T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENGELDEN KAÇAN BİR MOBİL ROBOTUN YÖRÜNGE TAKİBİ KONTROLÜ

Faik DEMİRBAŞ

YÜKSEK LİSANS

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım-2017
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Faik DEMİRBAŞ tarafından hazırlanan "ENGELDEN KAÇAN BİR MOBİL ROBOTUN YÖRÜNGE TAKİBİ KONTROLÜ" adlı tez çalışması 10/11/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Başkan Prof. Dr. Fatih Mehmet BOTSALI	....
Danışman Prof. Dr. Mete KALYONCU	....
Üye Yrd. Doç. Dr. Ümit ÖNEN	....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa YILMAZ
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Faik DEMİRBAŞ

10/11/2017

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

ENGELDEN KAÇAN BİR MOBİL ROBOTUN YÖRÜNGE TAKİBİ KONTROLÜ

Faik DEMİRBAŞ

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mete KALYONCU

2017, 88 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Mete KALYONCU
Prof. Dr. Fatih Mehmet BOTSALI
Yrd. Doç. Dr. Ümit ÖNEN

ÖZET: Bu çalışmada, diferansiyel sürüşlü mobil bir robotun matematiksel modeli elde edilmiş ve kontrol edilebilirlik analizi yapılmıştır. Diferansiyel sürüşlü mobil robotun arzu edilen yörüngeyi takip edebilmesi için PID, bulanık mantık (BMK) ve kinematik tabanlı geri adımlamalı kontrolcü (KTGK) tasarımı yapılmıştır. Geri adımlamalı kontrolcü yörünge takibinin doğrusal olmama durumunun üstesinden gelebilmek için kullanılmıştır, PID ve bulanık mantık kontrolcü DC motorların hız ayarlamaları için kullanılmıştır. Kare, daire ve sekiz şekilli yörüngede aracın kontrolcüsünün cevabı elde edilmiş ve grafiksel olarak sunulmuştur. Yörüngeler üstündeki bir engel için de yazar tarafından geliştirilen ojinal bir engelden kaçma algoritması uygulanmıştır. Tasarlanan kontrolcülerin ve engelden kaçma algoritmasının etkinliği tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Diferansiyel sürüş, engelden kaçma algoritması, holonomik olmayan mobil robot, kinematik tabanlı geri adımlamalı kontrol, bulanık mantık tabanlı kontrolcü, yörünge takibi.

ABSTRACT

MS THESIS

TRAJECTORY TRACKING CONTROL OF A OBSTACLE AVOIDING MOBILE ROBOT

Faik DEMİRBAŞ

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Mete KALYONCU

2017, 88 Pages

Jury
Prof. Dr. Mete KALYONCU
Prof. Dr. Fatih Mehmet BOTSALI
Asst. Prof. Dr. Ümit ÖNEN

ABSTRACT: In this study, the mathematical model of a differential drive mobile robot was derived and controllability analysis was made. PID, fuzzy logic and kinematic based backstepping controller (KTGK) was designed for differential drive mobile robot to be able to track the desired trajectory. Kinematic based bakstepping controller was used to overcome the nonlinearity of the trajectory tracking, PID controller and fuzzy logic controller (BMK) was used for the DC motors' speeds adjustments. Responses of vehicle's controllers in a square shaped, circular shaped and eight shaped trajectories had obtained and results were graphically presented. An original obstacle avoiding algorithm, had been developed by author, was applied for an obstacle on the trajectories. The effectiveness of the designed controllers and the obstacle avoiding algoritm have been discussed.

Keywords: Differential drive, kinematic based backstepping controller, nonholonomic mobile robot, obstacle avoiding algoritms, fuzzy logic based controller, trajectory tracking.

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, yönlendirme ve tavsiyeleri ile bana yardımcı olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mete KALYONCU’ ya ve Sayın Arş. Gör. Muhammed Arif ŞEN’ e teşekkür ederim.

