



Madencilik İşlemlerinde Robotların Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Gökhan Külekçi^{1*}, Faruk Ünker²

^{1*} Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-2971-4045), gkulekci@gumushane.edu.tr

² Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye (ORCID: 0000-0002-9709-321X), farukunker@gumushane.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 5 Nisan 2022 ve Kabul Tarihi 27 Haziran 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1098949)

ATIF/REFERENCE: Külekçi, G. & Ünker, F. (2022). Madencilik İşlemlerinde Robotların Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (38), 137-142.

Öz

Gelişen teknoloji ile birlikte mobil robotlar, çeşitli alanlarda etkileyici ilerlemeler sağlamıştır. İnsanlık açısından en yorucu ve potansiyel olarak tehlikeli çalışma ortamlarından olan madenlerde mobil robotların bu ilerlemesinden etkilenenecektir. Şöyle ki, madencilik sektöründe madencilere yardımcı olarak hareket eden veya yeraltında konuşlandırılan tüm insan personelini değiştiren robotlarla daha yüksek bir otomasyon derecesi, madencilik maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaya yardımcı olabilir. Afet durumlarında, kurtarma robotları kayıp personelin bulunmasına yardımcı olabilir. Yalnızca robotlar tarafından işletilen insan sız makineler, insan hayatını hiçbir şekilde tehlikeye atmaz. Yapılan bu çalışmada yeraltı madenlerinde kurtarma, haritalama veya aktif çalışma amacı ile üretilebilecek robotlarda denge probleminin çözülmesi amaçlanmıştır. Yeni nesil jiroskop kullanılarak üretilen robotların her koşulda dengede kalması ve verilen görevi sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Açık işletme, Denge, İki tekerlekli robot, Yeni nesil jiroskop, Yeraltı madenciliği.

Investigation of The Usability of Robots in Mining Operations

Abstract

With the developing technology, mobile robots have made impressive progress in various fields. Mines, one of the most tiring and potentially dangerous working environments for humanity, will be affected by this advance of mobile robots. Namely, with the robots that can replace the underground personnel in the mining sector, occupational accidents and costs can be significantly reduced. In disaster situations, rescue robots can help locate missing personnel. Unmanned machines operated only by robots do not endanger human life in any way. In this study, it is aimed to solve the balance problem in robots that can be produced for rescue, mapping or active working in underground mines. It is aimed that the robots to be produced using the new generation gyroscope will remain in balance under all conditions and be able to perform the given task in a healthy way.

Keywords: Surface mine, Balance, Two wheeled robot, Next generation gyroscope, Underground mining.

* Sorumlu Yazar: gkulekci@gumushane.edu.tr

1. Giriş

Hızla gelişen teknoloji ve ham madde ihtiyacı Dünya üzerindeki madenlerin hızla tükenmesine sebep olmaktadır. Zengin maden yataklarının hızla azalması, maden arayışının daha derin madenlere yönelmesine sebep olmuştur (Külekcı 2021a-b, Külekcı ve Yılmaz, 2017; Külekcı ve Vural 2021; Külekcı ve Yılmaz 2018a-b, Külekcı 2019). Bu durum çok daha zor madencilik ve jeolojik koşullarda gerçekleştirilmektedir. Zor koşulların artması iş yoğunluğunu ve geliştirme maliyetlerindeki artışa yansımaktadır. Bunun yanında derin madencilik, oluşabilecek tehlikeli durumları artırmakta ve acil eylem planlarını yetersiz hale getirmektedir (Külekcı ve Çullu 2021, Külekcı, vd., 2018; Külekcı ve Yılmaz, 2019, Külekcı ve Çullu 2019). Bu ve benzer problemlerin giderilmesi açısından birçok araştırmacı madenlerde robot kullanılabilirliğini araştırmaktadır (Greh ve diğ. 2015, Nikitenko ve diğ. 2017 Mamurekl ve diğ.1996, Zhigang ve Lu 2011). Gelişen teknoloji ile birlikte mobil robotlar, çeşitli alanlarda etkileyici ilerlemeler sağlamıştır. Yeraltı madenleri insanlar için yorucu ve potansiyel olarak tehlikeli çalışma ortamları olduğundan, yeraltı madencilikindeki mobil robotların potansiyel faydaları çok fazladır. Ya madencilere yardımcı olarak hareket eden ya da yeraltında konuşlandırılan tüm insan personelini değiştiren robotlarla daha yüksek bir otomasyon derecesi, madencilik maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaya yardımcı olabilir. Afet durumlarında, kurtarma robotları kayıp personelin bulunmasına yardımcı olabilir. Yalnızca robotlar tarafından işletilen insansız makineler, insan hayatını hiçbir şekilde tehlikeye atmaz. Madenlerde robotlar destek ve kurtarma amaçlı olarak iki gruba ayrılır. Maden haritalamayı hızlandırmak, sanal modeller oluşturmak, işçilere yardımcı olmak, veri toplamak ve güvenliği artırmak için kullanılan robotlara destek robotları denir (Green, 2013). Yer hareketi (göçük), su baskını, hava patlaması, gaz patlamaları ve toz patlamaları gibi durumlarda, tüm galeri veya yolların, oksijen eksikliğinden ayrı olarak karbondioksit ve karbon monoksit gibi yüksek seviyelerde zararlı gazlar ve metan gibi patlayıcı gazlar ile dolması ve kurtarma personelinin görüşünü engelleyecek şekilde toz ve duman veya su ile dolu olduğu durumlarda kurtarma ekibinin giremeyeceği ortamlara girerek insan yeri tespit kurtarma ve analiz eden robotlara da kurtarma robotları denir (Rong ve diğ. 2011, Li ve diğ. 2019).

