



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Diferansiyel sürürlü otonom mobil robotların avare teker kaynaklı sapmaların incelenmesi

Investigation of deviation of a differential drive autonomous mobile robot induced with caster wheels

Yazar(lar) (Author(s)): Ali KİBAR¹, Alaattin Eray GÜRKAL², Eylül ÖZER³, Alparslan Burak İNNER⁴

ORCID¹: 0000-0002-2310-1088

ORCID²: 0000-0003-2857-5706

ORCID³: 0000-0002-7468-5810

ORCID³: 0000-0003-0933-654X

To cite to this article: Kibar M., Gürkal A. E., Özer Y. ve Inner A.B, “Investigation of deviation of a differential drive autonomous mobile robot induced with caster wheels”, *Journal of Polytechnic*, 27(3): 947-955, (2024).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Kibar M., Gürkal A. E., Özer Y. ve Inner A.B, “Investigation of deviation of a differential drive autonomous mobile robot induced with caster wheels”, *Politeknik Dergisi*, 27(3): 947-955, (2024).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1104014

Diferansiyel Sürürlü Otonom Mobil Robotların Avare Teker Kaynaklı Sapmaların İncelenmesi

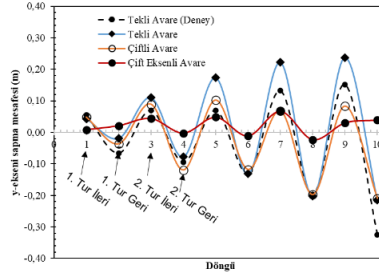
Investigation of Deviation of a Differential Drive Autonomous Mobile Robot Induced with Caster Wheels

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Otonom Mobil Robotun (OMR) lineer hareketindeki yanal sapmalara avare tekerleklerin etkisi. / The effect of caster wheels on lateral deviations in the linear motion of Autonomous Mobile Robot (AMR).
- ❖ OMR'nin dönüşlerinde en fazla sapma tekli avare en az sapma ise çiftli döner avare tekerlerde meydana gelmektedir. / The most and least deviations in AMR turns are single caster and dual swivel caster wheels, respectively.
- ❖ Çift tekerli OMR'lerde meydana gelen sapmalar OMR'nin ağırlığından hemen hemen bağımsız hale gelmektedir. / The deviations occurring in the AMRs with double caster and dual caster are independent of AMR's weight.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Otonom Mobil Robotların (OMR) hareket doğrultusunda ileri ve geri yaptığı hareketlerde meydana gelen yanal sapmalara avare tekerleklerin etkisi incelenmiştir. / The effect of caster wheels on the lateral deviations that occur in the forward and backward movements of Autonomous Mobile Robots (AMR) was investigated.



Şekil. Toplam ağırlığı 75 kg olan OMR'nin ileri ve geri döngü turlarında yapmış olduğu yanal sapma miktarları. / **Figure.** The lateral deviations of AMR with a total weight of 75 kg in the forward and reverse loops.

Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı, diferansiyel tahrikli Otonom Mobil Robotlar (OMR) için tekerleklerin hareket yönündeki sapmalar üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır. / The purpose of this study is to investigate the effect of caster wheels on the deviations in the direction of motion for Autonomous Mobile Robots (AMR) with differential drive.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Simülasyonlarda tekli, çiftli ve çift eksenli avare olmak üzere üç farklı tipte tekerlek kullanılmıştır. OMR, 5 kez ileri ve 5 kez geri olmak üzere 10 kez doğrusal olarak hareket ettirilmiştir. / Three different types of caster wheels, including single, double, and dual swivel caster wheels were used in the simulations. The AMR was moved linearly 10 times, including 5 times forward and 5 times reverse directions.

Özgünlük (Originality)

Avare tekerleklerin OMR'nin yanal sapmalarındaki etkisi araştırılmıştır. / The effect of caster wheels in the lateral deviations of OMR is investigated.

Bulgular (Findings)

Sapma oranı, tekli avare tekerli OMR için en yüksektir. Çiftli avare tekerler, tekli avare tekerlere göre daha düşük sapma oranına sahiptir. Buna karşılık, çift eksenli avare tekerlere sahip OMR'nin sapması en düşük olmaktadır. / The deviation rate is the highest for AMR with a single caster wheel. Double caster wheels have a lower deviation rate than single caster wheels. In contrast, OMR with dual swivel caster wheels has the lowest deflection.

Sonuç (Conclusion)

OMR'nin sapmaları, azalan sırayla tekli, çiftli ve çift eksenli avare tekerlerden meydana gelmektedir. / Deviations of AMR from low to high occur single, double, and in dual swivel caster wheels, respectively.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Diferansiyel Sürüşlü Otonom Mobil Robotların Avare Teker Kaynaklı Sapmaların İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Ali KİBAR^{1*}, Alaattin Eray GÜRKAL², Eylül ÖZER³, Alparslan Burak İNNER³

¹Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

³Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 15.04.2022 ; Kabul/Accepted : 19.01.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 02.03.2023)

ÖZ

Bu çalışmada, Otonom Mobil Robotların (OMR) dönüşleri esnasında hareket doğrultusunda meydana gelen sapmalara avare tekerlerin etkisi incelenmiştir. Avare tekerlerin sürüş etkilerinin incelenmesi için CoppeliaSim programında bir OMR'nin analizi yapılmıştır. CAD programında tasarımı yapılan avare tekerleklerin Unified Robot Description Format (URDF) dosyası CoppeliaSim programına aktarılmıştır. OMR'nin ağırlığının dönüşlere etkisini incelemek için toplamda 75 ve 150 kg olmak üzere iki farklı ağırlıkta OMR kullanılmıştır. Analizlerde tekli, çiftli ve çift eksenli olmak üzere 3 farklı avare teker çeşidi kullanılmıştır. Avare tekerler arasında kıyaslama yapabilmek için diğer parametreler olan avare tekerin çapı, dönme eksenini ve toplam yüksekliği her bir durum için sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, tekli avare tekerler dönüşlerde en fazla sapmaya neden olmaktadır. Çiftli avare tekerlerdeki sapmalar, tekli avare tekere göre daha düşük değerlerdedir. Bununla beraber, en düşük sapma miktarı çift eksenli avare tekerlerde olmaktadır. Ayrıca, çift avare teker ve çift eksenli avare teker bulunan OMR'lerde meydana gelen sapmalar tekli avare tekere oranla OMR'nin ağırlığından çok fazla etkilenmemektedir.

Anahtar Kelimeler: Otonom mobil robot, diferansiyel sürüş, avare teker, robot simülasyonu.