Faik DEMİRBAŞ
KONYA-2017

İÇİNDEKİLER

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

v	: robotun doğrusal hızı
v^r	: robot koordinat sisteminde robotun doğrusal hızı
v^ι	: hareketsiz koordinat sisteminde robotun doğrusal hızı
v_a^r	: robot koordinat sisteminde A noktasının doğrusal hızı
v_d^r	: robot koordinat sisteminde D noktasının doğrusal hızı
v_a^ι	: hareketsiz koordinat sisteminde A noktasının doğrusal hızı
v_d^ι	: hareketsiz koordinat sisteminde D noktasının doğrusal hızı
θ	: robotun açısal konumu
$\dot{\theta}\ (\omega)$	: robotun açısal hızı
$\ddot{\theta}\ (\alpha)$	: robotun açısal ivmesi
φ	: tahrik tekerlerinin açısal konumu
$\dot{\varphi}$	: tahrik tekerlerinin açısal hızı
φ_R	: robotun sağ tekerinin açısal konumu
$\dot{\varphi}_R$	: robotun sağ tekerinin açısal hızı
φ_L	: robotun sol tekerinin açısal konumu
$\dot{\varphi}_L$	: robotun sol tekerinin açısal hızı
x^r	: robot koordinat sisteminde x eksenindeki konum
x_a^r	: robot koordinat sisteminde A noktasının x eksenindeki konumu
x_d^r	: robot koordinat sisteminde D noktasının x eksenindeki konumu
$\dot{x}^r$	: robot koordinat sisteminde x eksenindeki hız
$\dot{x}_a^r$	: robot koordinat sisteminde A noktasının x eksenindeki hızı
$\dot{x}_d^r$	: robot koordinat sisteminde D noktasının x eksenindeki hızı
y^r	: robot koordinat sisteminde y eksenindeki konum
y_a^r	: robot koordinat sisteminde A noktasının y eksenindeki konumu
y_d^r	: robot koordinat sisteminde D noktasının y eksenindeki konumu
$\dot{y}^r$	: robot koordinat sisteminde y eksenindeki hız
$\dot{y}_a^r$	: robot koordinat sisteminde A noktasının y eksenindeki hızı
$\dot{y}_d^r$	: robot koordinat sisteminde D noktasının y eksenindeki hızı
θ^r	: robot koordinat sisteminde açısal konum
θ_a^r	: robot koordinat sisteminde A noktasının açısal konumu
θ_d^r	: robot koordinat sisteminde D noktasının açısal konumu
$\dot{\theta}^r$	: robot koordinat sisteminde açısal hız
$\dot{\theta}_a^r$	: robot koordinat sisteminde A noktasının açısal hızı
$\dot{\theta}_d^r$	: robot koordinat sisteminde D noktasının açısal hızı
x^ι	: hareketsiz koordinat sisteminde x eksenindeki konum
x_a^ι	: hareketsiz koordinat sisteminde A noktasının x eksenindeki konumu
x_d^ι	: hareketsiz koordinat sisteminde D noktasının x eksenindeki konumu
$\dot{x}^\iota$	: hareketsiz koordinat sisteminde x eksenindeki hız
$\dot{x}_a^\iota$	: hareketsiz koordinat sisteminde A noktasının x eksenindeki hızı
$\dot{x}_d^\iota$	: hareketsiz koordinat sisteminde D noktasının x eksenindeki hızı
y^ι	: hareketsiz koordinat sisteminde y eksenindeki konum
y_a^ι	: hareketsiz koordinat sisteminde A noktasının y eksenindeki konumu
y_d^ι	: hareketsiz koordinat sisteminde D noktasının y eksenindeki konumu
$\dot{y}^\iota$	: hareketsiz koordinat sisteminde y eksenindeki hız
$\dot{y}_a^\iota$	: hareketsiz koordinat sisteminde A noktasının y eksenindeki hızı
$\dot{y}_d^\iota$	: hareketsiz koordinat sisteminde D noktasının y eksenindeki hızı