Küresel zengin maden yatakları tükenirken, Madencilik işlemleri yeraltında oldukça derinde ve çok daha zor madencilik ve jeolojik koşullarda gerçekleştirilmektedir. Bu durum, hem emek yoğunluğundaki ve geliştirme maliyetlerindeki artışı hem de artan acil durum olasılığını belirler (Fryanov ve diğ. 2017). Son yıllarda, maden işletmelerinde iş kazaları daha sık hale gelmiş ve bu iş kazaları sonucunda can kayıpları da artmıştır. Yeraltında çalışan insan faktörünün ortadan kaldırılması, oluşabilecek kazalarda can kaybını önlemek için ciddi bir çare olarak görülmelidir. Bu, yalnızca otomatik kontrol sistemleri kullanılarak insansız madencilik için makine ve teknoloji kullanımıyla sağlanabilir. Mekatronik sistem, ekipman türlerine göre ayrı alt sistemlere ayrılmıştır. En son veri toplama, dönüştürme ve iletme araçlarını kullanan telemetri ilkelerine dayalı otomatikleştirilmiş karmaşık uzaktan kumanda sistemine geliştirilmiştir. Otonom Sistem arayüzü, tüm vardiya boyunca operatörün en verimli ve hatasız performansını sağlar. Madencilik endüstrisindeki uzaktan kumandalı robotik kompleksin konsept uygulaması, yalnızca madenlerdeki acil durumların trajik sonuçlarından kaçınmaya değil, aynı zamanda

ulusal madencilik ekipmanı ve teknolojisini en yüksek dünya standartlarına yükseltmeye de olanak tanıyacaktır (Plotnikov ve diğ. 2020).

Madencilik sektöründe bu denli faydalı robot kullanılan alanların sınırlı olmasının en belirgin nedenleri; kullanılan robotların yavaş ve hantal olması, ayrıca yeraltı ve yer üstünde oluşabilecek coğrafi ve fiziki zorluklar karşısında denge problemi yaşamalarıdır. Kullanılan robotlar genel olarak palet hareket sistemi ile hareket etmektedirler, bu da hızlarının oldukça yavaş olmasına ve acil müdahale yapmalarına engel olmaktadır. Ayrıca denge sistemlerindeki aksaklıklar en küçük engebe veya tehlikede devrilmelerine neden olmaktadır (Ünker ve Çuvalcı 2019, Rong ve diğ. 2011, Green, 2013).

Bu çalışmada, yer üstü ve özellikle yeraltı madencilikinde destek ve kurtarma robotları gelişimi ve tasarımı incelenmiştir. Çalışmada madenlerde çalışabilecek iki tekerlekli yüksek hızlı robotlar tasarlanmıştır. Yapılan çalışma ile yeni nesil jiroskop kullanılarak madencilik sektöründe kullanılan robotlarda denge problemi ortadan kaldırılmış ve ilgili formül ve grafikler ile bu ortaya konulmuştur.

2. Materyal ve Metot

2.1. İki Tekerlekli Kazıcı Robotun Basitleştirilmiş Modeli

Madencilik sektöründe genel olarak 4 tekerlekli ya da palet sistemli hareketli robotlar tasarlanmıştır. Bunların en büyük dezavantajı, düşük hızları, büyük ağır olmaları ve yetersiz denge sistemlerinin olmasıdır.