Investigation of Deviation of a Differential Drive Autonomous Mobile Robot Induced with Caster Wheels

ABSTRACT

In this study, the effect of caster wheels on the deviations in the direction of movement of Autonomous Mobile Robots (AMR) is investigated. An AMR designed to examine the driving effects of caster wheels was analyzed in CoppeliaSim. The Unified Robot Description Format (URDF) file of the caster wheels, designed in the CAD program, was transferred to the CoppeliaSim program. Two different AMRs, which were 75 and 150 kg in total weight, were used to examine the effect of the weight of the AMR. Three types of caster wheels, which were single, double, and dual axial, were used in the analysis. The diameter, axis of rotation, and the total height of the caster wheel parameters were kept constant to compare wheels for each case. The results suggest that single caster wheels cause the most deviation in turns of AMR. The deviation in the double caster wheel is lower than on the single wheel. Furthermore, the lowest amount of deviation is in the dual axial caster wheels. Additionally, the deviations occurring in the AMRs with double caster and dual swivel caster are not affected by the weight of the AMR.

Keywords: Autonomous mobile robot, differential drive, caster wheels, robot simulation.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dördüncü Sanayi Devrimi (Endüstri 4.0) olarak adlandırılan sürecin başlamasıyla birlikte endüstrideki tüm süreçlerin günümüz teknolojik şartlarına uygun bir şekilde yönetilmesi zorunlu hale gelmiştir [1]. Endüstrinin gelişmesine paralel olarak lojistiğe duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır [2,3]. Bu artan lojistik ihtiyacı için mobil robot kullanımı da yaygınlaşmaktadır.

Bu robotlar, otomatik veya otonom olarak yönlendirme sistemlerine sahip olabilmektedir. Otomatik olarak yönlendirilen robotlar, Otomatik Yönlendirmeli Araç

(OYA), otonom olarak yönlendirilenler ise Otonom Mobil Robot (OMR) olarak isimlendirilmektedir [4]. OYA'lar gerçekleştirdikleri işler için çalıştıkları ortamlarda manyetik şerit, renkli çizgi, reflektör vb. gibi kılavuzlara ihtiyaç duymaktadırlar. OMR'ler ise alan tarayıcı ve/veya kamera verilerini kullanarak doğal navigasyondan faydalanarak çalışmaktadırlar [5].

OMR'ler kullanılacakları ortamın lazer alan tarayıcı ile haritasını çıkarırlar. Bu şekilde yapılan haritalama ile hedef konum belirlenerek güvenli bir şekilde belirlenen konumlar arasında yönlendirilmektedir [6].

OYA'lar şerit veya çizgi gibi bir yönlendiriciye ihtiyaç duyarken OMR'ler lazer tarayıcı ve kamera sayesinde yaptıkları haritalama ile böyle bir yönlendirmeye gerek

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : alikibar@kocaeli.edu.tr

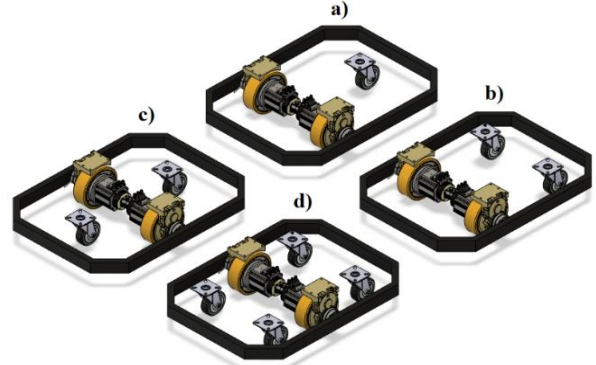
duymazlar. Hem OMR hem OYA'ların çekici, taşıyıcı, forklift ve konveyör gibi çeşitleri bulunmaktadır.

OYA ve OMR'lerin hareket kabiliyetine bağlı olarak holonomik ve holonomik olmayan şekilde karakterize edilmektedir [7]. Holonomik robotlar, herhangi bir düzlemde üç serbestlik derecesinde hareket edebilen robotlardır [8]. Holonomik olmayan robotlar ise yalnızca iki serbestlik derecesinde hareket etmektedir [9].

Avare tekerler, OMR başta olmak üzere birçok endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Avare tekerler, tekerin kendi eksenini etrafında dönüştürerek tekerin hareket yönünü değiştirmek için dikey eksen etrafında 360° dönüş yapabildiği tekerlerdir. OMR'lerin steer, quad ve diferansiyel olmak üzere 3 farklı şekilde sürüş yöntemi bulunmaktadır. Steer sürüş yönteminde belli bir yarıçap içerisinde dönüş gerçekleştirilmektedir. Quad sürüş yönteminde ileri, geri, yanlara ve çapraz yönlerde hareket edilebilmektedir. Diferansiyel sürüş yönteminde ise kendi ekseninde dönüş gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 1'de gösterildiği gibi diferansiyel sürüşlerde avare tekerlerin konumlandırılması farklı şekillerde yapılabilmektedir. Bu yöntemde, iki adet tahrik tekeri bulunmaktadır. Avareler ise önde tek (Şekil 1a), önde iki adet (Şekil 1b), önde ve arkada birer (Şekil 1c) ve önde ve arkada ikişer (Şekil 1d) olmak üzere temelde dört farklı çeşit kullanılmaktadır. Tahrik tekerlerinin ortada bulunması, OMR'nin dönüşlerinde robotun dönme yarıçapını minimize etmektedir (Şekil 1c, Şekil 1d). Böylece, robot dönme merkezi eksenini etrafında küçük bir dönme yarıçapı ile dönebilmektedir. Ayrıca, robotun ileri ve geri 180° dönüş hareketlerinde tahrik tekerlerinin ortada olmasıyla her iki hareket de aynı hassasiyetle gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 1c, Şekil 1d). OMR'lerde genellikle 2 adet motora bağlı sürücü teker ve 4 adet de avare teker bulunan diferansiyel sürüş sistemi (Şekil 1d) yükün dengeli taşınması ve daha fazla yük kapasitesi sunması gibi avantajları sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır [10].

Sabit tekerler yalnızca ileri ve geri hareket yapabilen tekerlerdir. Avare tekerler ise dikey eksen etrafında 360° dönüş kabiliyetine sahiptir. Bu şekilde, avare tekerlerde kullanılan dikey dönme eksenini robotun dönüş ve ileri/geri hareketlerinde meydana gelen sapmaları azaltmaktadır. Bu dönme eksenini tekerlek (kaster) açısı oluşturmaktadır.

Avare tekerlerde pozitif, negatif ve nötr tekerlek açısı olmak üzere üç çeşit bağlanma açısı vardır. Bu açı, tekerleğe yandan bakıldığında direksiyon ekseninin dikey eksene göre ne kadar ileri veya geri olduğunun bir ölçüsüdür. Robotlarda çoğunlukla pozitif tekerlek açısı kullanılır. Pozitif tekerlek açısı, robotun dönüşünden sonra avare tekerleğin kendi kendine kendine merkezlenmesine yardımcı olan bir tork üretir [11]. Avare tekerler tekli, çiftli ve çift eksenli şekillerde olabilmektedir. Çift tekerli avareler genellikle büyük yükler için kullanılmaktadır.