θ^{ι}	: hareketsiz koordinat sisteminde açısal konum
θ_a^{ι}	: hareketsiz koordinat sisteminde A noktasının açısal konumu
θ_d^{ι}	: hareketsiz koordinat sisteminde D noktasının açısal konumu
$\dot{\theta}^{\iota}$	: hareketsiz koordinat sisteminde açısal hız
$\dot{\theta}_a^{\iota}$	: hareketsiz koordinat sisteminde A noktasının açısal hızı
$\dot{\theta}_d^{\iota}$	: hareketsiz koordinat sisteminde D noktasının açısal hızı
X_{ι}	: hareketsiz koordinat sistemi x ekseni
Y_{ι}	: hareketsiz koordinat sistemi y ekseni
X_r	: robot koordinat sistemi x ekseni
Y_r	: robot koordinat sistemi y ekseni
$R(\theta)$	: ortagonal dönüşüm matrisi
q^r	: robot koordinat sistemi konum matrisi
q^{ι}	: hareketsiz koordinat konum sistemi matrisi
$\dot{q}^r$	: robot koordinat sistemi hız matrisi
$\dot{q}^{\iota}$	: hareketsiz koordinat sistemi hız matrisi
A	: iki tekerin orta noktası
D	: robotun kütle mekezi
d	: iki tekerin orta noktasından robotun ağırlık merkezine olan uzaklık
R	: teker yarıçapı
L	: iki teker arası orta noktaya olan teker uzaklığı
w	: tekerlerin merkez noktası
ICC	: ani dönme(eğrilik) merkezi noktası
C	: ani dönme(eğrilik) merkezi yarıçapı
v_t	: tekerlek teğetsel hızı
v_n	: tekerlek normal(dik açılı) hızı
ω_z	: z eksenine göre tekerlek açısal hızı
δ_M	: manevra kabiliyeti
δ_m	: hareketlilik derecesi
δ_s	: yönlendirilebilirlik derecesi
rg	: robot genişliği
rb	: robot boyu
yu	: robot yükekiği (üst nokta)
ya	: robot yüksekliği (alt nokta)
$ttç$	: robot tahrik teker çapı
$stç$	: robot sarhoş teker çapı
sy	: sonar sensör yüksekliği
ba	: tekerlek basma noktalarının aralığı
F_{lw}	: sol tekerlek için gerekli olan en büyük kuvvet
F_{rw}	: sağ tekerlek için gerekli olan en büyük kuvvet
τ_{lm}	: sol motor için gerekli olan en büyük tork
τ_{rm}	: sağ motor için gerekli olan en büyük tork
ω_w	: tekerleklerdeki en büyük açısal hız
P_w	: gerekli motor gücü
P_m	: güç aktarımı kayıpları dahil gerekli motor gücü
P_{mr}	: seçilen motor gücü
L	: Lagrangian fonksiyonu
T	: kinetik enerji
U	: potansiyel enerji
$M(q)$	: simetrik pozitif tanımlı eylemsizlik matrisi