Bu çalışmada, iki tekerlekli kendi kendini dengeleyen robot, gövdeyi dikey konumunda tutmak ve istenmeyen reaksiyon torklarını ortadan kaldırmak için birbirine zıt yönlerde hareket eden iki jiroskopik volan içeren iki gimbaldan oluşur.

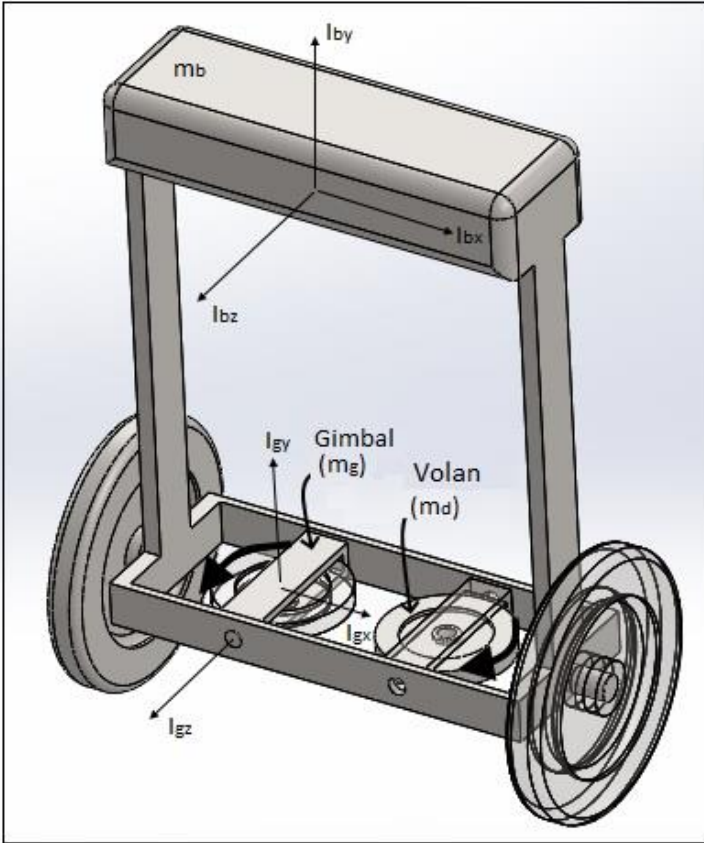
Robotun ağırlık merkezinden geçen eksene simetrik sol ve sağ tarafta, Şekil 1'de gösterildiği gibi robot gövdesine gimballar ile bağlı iki volan mevcuttur. Şekil 2'de gösterildiği gibi, tüm volanlar ve gimballar, tekerleklerin ortasındaki bir düzlemde ve kendi pivot eksenleri etrafında zıt yönlerde dönmektedir. Gimbalların açısız yer değiştirmeleri sırasıyla $-\theta$ ve θ olacaktır ve volanlar aynı açısız hızlarda dönerken gimbalların tek serbestlik derecesine sahip olduğu kabul edilebilir. Bu nedenle, robot ve jiroskopların hareketi sırasıyla z , θ ve φ bilinmeyenli (üç serbestlik dereceli) üç diferansiyel hareket denklemiyle (1-3) temsil edilebilir. Sistem elemanlarının tanımları ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

2.1.1. Robotun Hareket Denklemleri

Robotun dinamik matematiksel modelinden Lagrangian formülasyonu kullanılarak, hareket denklemleri türetilmiştir. İki jiroskopa sahip iki tekerlekli kendi kendini dengeleyen bir robotun basitleştirilmiş bir modeli Şekil 2'de gösterilmektedir. Jiroskopların kütle merkezi, sıfır potansiyel enerji olarak tekerleklerin dönme eksenini ve aynı zamanda robot gövdesinin (ters çevrilmiş sarkaç) dönme ekseninde bulunur. Lagrange denklemlerini uygulayarak, diferansiyel hareket denklemleri aşağıdaki gibi elde edilebilir (Ünker, 2020; Ünker, 2021):

Tablo 1. İki tekerlekli robotun fiziksel değerleri

Sembol	Sayısal değerler	Tanım
g	9.81 m/s ²	Yerçekimi ivmesi
r	0.15 m	Tekerlek yarıçapı
L	0.5 m	Gövde kütlesinin ağırlık merkezi uzaklığı
m _b	80 kg	Gövde kütlesi
m _g	2 kg	Herbir gimbalın kütlesi
m _w	15 kg	Herbir tekerleğin kütlesi
m _d	2.5 kg	Herbir jiroskopun volan kütlesi
I _p	0.007 kg.m ²	Herbir volanın dönme atalet momenti
I _o	0.004 kg.m ²	Herbir volanın kütle atalet momenti
I _{gx}	0.006 kg.m ²	Herbir gimbalın kütle atalet momenti
I _{gy}	0.006 kg.m ²	Herbir gimbalın kütle atalet momenti
I _{gz}	0.0007 kg.m ²	Herbir gimbalın kütle atalet momenti
I _{bx}	3.5 kg.m ²	Gövdenin kütle atalet momenti
I _w	0.25 kg.m ²	Tekerleğin dönme atalet momenti
Ω	0-3000 rad/s	Herbir volanın dönme hızı
τ	20cos(10t) N.m	Herbir tekerleğin torku
P	0	Gimbalın oransal kazanç katsayısı