Şekil 1. Diferansiyel sürüşlerde avare teker konumlandırılma çeşitleri (Caster wheel positions in differential drives)

Çift teker olduğu için yük ve robotun ağırlığından meydana gelen kuvvet tarafından zemine uygulanan basınç daha az olmaktadır. Çift eksenli avare tekerlerde ise çift dikey dönüş eksenini bulunmaktadır. Böylece, robotun dönüşlerinde tekerleri hareket yönüne göre hizalayarak tekerleğin toplam dönüş çapını otomatik olarak optimize etmektedir [12]. Bu sayede, robotun dönüşlerinde meydana gelen sapmalar en aza indirilmektedir. Bu durum, özellikle robotun ileri ve geri dönüş hareketlerinde sapmayı büyük oranda düşürmektedir. Avare teker seçiminde kaldırma kapasitesi, zeminin durumu ve çalışma şartları gibi kriterler kullanılmaktadır. Bu kriterlere ek olarak mobil robotlar gibi hassas sürüş hareketlerinin istendiği yerlerde bu çalışmanın konusu olan çift eksenli avare seçimi eklenebilmektedir.

OMR'nin taşıdığı yük ne kadar fazla olursa tekerler üzerindeki yük de o oranda artacağından, tekerleri döndürmek için daha fazla tork gerekmektedir. Bu torkun büyüklüğü teker ile zemin arasındaki sürtünme katsayısına bağlı olarak değişmektedir [12]. Çift tekerleklili avare kullanılması, döndürmenin çok daha az torkla gerçekleşmesini sağlayabilmektedir. Bunun nedeni, çiftli teker konfigürasyonunda tekerlerin çok daha az torkla dönebilmesidir. Çiftli tekerlerde bir teker saat yönünde dönerken diğer teker saat yönünün tersine dönerek tekerlere gelen kuvvet azalmaktadır. Kuvvette

meydana gelen bu azalma ile robotun hareket ettirilmesi için daha az torka ihtiyaç duyulacaktır. Böylece, ağır yükler taşınırken avare tekerlerin döndürülmesi çok daha basit bir işlem haline getirilebilmektedir [12].

OYA ve OMR'lerle ilgili çalışmalar son yıllarda katlanarak artmaktadır. Gürkal vd. [6] diferansiyel sürüşlü bir OMR'nin sayısal analizini incelemişlerdir. Yapmış oldukları özgün tasarım ile taşınacak yükün kuvvetini doğrudan tekerleklere aktarmışlardır. Yükün etki ettiği bölge ile taşıyıcı tekerlerin şaseye bağlandığı bölge arasındaki mesafenin olabildiğince az tutulması gerektiğini belirtmişlerdir. Konara vd. [13] tasarladıkları OYA'da kinematik ve dinamik analiz yapmışlardır. Çevresel ve araç parametrelerine bağlı olarak robotun hareketi için gerekli olan maksimum tork değerini incelemişlerdir. Ayrıca manyetik şerit takip sisteminin diğer şerit takip yöntemlerinden daha doğru ve istikrarlı olduğunu belirtmişlerdir. Chung vd. [14] yaptıkları çalışmada, iç mekânda çalışan holonomik ve çok yönlü bir mobil robotun tasarımını incelemişlerdir. Pasif pozisyondaki avare tekerlere motor ekleyerek aktif motorlu avare sistemi tasarlamışlardır. Bu sistem sayesinde istedikleri yöne gidebilen mobil robot ile deneyler gerçekleştirmişlerdir. Köseoğlu vd. [15] pürüzsüz yüzeylerde ve iç ortamlarda çalışan OMR'ler üzerine çalışmışlardır. CAD programı kullanarak tüm yükü taşıyabilecek robot şasesi tasarımı yapmışlardır. Yaptıkları tasarımda, 2 adet tahrik ve 2 adet avare teker olmak üzere 4 tekerlekli diferansiyel sürüşlü sistem kullanmışlardır. Koca vd. [16] mobil bir robotun simülasyonunu fizik motoruna sahip Gazebo ortamında gerçekleştirmişlerdir. Robotlar için simülasyon kullanılarak gerçek zamanlı bir robot davranışının karakterize edilebileceğini belirtmişlerdir. Arrizabalaga vd. [17] transpalet robotun hareketleri üzerine yapmış oldukları çalışmada, tekli avare tekerleğin hızı ve dönme eksenine olan açısına bağlı olarak yapmış oldukları sapmaları deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. 4 metre uzunluğundaki yolda hareket planlaması kullanarak avare tekerlek ile ilgili sapmaları deneysel verileri elde ettikleri kinematik denklemler ile karşılaştırmışlardır.

Mobil robotların hareket kabiliyetlerinin incelenmesi için deneysel ve simülasyon çalışmalarından faydalanılmaktadır. Deneysel çalışmalarda deneyin yapılması için prototip elde edilme zorunluluğu, deney yapılması için zaman kaybı ve eksik kısımların giderilerek yeni deneylerin yapılması için işlemlerin tekrarı gibi birçok olumsuz durumlar simülasyon programlarına olan ilgiyi artırmıştır [18]. Simülasyon çalışmalarında gerçek fiziki durumu en iyi yansıtan dinamik modelinin çok dikkatli bir şekilde oluşturulması gerekmektedir.

Bu çalışmada robotlarda kullanılan avare tekerlerin, robotun dönüşleri esnasında hareket doğrultusunda meydana gelen sapmalara avare tekerin etkisi incelenmiştir. Bunun için prototip bir OMR için üç farklı avare tekerlerin değişken yüklerde sapma davranışları ele alınmıştır. Literatürde avare tekerlek çeşitlerinin robotun hareket doğrultusundaki sapmaların incelenmesi üzerine bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Yalnızca tekli avare tekerin sapmasını deneysel ve kinematik olarak inceleyen bazı çalışmalar literatürde bulunmaktadır [17,19]. Böylece bu çalışma yüke bağlı olarak istenen hareket hassasiyetine göre avare teker kullanımı için bir farkındalık oluşturacaktır.