$V(q,\dot{q})$	: merkezcil koriolis matrisi
$F(\dot{q})$	: yüzey sürtünme matrisi
$G(q)$	: yerçekimi vektörünü
$B(q)$	: girdi matrisi
$A(q)$	: kinematik kısıt matrisi
τ_d	: sınırlanmış bilinmeyen bozucu etkiler
λ	: Lagrange çarpanları vektörü
T_c	: robot platformuna ait kinetik enerji ifadesi
m_d	: robot platformu kütlesi
v_d	: robot platformu kütle merkezinin doğrusal hızı
I_d	: robot platformunun D noktasına göre atalet momenti
T_{wR}	: sağ tekere ait kinetik enerji ifadesi
T_{wL}	: sol tekere ait kinetik enerji ifadesi
m_w	: tahrik tekerlerinin kütlesi
v_w	: tahrik tekerlerinin w merkez noktalarının doğrusal hızı
v_{wR}	: robotun sağ tekerinin doğrusal hızı
v_{wL}	: robotun sol tekerinin doğrusal hızı
I_w	: tahrik tekerlerinin atalet momenti
x_{wR}	: hareketsiz koordinat sisteminde sağ tekerin x eksenindeki konumu
x_{wL}	: hareketsiz koordinat sisteminde sol tekerin x eksenindeki konumu
y_{wR}	: hareketsiz koordinat sisteminde sağ tekerin y eksenindeki konumu
y_{wL}	: hareketsiz koordinat sisteminde sol tekerin y eksenindeki konumu
$\dot{x}_{wR}$	: hareketsiz koordinat sisteminde sağ tekerin x eksenindeki hızı
$\dot{x}_{wL}$	: hareketsiz koordinat sisteminde sol tekerin x eksenindeki hızı
$\dot{y}_{wR}$	: hareketsiz koordinat sisteminde sağ tekerin y eksenindeki hızı
$\dot{y}_{wL}$	: hareketsiz koordinat sisteminde sol tekerin y eksenindeki hızı
I_m	: motorların dönme eksenlerindeki atalet momenti
v_i	: genel hız ifadesi
$\dot{x}_i$	: genel hız ifadesi x ekseni bileşeni
$\dot{y}_i$	: genel hız ifadesi y ekseni bileşeni
x_d	: D noktası için A noktasına göre x eksenindeki konumu
x_a	: A noktasının x eksenindeki konumu
y_d	: D noktası için A noktasına göre y eksenindeki konumu
y_a	: A noktasının y eksenindeki konumu
$\dot{x}_d$	: D noktası için A noktasına göre x eksenindeki hızı
$\dot{x}_a$	: A noktasının x eksenindeki hızı
$\dot{y}_d$	: D noktası için A noktasına göre y eksenindeki hızı
$\dot{y}_a$	: A noktasının y eksenindeki hızı
m	: robotun toplam kütlesi
I	: robotun D noktasına göre toplam atalet momenti
m_c	: işlem kolaylığı için tanımlanmış kütle ifadesi
k	: işlem kolaylığı için tanımlanmış atalet momenti ifadesi
C_1	: x_a değişkeni için kinematik kısıtla ilgili denklem
C_2	: y_a değişkeni için kinematik kısıtla ilgili denklem
C_3	: θ değişkeni için kinematik kısıtla ilgili denklem
C_4	: φ_R değişkeni için kinematik kısıtla ilgili denklem
C_5	: φ_L değişkeni için kinematik kısıtla ilgili denklem
$S_a(q)$	: A noktası için dönüşüm matrisi
$S_d(q)$	: D noktası için dönüşüm matrisi