Şekil 1. İki tekerlekli robotun fiziksel modeli (Ünker, 2021)

$$\left(M_t + \frac{2I_w}{r^2}\right) \ddot{z} + m_b L \ddot{\varphi} \cos \varphi - m_b L \dot{\varphi}^2 \sin \varphi = \frac{2\tau}{r} ; \quad (1)$$

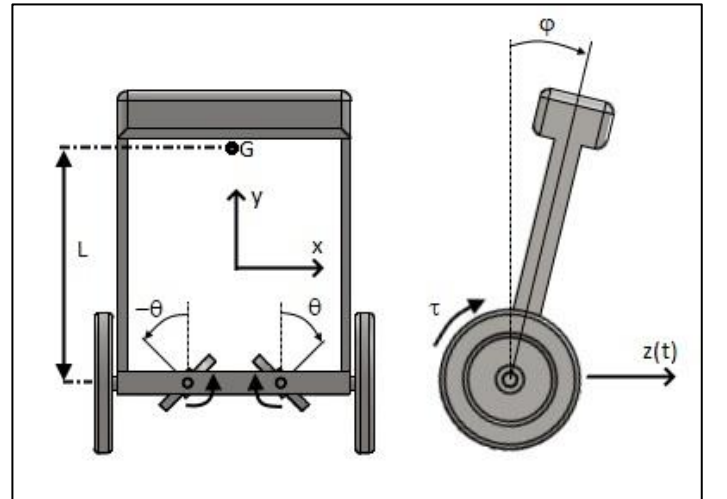
$$(I_o + I_{gz})\ddot{\theta} + (I_o - I_p + I_{gx} - I_{gy})\dot{\varphi}^2 \cos \theta \sin \theta -$$

$$I_p \Omega \dot{\varphi} \cos \theta = P\theta ; \quad (2)$$

$$(2I_o \cos^2 \theta + 2I_p \sin^2 \theta + 2I_{gx} \cos^2 \theta + 2I_{gy} \sin^2 \theta + I_{bx} + m_b L^2) \ddot{\varphi} + 4(I_p - I_o + I_{gy} - I_{gx}) \dot{\varphi} \dot{\theta} \sin \theta \cos \theta + 2I_p \Omega \dot{\theta} \cos \theta + \ddot{z} m_b L \cos \varphi - m_b g L \sin \varphi = -2\tau ; \quad (3)$$

burada

$$M_t = 2m_d + 2m_g + 2m_w + m_b \quad . \quad (4)$$



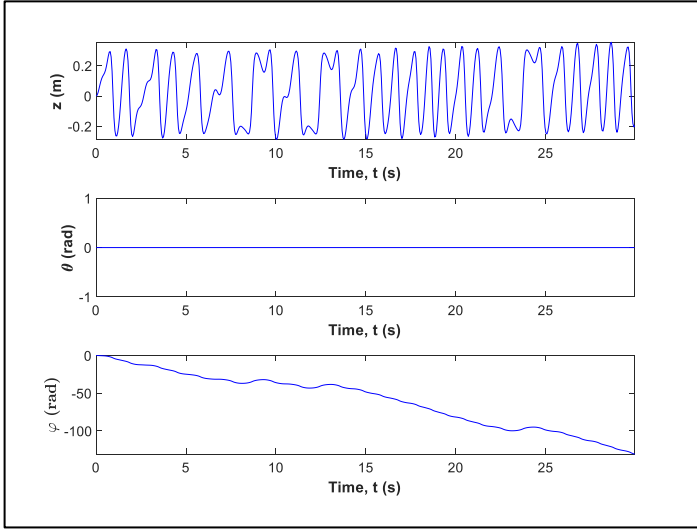
Şekil 2. İki tekerlekli robotun ağırlık merkezine (G) devrilme ekseninden uzaklık (L) (Ünker, 2021).