2. KİNEMATİK MODEL (KINEMATIC MODEL)

OMR'lerde hareket mekanizması olarak diferansiyel sürüş sistemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2'de diferansiyel sürüşe sahip bir OMR'nin koordinat sistemi gösterilmiştir. Robotun bulunduğu konum ve hedef konum arasındaki hareketindeki doğrusal ve açısal hızının hesaplamaları için kinematik denklemler kullanılmaktadır. Robotun bulunduğu konum, genel koordinat düzleminde bir referans noktasına göre yatay (x) ve dikey (y) mesafeleri ile robotun yatay eksene göre açısı kullanılarak belirlenir. Tekerlerin doğrusal hızları Denklem (1) kullanılarak bulunabilir [20].

$$V_L = rw_L, V_R = rw_R \quad (1)$$

Denklemdaki V_L ve V_R sırasıyla sol ve sağ tekerlerin doğrusal hızlarıdır. w_L ve w_R tekerlerin açısal hızlarıdır. r ise teker yarıçapıdır. Robotun hızı, Denklem (2)'de verildiği gibi sağ ve sol teker hızlarının ortalaması alınarak hesaplanır.

$$V = \frac{V_R + V_L}{2} \quad (2)$$

Robotun dönme merkezine göre açısal hızı Denklem (3) ile hesaplanır.

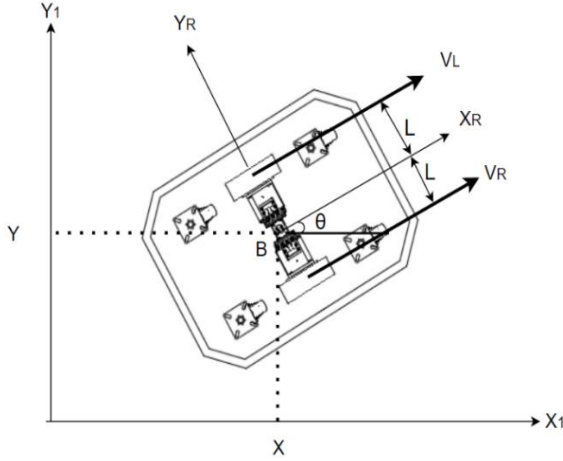
$$w = \theta = \frac{V_R - V_L}{2L} \quad (3)$$

Herhangi bir B pozisyonundaki robotun koordinatları B (x, y, θ) olarak tanımlanabilir. Burada θ robotun dikey eksen etrafındaki dönme açısını göstermektedir. L ise tahrik tekerlerinin robot dönme merkezine yanal uzaklığıdır. V_R yönünde (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**) herhangi bir hız yoktur. Buna göre hızlar Denklem (4)'teki gibi ifade edilir.

$$\dot{x} = v, \dot{y} = 0, \dot{\theta} = w \quad (4)$$

Böylece genel koordinatlara göre robotun kinematik eşitliği Denklem (5)'teki gibi ifade edilir [8].

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (5)$$



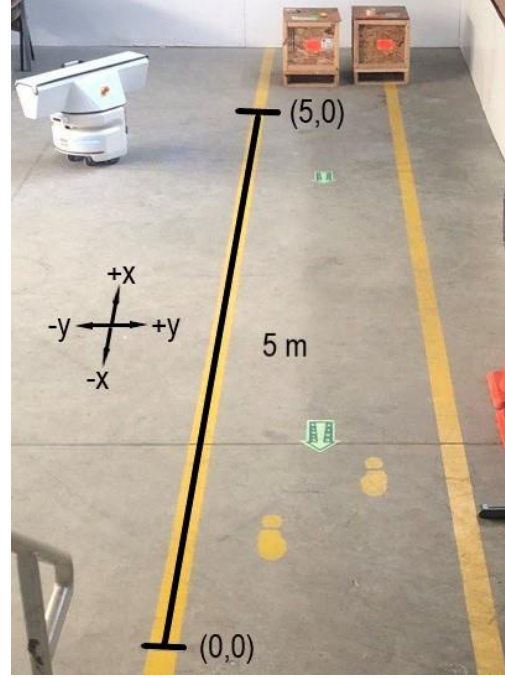
Şekil 2. Diferansiyel sürüslü robotun kinematığı (Kinematics of differential drive robot)

3. DENEYSSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL METHOD)

Şekil 3'te deney sistemi gösterilmiştir. Deneylerde, 50 cm genişliğinde, 110 cm uzunluğunda, 60 cm yüksekliğinde ve 75 kg ağırlığında, 2 adet tahrik tekeri, 2 önde ve 2 arkada olmak üzere 4 adet tekli avare tekerlek bulunan ve haznesindeki yükleri istenilen istasyonlara taşıyabilen OMR kullanılmıştır. Deneyler esnasında, OMR'nin ilk durgun haldeki konumu işaretlenmiştir. Robotun durgun halinde ilk pozisyonundan çizgi boyunca 5 m doğrusal olarak ileri yönde (+x) hareket ettirilmiştir. Bu mesafeyi gittikten sonra robot durdurulmuş ve durgun haldeki robotun bulunduğu nokta işaretlenmiştir. Daha sonra motorlar ters yönde döndürülerek robot 5 m mesafe geri yönde sürüş ile başlama noktasına götürülmüştür. Robotun bulunduğu konum ile ilk andaki bulunduğu konum arasındaki yanıl mesafe ($\pm y$) ölçülmüştür. Bu şekilde döngü tekrar edilerek robot 5 ileri ve 5 geri olmak üzere toplamda 10 defa doğrusal olarak hareket ettirilmiştir. Bu ileri ve geri hareketler esnasında her iki tahrik tekeri aynı açısal hızla aynı yönde döndürülerek doğrusal hareket elde edilmiştir.

4. SİMÜLASYON YÖNTEMİ (SIMULATION METHOD)

Bu çalışmada, Şekil 4a'da gösterilen OMR, CoppeliaSim programına aktarılmıştır (Şekil 4b). CoppeliaSim, robot sistemlerinin ve algoritmalarının prototiplenmesi, geliştirilmesi ve doğrulanması için kullanılan bir robot simülasyon ortamıdır [19].

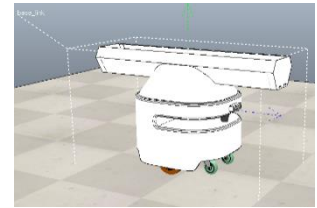


Şekil 3. Deney düzeneği (Experimental setup)

OMR'de diferansiyel sürüşe sahip olan ortada 2 adet tahrik tekerleği, ön ve arkada ise ikişer adet avare teker bulunmaktadır. Toplam ağırlığı 75 ve 150 kg olmak üzere 2 farklı robot için simülasyon çalışması yapılmıştır. OMR'nin ileriye ve geriye doğru hareketinde yanıl doğrultuda ($\pm y$) yapmış olduğu sapmalar tespit edilmiştir (Şekil 5). Yapılan denemelerde, OMR doğrusal bir şekilde 5 metre ileriye doğru (+x) daha sonra 5 metre geriye doğru (-x) doğrusal olarak hareket ettirilmiştir. Bu şekilde döngü, 5 ileri ve 5 geri olmak üzere toplamda 10 defa tekrar edilmiştir. OMR'nin ileri-geri hareketlerinde 5 metre hareketinden sonra durdurulmuş ve bulunduğu pozisyonun y eksenini CoppeliaSim programında kaydedilmiştir (Şekil 5).