$S(q)$: D noktası için dönüşüm matrisi eşiti
$\dot{S}(q)$: D noktası için dönüşüm matrisi eşitinin türevi
η : indirgenmiş vektör
$\dot{\eta}$: indirgenmiş vektörün türevi
$\bar{M}(q)$: kinematik kısıtlar ve lagrange çarpanları ifadelerinden kurtulmuş denklemin simetrik pozitif tanımlı eylemsizlik matrisi
$\bar{V}(q, \dot{q})$: kinematik kısıtlar ve lagrange çarpanları ifadelerinden kurtulmuş denklemin merkezcil koriolis matrisi
$\bar{B}(q)$: kinematik kısıtlar ve lagrange çarpanları ifadelerinden kurtulmuş denklemin girdi matrisi
$v(t), (U)$: voltaj *(modeldeki değişken, (katalogtaki değişken))*
$i(t), (I)$: elektrik akımı *(modeldeki değişken, (katalogtaki değişken))*
$R_a, (R)$: direnç *(modeldeki değişken, (katalogtaki değişken))*
$L_a, (L)$: endüksiyon *(modeldeki değişken, (katalogtaki değişken))*
$(-), K_n$: hız sabiti *(modeldeki değişken, (katalogtaki değişken))*
$K_b, (-)$: geri elektromotor kuvveti *(modeldeki değişken, (katalogtaki değişken))*
$J, (J)$: atalet *(modeldeki değişken, (katalogtaki değişken))*
$K_t, (K_m)$: tork sabiti *(modeldeki değişken, (katalogtaki değişken))*
$b, (-)$: sürtünme *(modeldeki değişken, (katalogtaki değişken))*
$\omega(t), (n)$: hız *(modeldeki değişken, (katalogtaki değişken))*
e_a : karşı elektromotif voltajı
τ_m : motor torku
N : aktarma oranı
τ : çıktı alınan tork
q_r : referans konum matrisi
q : mevcut konum matrisi
e_p : hata matrisi
e_x : x eksenindeki hata
e_y : y eksenindeki hata
e_θ : açısal hata
$\dot{e}_p$: hata matrisinin türevi
$\dot{e}_x$: x eksenindeki hatanın türevi
$\dot{e}_y$: y eksenindeki hatanın türevi
$\dot{e}_\theta$: açısal hata türevi
$K_x,\ K_y,\ K_\theta$: kinematik tabanlı geri adımlamalı kontrolcü kazançları
V : skalar bir fonksiyon
CS : konfigürasyon uzayı
VS : komut uzayı
$g_i(q)$: vektör alanları

Kısaltmalar
KTGK : Kinematik tabanlı geri adımlamalı kontrolcü
BMK : Bulanık mantık kontrolcü
PID : Orantı, integral, türev
DOF : serbeslik derecesi
DDOF : diferansiyel serbestlik derecesi
DC : doğru akım
EMK : elekromotor kuvveti

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmada öncelikli olarak iki tekerleği birbirinden bağımsız iki elektrik motoru ile tahrik edilen diferansiyel sürüşlü mobil robotlar incelendi; bu seçimin amacı tasarım ve uygulama kolaylığı, maliyet ve her türlü kontrolün rahatlıkla uygulanabilmesidir. Ayrıca iki tekerlekli mobil robot, holonomik olmayan sistemlerin yeni kontrol tasarımının gelişimine liderlik ettiği mihenk taşı olarakta değelendirilebilir. Çalışmada sisteme KTGK, BMK ve PID kontrolcü uygulanarak sonuçlar karşılaştırıldı. Bu sayede daha karmaşık sistemler için bir referans ve bir sonraki aşamalar için bir basamak teşkil etmesi amaçlandı.

Yörünge takip kontrol problemi temelde iki problemi içerir: yörünge izleme (TT: trajectory tracking) ve yol takibi (PF: path following). Yörünge izleme, istenilen doğrusal ve açısal hız ile zamanın belli bir periyodunda robotun önceden tanımlı yörüngeyi izlemesini gerektirir. Bu yörünge, zaman değişkenleri ile ilgilidir. Yol takibi ise öncelikli olarak referans yörüngeye teması kullanır ve zaman limiti gereksinimini ihmal eder. Bu nedenle yörünge izlemede, zaman değişkenleriyle ilgili olarak hareket kontrolünün uygulanması daha karmaşıktır. Bunun yanında; mobil robot doğrusal olmayan özelliklere bağlı zamanla değişen dinamik bir sistemdir ve kaçınılmaz olarak bozucu etkiler, gözlem gürültüsü, parametre hatası ve diğer belirsizlikler tutarlı bir model saptamayı zorlaştırmaktadır. Bu konuda, mobil robot doğrusal olamayan kontrol tasarımı metotlarına yönelik kapsamlı ileri araştırmalar yapılmaktadır.