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

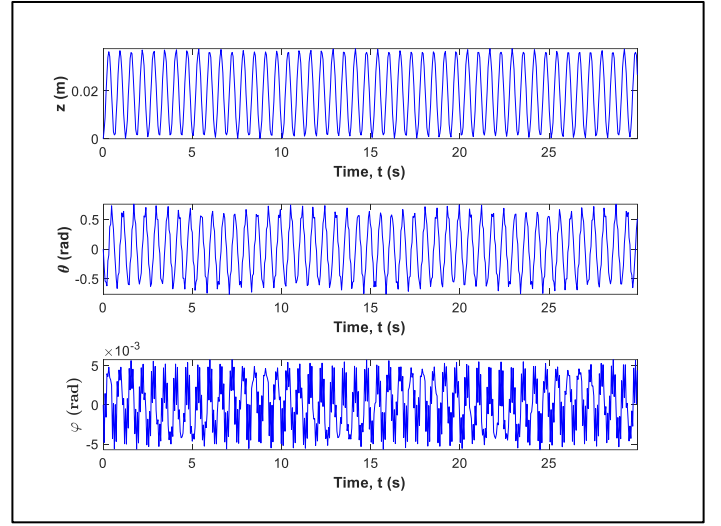
Gelecek yıllarda birçok sektörde olduğu gibi madencilik sektöründe de çok yaygın olarak kullanılacak iki tekerlekli robotların gelişimi çok önemlidir. Bu çalışma bu gelişime büyük katkı sağlayacaktır. Tablo 1'de verilen fiziksel parametrelere sahip hareket denklemlerinin (Denklem (1-3)) sayısal çözümü dördüncü dereceden Runge-Kutta yöntemi kullanılarak MATLAB yardımıyla çözülebilir. Robotun dinamik davranışını belirlemek için zamana bağlı sonuçlar 0,001 sn'lik zaman adımı ve sıfır başlangıç koşulları ile simüle edilmiştir.

3.1. Zaman Taraması

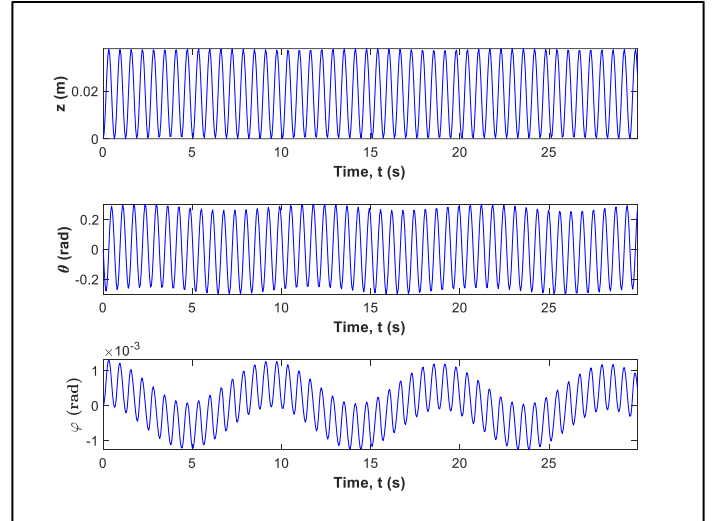
KontROLSÜZ ($\Omega=0$) ve kontrollü ($\Omega=1500$ ve 3000 rad/s) durumlar için $\omega=10$ rad/s frekansta ve $T_0 = 40$ Nm genlikli harmonik yük altında ($Tork=2\tau=40\cos(10t)$ Nm) yer değiştirme sonuçları sırasıyla Şekil 3-5'de gösterilmektedir. CMG'nin kontrol edilmesi ($\Omega=1500$ ve 3000 rad/s) robotun gövdesini sabit durum salınımında tutmasını sağlamıştır. Robotun ve gimbalın yer değiştirmelerinden, $\Omega=1500$ rad/s düşük hızla dönen volanın gimbalma ait presesyon genliği (θ_0) daha yüksek değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, kararlı bir hareket için gimbalın presesyon genliği (θ_0) mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır. Bunun için volanların açısız momentumları mümkün olduğunca yüksek olmalıdır.



Şekil 3. $\Omega=0$ rad/s için zamana bağlı yer değiştirme sonuçları ($Tork=2\tau=40\cos(10t)$ Nm).