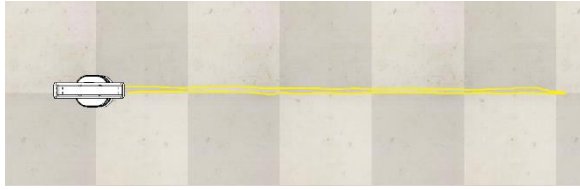


a)



b)

Şekil 4. OMR tasarımının a) deney ve b) CoppeliaSim'de görüntüsü (View of the OMR in a) experiment and b) in CoppeliaSim)

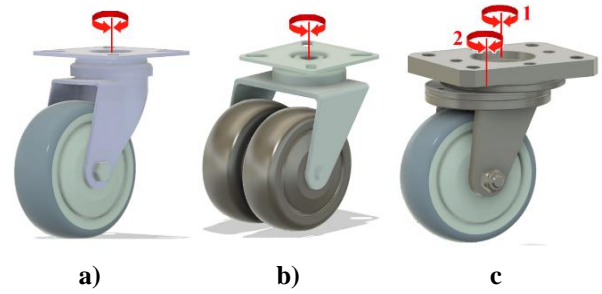


Şekil 5. Tekli avare teker bulunan OMR'nin CoppeliaSim programında analizi (Simulation of AMR with single caster in CoppeliaSim software)

Simülasyon çalışmasında tekli avare, çiftli avare ve çift eksenli avare olmak üzere 3 farklı avare teker modellenmiş ve her biri için robotun ileri-geri hareketinde sapma oranları tespit edilmiştir. Şekil 6'da bu çalışmada kullanılan avare tekerler gösterilmiştir. Tekli avarede (Şekil 6a) bir adet teker kullanılmasına karşılık çiftli avarede (Şekil 6b) iki adet teker kullanılmıştır. Çiftli avaredeki her iki tekerler birbirlerinden bağımsız olarak farklı yönlerde dönüş yapabilmektedir. Böylece, çiftli avare teker Şekil 6b'de gösterildiği gibi dönme ekseninde dönerken, bir tekerlek ileri yönde, diğer teker ters yönde dönebilmektedir. Çift eksenli avare tekerde ise Şekil 6c'de gösterildiği gibi dikey doğrultuda iki adet dönme eksenli bulunmaktadır. Tekerde meydana gelen kuvvete bağlı olarak bu iki dönüş hareketi eş zamanlı olarak gerçekleşebilmektedir [21].

Çizelge 1'de bu çalışmada kullanılan avare tekerlerin ölçüleri verilmiştir. Avare tekerlerde; teker çapı, toplam yükseklik ve dönme eksenli olmak üzere üç adet tanım bulunmaktadır. Kullanılan avare tekerlerin tümünde;

Çift eksenli teker çapı 75 mm, toplam yüksek 100 mm ve teker genişliği 25 mm olarak kullanılmıştır.



Şekil 6. a) Tekli avare teker, b) Çiftli avare teker, c) Çift eksenli avare teker (a) Single caster wheel, (b) Double caster wheel, (c) Dual swivel caster wheel)

Dönme eksenli tekli ve çiftli avare tekerde 28 mm'dir. Çift eksenli avare tekerde ise en düşük 2 mm en yüksek 22 mm olmaktadır. Bu tip avare tekerde dönüş esnasında dönme eksenleri eş zamanlı olarak değiştiği için en düşük ve en yüksek değerleri almaktadır. Robot doğrusal olarak hareket ettiğinde avare teker, en yüksek dönme eksenli değeri olan 22 mm durumda bulunmaktadır. Bu tekerde dönme eksenli mesafesi, dönüş esnasında 2 ile 22 mm arasında değişmektedir. Dönüş tamamlandıktan sonra doğrusal giderken, dönme eksenli mesafesi yine 22 mm olmaktadır.

avare bulunan OMR ise ilk turda çok az bir miktar

Çizelge 1. Avare tekerlerin ölçüleri. (Caster wheel dimensions)

	Yükseklik	Teker Çapı	Dönme Eksenli	Teker Genişliği
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Tekli Avare	100	75	28	25
Çiftli Avare	100	75	28	25 (Tek Teker) 8 (Boşluk)
Çift Eksenli Avare	100	75	2-22	25

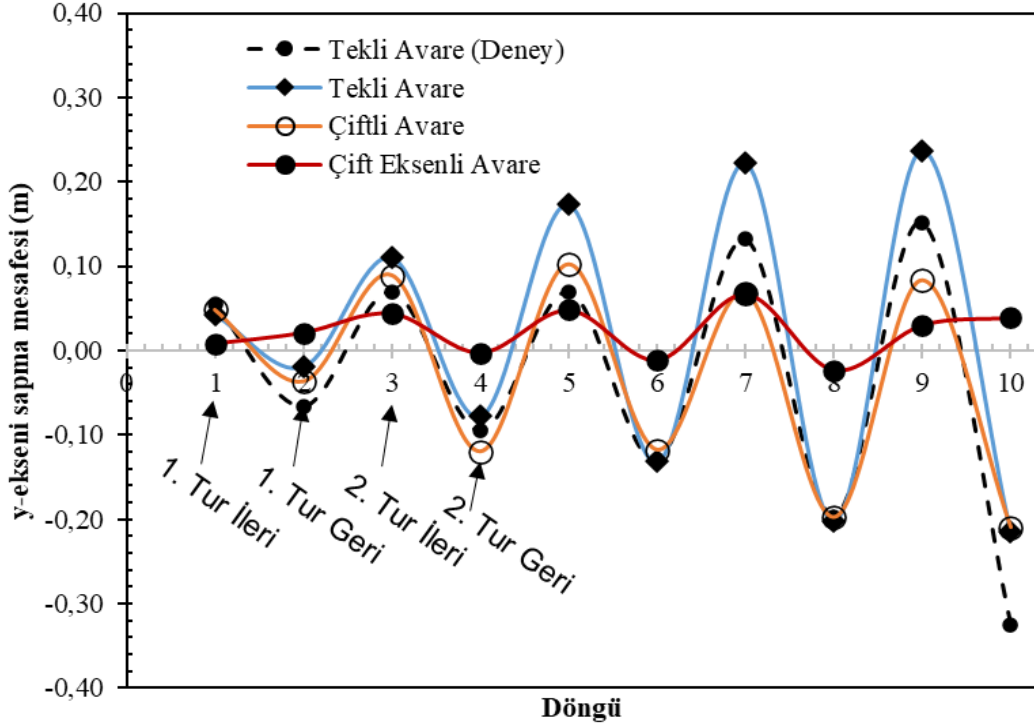
5. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, diferansiyel sürüş sistemine sahip bir OMR'de 180° dönüş esnasında, robotun hareket doğrultusunda meydana gelen sapmaya avare tekerlerin etkisi deneysel ve simülasyon olarak incelenmiştir. Şekil 7'de toplam ağırlığı 75 kg olan OMR için sapma miktarları görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi deney ve simülasyon sonuçları yaklaşık olarak benzer çıkmıştır. OMR ilk döngüdeki turda 5 m düz gittikten sonra tekli ve çiftli avare tekerli OMR'lerin her ikisi de yaklaşık aynı oranda yanal sapma yapmıştır (~0,035 m).