Nümerik algoritmalar ve bilgisayar teknolojisinin de gelişimiyle, nümerik metotlar gibi doğrudan metotların yörünge ve optimizasyona uygulanmasında çok büyük bir artış vardır.

Otonom mobil robotların hareket kontrolü, teoride kontrol zorluklarına karşın geniş ölçüde kullanımından dolayı mobil robot araştırmalarının en önemli araştırma konusudur. Holonomik olmayan karakteristiğinden ötürü Brockett pürüzsüzlük ve dengeleme koşuluna uymamaktadır, bu nedenle konum takip ve duruş kontrolü zorlaşmaktadır. Mobil robotun yörünge takibi çoğunlukla doğrusal olmayan kontrol problemleri kategorisinde yer almaktadır. Son yıllarda görülen başlıca kontrol metotları ise; doğrusal olmayan durum geri beslemeli kontrol, geri adımlamalı kontrol, uyarlamalı kontrol ve akıllı kontroldür. Her metot hem avantajlara hem de dezavantajlara sahiptir, şimdilik hiç birisi problemi mükemmel olarak çözememiştir.

Robot navigasyonu ve engelden kaçma robotikteki temel problemlerden biridir. Genel olarak robot navigasyonu kendisini çevreleyen ortama bağlı olarak global ve lokal olarak sınıflandırılabilir. Global navigasyonda robotu çevreleyen ortam bilinmekte ve engelden kaçacak yol seçilmektedir. Lokal navigasyonda robotu çevreleyen ortam bilinmemektedir, engelleri algılamada ve çarpışmadan kaçınmada sesörler kullanılır.

Engelden kaçma, kaynaktan istenilen noktaya en kısa yoldan ulaşmayı gerektirir. Birçok engelden kaçma algoritması önerilmiştir. Böcek algoritması ilk uygulanan metottur, ayarlaması kolay ama zaman almaktadır. Hedef yönemeli bir algoritma değildir, hedefi gözetmeksizin köşeleri takip eder. Aynı Şekilde elgelden kaçma için yapay potansiyel alan da kolay bir tekniktir fakat küçük lokal yerlerde tıkanmaktadır. Vektör alan histogramı gelişmiş bir algoritmadır, böcek algoritmasından daha kısa yolları seçer fakat ayarlaması çok zaman alır. Boşluğu takip etme metodu 2012' de önerilmiş yeni bir algoritmadır ama U şeklindeki engellerden kaçamamaktadır. Yeni hibrit navigasyon algoritması tam bir algoritmadır fakat çevre hakkında önceden ön bilgiye sahip olması gerektiğinden ötürü bilinmeyen ortama uygulanamamaktadır, hibrit navigasyon algoritmasına benzer Şekilde kısmi bilinen çevrelere uygulanmaktadır. Tepkisel tabakalara sahiptir ve bu nedenle küçük lokal yerlerde tıkanmaktadır. Bu algoritmada robot hareket edinceye kadar engel önünde beklemesinden dolayı çok zaman tüketmektedir.

Yukarıda bahsi geçen bilgiler ışığında; tez çalışmasının ana hedefi, mobil robotun istenilen hata payları çerçevesinde yörünge takibi ve bu esnada karşına çıkabilecek engellerden kaçabilme kabiliyeti kazandırmak olarak belirlendi. Optimizasyon ve yörünge tanımı ise diğer bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Sistemin kontrolü için, PID ve diğer kontrolcüler ile incelenip sistem kazançları değerlendirildi. Ayrıca literatürdeki mevcut olan matematiksel modelin ve kontrolcülerin geliştirilmesi de amaçlandı.

Tez çalışması kapsamında, diferansiyel sürüşlü mobil robot sisteminin kinematik ve dinamik modeli elde edilip, elektrik motoru ile tahrik edilen iki tekerlek, bir gövde ve sarhoş tekerlekten oluşan aracın belirlenen bir yörünge için konum, hız ve ivme kontrolleri yapıldı.

