m_5 g l_5 \sin \theta_5 - m_6 g y - m_6 g \frac{l_g}{2} \sin \theta - m_6 g l_6 \sin \theta_6 \\
 & - m_7 g y + m_7 g \frac{l_g}{2} \sin \theta - m_7 g l_5 \sin \theta_5 - m_7 g l_7 \sin(\theta_5 + \theta_7) - m_8 g y \\
 & + m_8 g \frac{l_g}{2} \sin \theta - m_8 g l_6 \sin \theta_6 - m_8 g l_6 \sin(\theta_6 + \theta_8) - m_n g y - m_n g a \cos \theta \\
 & - m_n g a \sin(\alpha + \theta)
 \end{aligned}$$