sapmıştır (~0,008 m). OMR tekrar başlangıç noktasına doğrusal olarak geri döndürüldüğünde ise sapma miktarı, tekli ve çiftli avare teker bulunan OMR'de başlangıca göre daha fazla olmaktadır. Tekli ve çiftli avare tekerler arasındaki sapma miktarı ilk turlarda düşük oranda olmasına karşılık döngü devam ettirildikçe gidip ve dönüşlerde meydana gelen sapmalar arasındaki fark artmaktadır. Sapma miktarı tekli avare bulunan OMR'de en fazla seviyelerde olmaktadır. Çiftli avare bulunan OMR'de ise sapma miktarı tekli avare bulunan OMR'ye göre daha düşük seviyede olmaktadır. En düşük sapma

miktarı ise çift eksenli avare bulunan OMR'de olmaktadır. Sapma oranı tekli ve çiftli avare teker bulunan OMR'de büyük seviyede olmasına rağmen çift eksenli avare bulunan OMR'de ise döngü boyunca çok

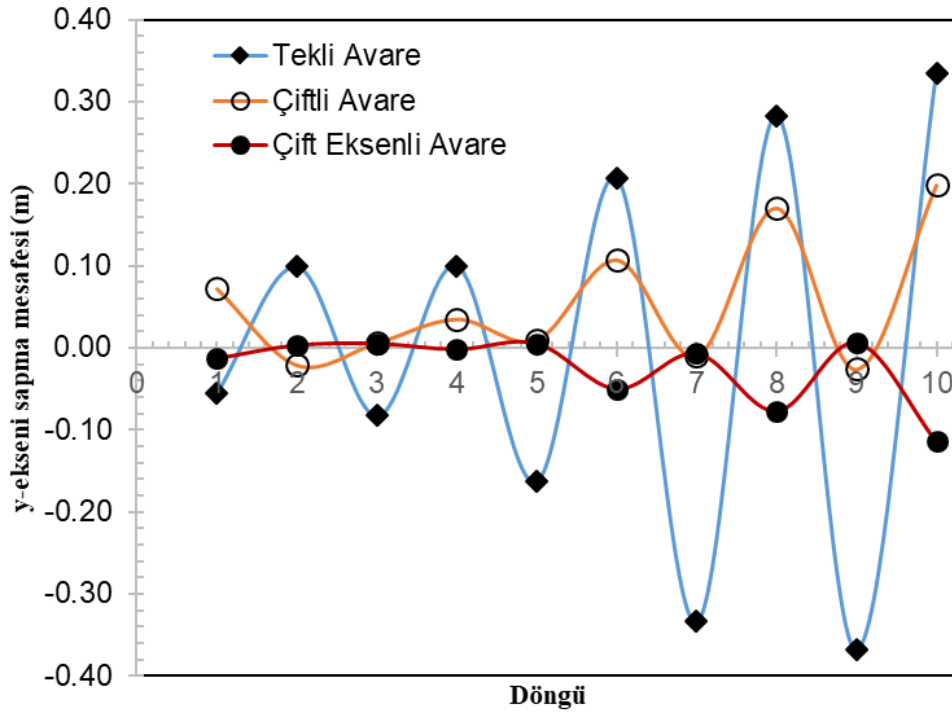
fazla miktarda artış göstermemektedir. Maksimum ve minimum değerler arasındaki sapma genliği tekli avarede yaklaşık 0,45 m, çiftli avarede 0,30 m ve çift eksenli avarede 0,10 m olmuştur.



Şekil 7. Toplam ağırlığı 75 kg olan OMR'nin ileri ve geri döngü turlarında yapmış olduğu yanal sapma miktarları. Şekilde 0 robotun başlangıç noktasını belirtmektedir (The lateral deviations of OMR with a total weight of 75 kg in the forward and reverse loops, 0 represents the starting point of the robot, in the figure)

Şekil 8'de toplam ağırlığı 150 kg olan OMR için sapma miktarları verilmiştir. Bu OMR'de meydana gelen sapma davranışı da yine 75 kg OMR'deki gibi her bir avare için yaklaşık aynı şekilde elde edilmiştir. En fazla sapma miktarı bu durumda da yine tekli avare bulunan OMR'de meydana gelmiştir. En ideal durum ise çift eksenli avare bulunan OMR'de elde edilmiştir. OMR'nin ağırlığının artması tekli avare bulunan OMR'de çok fazla miktarlarda saptmaya neden olmuştur. Tüm döngü tamamlandıktan sonra toplam sapma miktarı tekli avarede 0,702 m, çiftli avarede 0,224 m ve çift eksenli avarede ise 0,120 m olmuştur. Çiftli ve çift eksenli avare

bulunan OMR'lerde ise ağırlıktaki artış sapma miktarını çok fazla etkilememiştir. Elde edilen verilere göre, özellikle ağırlığı fazla olan OMR'lerde tekli avare kullanılması dönüş hareketlerinde büyük saptmalar meydana getireceği sonucuna varılmıştır. Çiftli teker bulunan herhangi bir avare kullanımında ise sapma miktarı yükün artmasından hemen hemen bağımsız hale gelmiştir. Ağırlıktan bağımsız olarak en düşük sapma elde edilebilmesi için ise çift eksenli avare kullanılmasının en ideal çözüm olduğu sonucu elde edilmiştir.