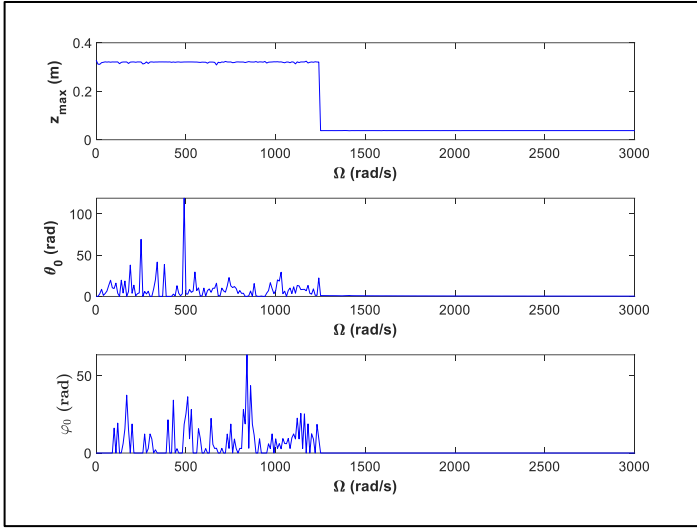
Şekil 4. $\Omega=1500$ rad/s için zamana bağlı yer değiştirme sonuçları ($Tork=2\tau=40\cos(10t)$ Nm).



Şekil 5. $\Omega=3000$ rad/s için zamana bağlı yer değiştirme sonuçları ($Tork=2\tau=40\cos(10t)$ Nm).

3.2. Volan Hızı Taraması

Şekil 6, diferansiyel hareket denklemlerinin, $Tork=40\cos(10t)$ N.m değeri için jiroskopun değişken volan hızlarındaki yer değiştirme genliklerini göstermektedir. Volan açısız hızına ait her bir tarama adımı 10 rad/s değerinde sabit tutularak her tarama sırasında 20 saniyelik yer değiştirme için maksimum genlik belirlenmiştir. Şekil 5'ten anlaşılacağı üzere volan hızının yüksek değerlerinde jiroskopun daha fazla kontrol momentine sahip olacağından, gimbalın presesyon genliği θ_0 ve gövdenin devrilme açısı genliği φ_0 azalır ve robot gövdesinin (Z_{max} , φ_0) hareketi daha kararlı duruma geçer.



Şekil 6. Volan hızının yer değiştirmeler üzerindeki etkisi.
($T_{ork}=2\tau=40\cos(10t)$ N.m)

4. Sonuç

Bu çalışmada, hız, denge ve güvenlik bakımından özellikle yeraltı madenciliğinde insan faktörünün yerini alması öngörülen iki tekerlekli maden robotu tasarlanmıştır. Tasarlanan robota yeni nesil jiroskop yerleştirilerek yeraltı koşullarına uygunluğu ortaya konmuştur. Oransal kontrollü CMG sayesinde, iki tekerlekli robotun devrilmesine neden olan atalet kuvvetleri ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca, oransal kontrolcü sayesinde, geleneksel jiroskopun eksikliği olan volanın sabit açısız hızında devrilmeye karşı sürekli sabit bir moment üretmesi sağlanmıştır. Burada oransal kontrol sayesinde jiroskop, ana gövdeyi dikey konumunda tutmak için gimbalın hareketini dengeler.

Hareket denklemlerinin simülasyon sonuçları, robotun kontrollü CMG kullanarak dengesini kaybetmeden hızlanabileceğini göstermektedir. Performans önemli ölçüde volan hızına ve dolayısıyla açısız momentuma bağlıdır.

Bu çalışma ile, madencilik sektörü düzensiz bir yapıdır özellikle yeraltında engebeli arazide sürekli değişen koşullar ve coğrafya mevcuttur. Bu zor koşullarında insan üstü denge yeteneklerine sahip robotlar insanların yaptığı bütün işleri (kazi, kontrol, ölçüm, taşıma vb.) yapabilecek ve insanların görebileceği zararları min. seviyeye düşüreceği ortaya konmuştur.

Fiziki bir robot yapımının maliyeti karşılanamadığı için, yapılan çalışma simülasyon programı ile desteklenmiş teorik bir çalışmadır. Bu konuda yapılacak çalışmalarda bu robotun fiziki olarak yapılarak denge ve kullanılabilirlik açısından, uygulama ve teorikte uyuşup uyuşmadığı incelenebilir.

Kaynakça

Chen J, Ye P, Sun H, et al. (2016). Design and motion control of a spherical robot with control moment gyroscope, IEEE International Conference on Systems and Informatics, Shanghai, China, 19 – 21 November 2016, 144–120.
Defendini A, Fauchaux P, Guay P, et al. (2003). Control Moment GYRO CMG 15-45 S: a compact CMG product for agile satellites in the one ton class”, 10th European space mechanisms and tribology symposium, San Sebastián, Spain, 25 September 2003, 524; pp.27–31. ESA.