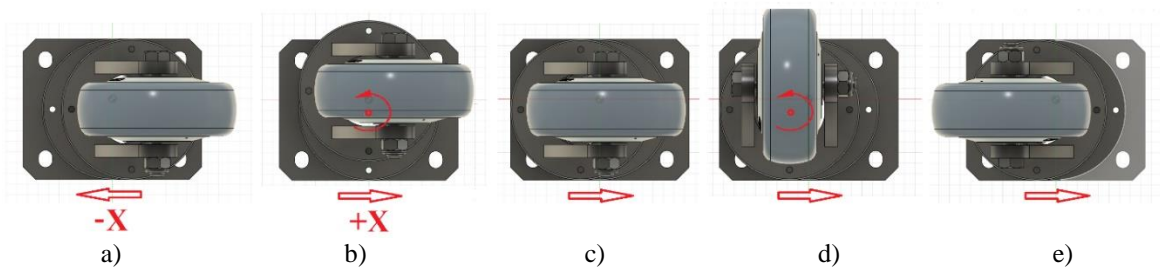


Şekil 8. Toplam ağırlığı 150 kg olan OMR'nin yapmış olduğu ileri ve geri döngülerde yanal sapma miktarları (The lateral deviations of OMR with a total weight of 150 kg in the forward and reverse loops)

Çift eksenli avarenin ileri ve geri hareketinde Şekil 9'da gösterilen durumlar gerçekleşmektedir. Şekil 9'da sol tarafa (-x) doğru gitmekte olan OMR'de bulunan çift eksenli avare Şekil 9a'da gösterildiği pozisyonda bulunmaktadır. Bu doğrusal hareket esnasında dönme eksenine mesafesi 22 mm olmaktadır. OMR, 180° geri harekete başladığında Şekil 9c'de gösterilen 1 numaralı dönme ekseninde hareket etmektedir (Şekil 9b). Bu esnada, 2 numaralı ekseninde herhangi bir hareket olmamaktadır. Avare teker, 1 numaralı eksenindeki 180°'lik bu hareketi tamamladıktan sonra, 1 numaralı

yönüne göre aynı hizada olmadığı durumlarda meydana gelen itme kuvveti düşmektedir [22].

eksende hareket durmaktadır (Şekil 9c). Bu hareket durduğu anda dönme eksenine mesafesi 2 mm olmaktadır. Daha sonra, Şekil 9c'de gösterilen 2 numaralı ekseninde hareket başlamaktadır (Şekil 9d). Bu harekette, sadece 2 numaralı ekseninde dönme hareketi mevcuttur. Dönme hareketi tamamlandıktan sonra OMR doğrusal olarak tersi yönde (+x) 22 mm dönme eksenine ile hareket etmektedir. Böylece, bu tip avare tekerde özellikle 180°



Şekil 9. Çift eksenli avare tekerin dönüşte yaptığı hareketler. Ok yönleri OMR'nin hareket yönünü göstermektedir (Movements of the dual swivel caster wheel in rotation. The arrow directions indicate the direction of movement of the AMR)

Tek eksenli avare teker bulunan OMR'de eğer tekerler aynı hizalı ve paralel değilse dönüşlerde zemine uyguladığı baskı kuvveti yüksek olmaktadır [22]. Tek eksenli avare tekerler geriye dönüşte tek bir dönme ekseninde dönüş yapmasına rağmen çift eksenli avare tekerde ise tekerleğin dönme eksenine ikinci bir dönme eksenine eklenmiştir. Bu sayede, avare tekerler geniş

geri dönüşlerde dönme eksenine yarıçapı küçük bir değerde olduğu için sapma miktarı da o oranda azalmaktadır.

Böylece, robotun dönüşlerinde yaptığı saptalarda önemli oranda azalmalar meydana gelmektedir. Özellikle 180° dönüşlerdeki yanal saptalar bu şekilde en aza indirilebilmektedir.

Tekli avare bulunan OMR'lerde tekerler ile zemin arasında baskı kuvveti çiftli avare tekerlere oranla daha büyük olmaktadır. Buna paralel olarak, avare teker ile zemin arasındaki sürtünme kuvveti de artmaktadır. Aynı şekilde, tekli avare bulunan OMR, dönüş yaparken tahrik tekerlerine etki eden sürtünme kuvveti aynı oranda artmaktadır. Tahrik tekerinin sahip olduğu tork ile tekerde elde edilen teğetsel kuvvet sabittir [23]. OMR, bu teğetsel kuvvet ile sürtünme kuvvetinin farkından meydana gelen kuvvet ile hareket etmektedir [24]. Sürtünme kuvvetinin artmasıyla bu fark kuvvet (çeki kuvveti) azalmaktadır. Tekerler dönüşü tamamladıktan sonra ise gereken çeki kuvvetinin miktarı azalmaktadır. Çeki kuvvetinde meydana gelen bu düzensizlikler dönüşlerde avare teker kaynaklı sapmaların bir sebebi olarak karşımıza çıkmaktadır. Böylece, tahrik tekerlerindeki çeki kuvvetinin değeri dönüşün başlangıcı ile bitişi arasında değişkenlik göstermektedir. Diğer bir sebep olarak, avare tekerler dönüş hareketi esnasında dönme eksenini sayesinde OMR'nin hareket yönünün tersine yönlendirilmektedir. Bu yönlendirme sırasında, dönme eksenini mesafesi kadar OMR'de dairesel bir dönüş hareketi meydana gelmektedir. Böylece, OMR dönüşlerde yaptığı ileri geri hareket değişimlerinde yanıl yönlerde bir sapma yapmaktadır. Çift tekerli avarelerde ise dönme eksenini yine aynı olduğundan dolayı dönme eksenini kaynaklı sapma benzer oranda olmaktadır. Fakat tekli avare tekerden farklı olarak bu avare tekerlerde baskı kuvveti daha düşüktür. Böylece, baskı kuvvetinin azalması tahrik tekerlerindeki çeki kuvvetinde de azalma meydana getirmektedir. Sonuç olarak, tekli avare tekerlere göre çiftli avare tekerler daha düşük oranda sapma yapmaktadır.

Çift eksenli avare teker bulunan OMR'de eğer tekerler aynı hizalı ve paralel değilse zemine uyguladığı baskı kuvveti düşük olmaktadır [21]. Baskı kuvvetinin düşük olması ile OMR'nin istenilen hızda gidebilmesi için tahrik tekerlerine verilmesi gereken çeki kuvvetinin değeri de düşmektedir. Çeki kuvvetinin değerindeki düşüşle birlikte sapma miktarı da azalmaktadır. Bu duruma ek olarak, çift eksenli avare tekerlerde dönüş esnasındaki dönme eksenini mesafesi çift ekseninden dolayı daha düşük olmaktadır (Çizelge 1). Dönme eksenini mesafesi avare tekerlerin dönüşlerindeki sürtünme kuvvetlerini azaltmak için büyük tutulması gerekmektedir [22]. Fakat bu mesafenin artmasıyla dönüşlerde meydana gelen sapma miktarı da artmaktadır. Bu sebeple, avare tekerlerdeki dönme eksenini mesafesi için optimum değerler kullanılmaktadır. Çift eksenli avare tekerlerde toplam dönme eksenini mesafesi ile sürtünme kuvveti düşürülerek kolay bir dönüş sağlanmaktadır. İkinci bir eksen kullanılarak da dönme mesafesindeki sapma miktarı azaltılmaktadır. Bu şekilde, çift eksenli avare tekerler bulunan OMR'lerin dönüşlerinde sapma miktarı çok düşük seviyelerde olmaktadır. Ayrıca sapma miktarı; OMR ve taşınan yükten kaynaklanan toplam ağırlığın artışından çok fazla etkilenmemektedir.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, diferansiyel sürüş sistemine sahip bir OMR'de 180° dönüşlerde hareket doğrultusunda meydana gelen avare teker kaynaklı sapmalar incelenmiştir. Avare tekerlerin OMR'nin dönüşünde yaptığı sapmalar, teker ile zemin arasındaki sürtünme kuvveti ve dönme eksenini olmak üzere iki sebepten kaynaklanmaktadır. Tekli avare tekerler, dönüşlerde en fazla sapmayı yapmaktadır. Bu tekerlerde, birim alana etki eden baskı kuvvetinin büyük olmasıyla sürtünme kuvveti daha yüksek olmaktadır. Artan sürtünme kuvveti, dönüşlerde olumsuz etki oluşturup motor tarafından üretilen torkun meydana getirdiği etkiel kuvvette düzensizlikler ortaya çıkmaktadır. Böylece, robotun hareket yönündeki yanıl sapmalarda artma meydana gelmektedir. Çiftli avare tekerlerde sapma miktarı tekli olanlara göre daha düşüktür. En düşük sapma miktarı ise çift eksenli avare tekerlerde meydana gelmektedir. Tekli avare bulunan OMR'nin ağırlığındaki artış sapma miktarını önemli oranda artırmaktadır. Bunun yanında, avare tekerde birbirinden bağımsız dönebilen çift teker bulunması OMR'nin sapmasını ağırlıktan büyük oranda bağımsız hale getirmektedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Ali KİBAR: Makalenin yazılması, literatür taraması, grafiklerin oluşturulması, sonuçların yorumlanması