Mamurekl, D., Aydın, C., Deveci, H., & Sönmez, A.T. (1996). Robotics Control in Mining, Madencilik,3-18, 35, 2.
Grasser, F., Arrigo, A.D. & Colombi, S. (2002). JOE: A mobile, inverted pendulum, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 49(1), 107–114.
Hosoda, Y, Egawa, S, Tamamoto, J., et al. (2006). Basic design of human-symbiotic robot EMIEW, International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, 9-15 October 2006, pp. 5079–5084.
Imtiaz, M.A., Naveed, M., Bibi, N., et al. (2018). Control System Design, Analysis & Implementation of Two Wheeled Self Balancing Robot, 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference, Vancouver, Canada, 1-3 November, pp.1-6.
Irdayanti, Y, Kusumanto, R.D., Anisah, M., et al. (2020). Ultrasonic Sensor Application As A Performance Enhancement of Robot Two Wheels, J. Phys.: Conf. Ser. 1500 (012007).
Green, J. (2013). Mine Rescue Robots Requirements Outcomes from an industry workshop, 2013 6th Robotics and Mechatronics Conference (RobMech) Durban, South Africa, October 30-31, 2013
Korayem, M.H. & Gariblu, H. (2003). Maximum Allowable Load on Wheeled Mobile Manipulators Imposing Redundancy Constrains. Robotics and Autonomous Systems, 44, 151-159.
Korayem, M.H. & Gariblu, H. (2004). Analysis of Wheeled Mobile Flexible Manipulator Dynamic Motions with Maximum Load Carrying Capacities. Robotics and Autonomous Systems, 48(2-3): 63-76.
Korayem, M.H., Azimi, V., Vatanjou, H., & Korayem, A.H. (2012). Maximum load determination of nonholonomic mobile manipulator using hierarchical optimal control. Robotica, 30 (1), 53-65.
Korayem, M.H., Azimirad, V., Nikoobin, A., & Boroujeni, Z. (2010). Maximum Allowable Load of autonomous mobile manipulator in environment with obstacle considering tip over stability. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 46(5-8), 811-829.
Küleççi, G. (2021a). Comparison of Field and Laboratory Result of Fiber Reinforced Shotcrete Application. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 65(2), 463–73.
Küleççi, G. (2021b). Investigation of fly ash added light concretes with respect to gamma radiation transmission properties of 133 Ba and 137 Cs. Radiation Effects and Defects in Solids, 176(9–10), 833–44.
Küleççi, G. & Çullu, M. (2021). The Investigation of Mechanical Properties of Polypropylene Fiber-Reinforced Composites Produced With the Use of Alternative Wastes. Journal of Polytechnic.
Küleççi, G. & Yılmaz A. O. (2018a). Roadway Tunnel Construction With Drilling-Blasting Method; Gümüşhane Environment Road Example. International Journal on Mathematic, Engineering and Natural Sciences 4, 34–39.
Küleççi, G. & Çullu, M. (2019). The Effect of Polypropylene Fibers, Used in Different Proportions, on Paste Filling. İçinde 3. International Conference on Advanced Engineering Technologies, 313–20.
Küleççi, G., Çullu, M., & Yılmaz, A.O. (2018). Environmental problems to be created in mining procedures and measures to be taken example of a quarry dust emission, 4th EurAsia Waste Management Symposium, EurAsia2018, 319-327.