Alaattin Eray GÜRKAL: Deneylerin ve simülasyonların yapılması, literatür taraması, şekillerin çizilmesi.

Eylül ÖZER: Simülasyon modellerinin oluşturulması

Alparslan Burak İNNER: Makalenin genel yapı ve kurgusunun oluşturulması.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Taner, Z. T. and Biçer, Z. Ö. P., "Endüstri 4.0'ın proje yönetim etmenlerine etkisi", *Politeknik Dergisi*, 24(4): 1461-1472, (2021).
- [2] Yu Y., Wang X., Zhong R.Y. and Huang G.Q., "E-commerce Logistics in Supply Chain Management: Practice Perspective", *Procedia Cirp*, 52: 179-185, (2016).
- [3] Kumaş, E. and Serpil, E. R. O. L., "Endüstri 4.0'da anahtar teknoloji olarak dijital ikizler", *Politeknik Dergisi*, 24(2): 691-701, (2021).

- [4] Wu X., Lou P., Cai Q., Zhou C. and Jin C., “Design and control of material transport system for automated guided vehicle”, *Proceedings of the 2012 UKACC International Conference on Control*, 765–770, (2012).
- [5] Gonzalez A.G.C., Alves M.V., Carvalho L.K. and Basilio J.C., “A Supervisory Control-Based Navigation Architecture for Multiple Autonomous Robots in Industry 4.0 Environments”, *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, 1: 2564–2571, (2019).
- [6] Gürkal A., İner A.B., Özer E. and Kibar A., “Yük Kapasitesi Şase Yapısından Bağımsız Bir Otonom Mobil Robot Tasarımı ve Dayanım Analizi”, *Mühendis ve Makine*, 62(704): 607-619, (2021).
- [7] Loizou S.G. and Kyriakopoulos K.J., “Navigation of multiple kinematically constrained robots”, *IEEE Transactions on Robotics*, 24(1): 221–231, (2008).
- [8] Holmberg R. and Khatib O., “Development and Control of a Holonomic Mobile Robot for Mobile Manipulation Tasks”, *The International Journal of Robotics Research*, 19(11): 1066-1074, (2000).
- [9] Wang C., Savkin A.V. and Garratt M., “A strategy for safe 3D navigation of non-holonomic robots among moving obstacles”, *Robotica*, 36(2): 275–297, (2018).
- [10] Lee S.Y. and Yang H.W., “Navigation of automated guided vehicles using magnet spot guidance method”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(3): 425–436, (2012).
- [11] Dixon, J. C., “Tires, suspension and handling”, *SAE international*, (1996).
- [12] <https://www.casterconcepts.com/solutions/ergonomic-casters/when-to-use-dual-wheel-casters>.
- [13] Konara K.M.T.M.B., Munasinghe M.A.A., Dodampegama S.K. and Amarasinghe Y.W.R., “Design and analysis of an autonomously guided vehicle to minimize the impact of COVID-19”, *Innovation to Impact (FITI) IEEE*, 1: 1-6, (2020).
- [14] Chung W., Moon C.B., Jung C. and Jin J., “Design of the Dual Offset Active Caster Wheel for Holonomic Omnidirectional Mobile Robots”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 7(4): 26, (2010).
- [15] Köseoğlu M., Çelik O.M. and Pektaş Ö., “Design of an Autonomous Mobile Robot Based on ROS”, *International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*. IEEE, Malatya, Türkiye, 1-5, (2017).
- [16] Koca, Y. B., Gölçe, B. and Aslan, Y. Y., “ROS/Gazebo Ortamında Tank Sürüş Özellikli Mobil Bir Robotun Simülasyonu”, *Journal of Materials and Mechatronics: A*, 1(1): 29-41, (2020).
- [17] Arrizabalaga, J., van Duijkeren, N., Ryll, M. and Lange, R., “A caster-wheel-aware MPC-based motion planner for mobile robotics”, *20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, IEEE, Beijing, 613-618, (2021).
- [18] Gürgöze, G. and Türkoğlu, İ., “Mobil Robotlarda Kullanılan DC Motorların Parametrelerinin Belirlenmesi İçin Deneysel Düzenekli Geliştirilmesi”. *Politeknik Dergisi*, 25: 1151-121, (2022).
- [19] Bogaerts, B., Sels, S., Vanlanduit, S. and Penne, R., “Connecting the CoppeliaSim robotics simulator to virtual reality”, *SoftwareX*, 11: 100426, (2020).
- [20] Malu S. K. and Majumdar J., “Localization and Control of Differential Drive Mobile Robot”, *Global Journal of Research in Engineering*, 14(1): 1-7, (2014).
- [21] <https://www.casterconcepts.com/whats-dual-swivel-section-caster>.
- [22] https://www.elesaganter.com.tr/static/technicaldata/files/Castors_and_Wheels_TD_TR.pdf.
- [23] Solmaz H. and Kocakulak T., “Buji ile Ateşlemeli Motor Kullanılan Seri Hibrit Elektrikli Bir Aracın Modellenmesi”, *Proceedings on International Conference on Technology and Science*, Antalya-Türkiye, 353-360, (2018).
- [24] Meriam J. L., Kraige L. G. and Bolton J. N., “Kinetics of Particles, Engineering mechanics: dynamics”, *John Wiley & Sons*, New Jersey, 56-68, (2020).