- Külekcı, G. & Yılmaz A.O. (2017). Investigation of Trabzon Volcanities Usable as External Covering, *MSU Journal of Science*, 5 (2), 459-464.
- Külekcı, G. & Yılmaz A.O. (2019). Investigation of the effect of activities in a copper mine on historical works, an example of Gümüşhane Süleymaniye. *Journal of underground resources* 16(8), 1–14.
- Külekcı, G. (2019). The Distribution Of Water In Artvin Region Volcanites. *ICOCEM 2019, Giresun, Turkey*.
- Külekcı, G. & Yılmaz A. O. (2018b). A Case Study On The Effects Of Stone Quarries On Environment And Agricultural Land. *BAHÇE* 47(2), 148–62.
- Külekcı, G. & Vural A. (2021). Determining Excavability In A Quarry And Comparison With The Applied Method. *International Halich Congress On Multidisciplinary Scientific Research*, 299–307.
- Larimi, S.R., Zarafshan, P., & Moosavian, S.A.A. (2015). A new stabilization algorithm for a two-wheeled mobile robot aided by reaction wheel. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 137(1), 011009 (8 pages)
- Li, Z. & Li, S. (2021). Saturated PI Control for Nonlinear System With Provable Convergence: An Optimization Perspective. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 68(2), 742-746.
- Li, Z., Li, C., Li, S., & Cao, X. (2020). A Fault-Tolerant Method for Motion Planning of Industrial Redundant Manipulator. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(12), 7469–7478.
- Lin, S.C., Tsai, C.C., & Huang, H.C. (2011). Adaptive robust self-balancing and steering of a two-wheeled human transportation vehicle. *J Intell Robot Syst*, 62(1), 103–123.
- Nikitenko, M.S., Malakhov, Y.V., Neogi, B., Chakraborty, P., & Banerjee, D. (2017). Robotic complex for the development of thick steeply-inclined coal seams and ore deposits *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 84 (2017), 012002. doi :10.1088/1755-1315/84/1/012002
- Mahvan, A. & Akbarzadeh, A. (2015). Gyro stabilized two-wheeled inverted pendulum robot. *Proceedings of the 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics*, Tehran, Iran, 7-9 October 2015, pp. 669–674. IEEE.
- Li, M., Zhu, H., You, S., Wang, L., & Tang C. (2019). Efficient Laser-Based 3D SLAM for Coal Mine Rescue Robots, *IEEE Access*. doi : 10.1109/ACCESS.2018.2889304
- Plotnikov, N.S., Kolokoltseva, E.U., & Volkova. Y.V. (2020). Technical Review of Robotic Complexes for Underground Mining, *Earth and Environmental Science*. 459 (2020), 042025. IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/459/4/042025
- Zhigang, N. & Lu, W. (2011). Hazardous Gas Detecting Method Applied in Coal Mine Detection Robot *Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*.
- Park, J.H. & Cho, B.K. (2018). Development of a self-balancing robot with a control moment gyroscope. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 15, 1–11.
- Ruan, X. & Chen, J. (2010). H1 robust control of self-balancing two wheeled robot. *8th World congress on intelligent control and automation*, Jinan, China, 7-9 July 2010, pp. 6524–6527.
- Greh, S., Donner, M., Ferber, M., Dietze, A., Mischo, H., & Jung, B. (2015). Mining-RoX – Mobile Robots in Underground Mining, *Third international future mining conference / sydney, NSW, 4–6 NOVEMBER 2015*
- Takei, T., Imamura, R., & Yuta, S. (2009). Baggage transportation and navigation by a wheeled inverted pendulum mobile robot. *IEEE Transactions on Industrial Electronic*, 56(10): 3985-3994.
- Tanaka, K. & Nagasawa, S. (2020). Posture stability control of a small inverted pendulum robot in trajectory tracking using a control moment gyro, *Advanced Robotics*. 34(9), 610-620.
- Ünker, F. (2021). Proportional Control Moment Gyroscope for Two-Wheeled Self-Balancing Robot. *Journal of Vibration and Control*. 0(0): 1–9.
- Ünker, F. & Çuvalcı, O. (2019). Optimum Tuning of a Gyroscopic Vibration Absorber for Vibration Control of a Vertical Cantilever Beam with Tip Mass. *International Journal of Acoustics and Vibration*. 24(2): 210–216.
- Ünker, F. (2020). Tuned gyro pendulum stabilizer for control of vibrations in structures. *International Journal of Acoustics and Vibration*. 25(3): 355–362.
- Fryanov, V.N., Pavlova, L.D., & Temlyantsev, M.V. (2017). Theoretical approaches to creation of robotic coal mines based on the synthesis of simulation Technologies. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 84 (2017), 012001 do i :10.1088/1755-1315/84/1/012001
- Wasiwitonon, U., Wahjudi, A., & Saputra, A.K., (2020). Stabilization and disturbance attenuation control of the gyroscopic inverted pendulum. *Journal of Vibration and Control*. 0(0): 1-11.
- Xu, J., Shang, S., Qi, H., et al. (2016), Simulative investigation on head injuries of electric self-balancing scooter riders subject to ground impact. *Accid Anal Prev*. 89, 128–141.
- Rong, X., Song, R., Song, X., & Li, Y. (2011). Mechanism and explosion-proof design for a coal mine detection robot. *Procedia Engineering*. 15 (2011) 100 – 104.
- Yetkin, H. & Özgüner, U. (2013). Stabilizing control of an autonomous bicycle. *9th Asian control conference (ASCC)*, Istanbul, Turkey, 23-26 June 2013, pp.1–6.
- Yun, S.Y., Lee, W.S., & Gwak, K.W. (2020). CMG-based anthropomorphic test device for human rider behavior reproduction for two-wheeled self-balancing personal mobility. *Mechatronics*. 69, 102365.