Sistemin kontrülünde kullanılacak kinematik ve dinamik denklemleri elde edildi. Burada dinamik denklemler Lagrange metodu ile elde edilmiştir. Bu hareket denklemleri doğrusal olmayan şekliyle elde edilip bunlara yönelik kontrolcü tasarımları irdelendi.

İlk olarak sistemin yörüngeyi takip etmesi daha sonra bu yörüngede karşılaşabileceği engeli aşıp bu yörüngede devam etmesi hedeflendi. Yörünge tasarımında ve engelden kaçma için algoritma ve optimizasyon teknikleri incelenip bunlardan yola çıkarak özgün bir algoritma uygulanması amaçlandı. Sistem teorik olarak MATLAB/Simulink yazılımında ifade edildikten sonra takip edilen yörüngeye göre ve tasarlanan kontrolcünün ve engelden kaçış algoritmasının geçerliliği gözlemlenip elde edilen sonuçlar karşılaştırıldı.

1.2. Tezin Önemi

Robot, otonom veya önceden programlanmış görevleri yerine getirebilen elektro-mekanik bir araçtır. Robotlar doğrudan bir kullanıcının kontrolünde çalışabildikleri gibi bağımsız olarak bir bilgisayar programının kontrolünde de çalışabilir. Robotların birçok türü vardır ancak sabit ve mobil robot olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Günümüzde, her geçen gün yapılan çalışmalar neticesinde mobil robotların kullanım alanı artmaktadır.

Robotlar çoklu disiplinlere sahip sistemlerin birleşiminin, sivil hizmetlerde, askeri uygulamalarda ve ticari kullanımlarda geniş çapta kullanılan bir ürünüdür. Bunlar arasında mobil robotlar hızlı bir Şekilde büyüyen araştırma alanıdır. Farklı çalışma alanlarına göre mobil robotlar sualtı robotları, kara robotları, hava robotları ve uzay robotları olarak sınıflandırılabilirler. Bunların hepsi sıradan robotlara göre daha esnek ve hareketliliktedir.

Mobil robotların keşif amaçlı uzay araçlarında, askeri alanda, endüstride, hizmet sektöründe, insanlar için tehlikeli olabilecek ortamlarda, kullanımı artarak devam etmektedir. Son yıllarda, özellikle insanın bulunmasının çok zor ya da imkânsız olduğu yerlerde, bu araçlardan kesin ve istenilen sonuçların alınabilmesi için birçok gelişmiş ülke tarafından bu konuda ciddi yatırımlar yapılmaktadır ki bunlara farklı gezegen ve uydularına araştırma robotları gönderilmesi, mayın temizleme robotları örnek verilebilir. Diğer bir yandan fabrikalarda belirli bir alanda hataya yer bırakmadan taşıma, yerleştirme işlemleri ve günlük kullaanımda kendi kendine park eden arabalar da göze çarpmaktadır. Verileblecek diğer güzel bir örnek ise; NASA' nın Mars' a yolladığı Spirit adlı uzay aracı gezegen yüzeyinde istenilen keşif ve araştırmayı başarıyla gerçekleştirmesidir.

Mobil robotların, gereksinimleri önceden belirlenmiş görevleri güvenli, verimli ve bağımsız yürütebilmesi için yörünge takibi ve optimizasyonu, engelden kaçma veya aşma problemleri ise yapıları dışında en önemli konu başlığı olarak göze çarpmaktadır. Mobil robotların yapıları arasında ise tekerlekli yapılar ön plandadır.

Tekerlekli mobil robotların yüksek hıza, yüksek enerji verimine, görece basit mekanik yapıya ve kontrol sistemine sahip oluşu ve otomotiv endüstrisindeki birikmiş olan teknoloji ve deneyimler ile tekerlekli mobil robotlar geniş bir alanda dikkatleri üzerine çekmektedir ve bu araçların bir yörünge boyunca kontrolü ve çevre ile iletişiminin buna paralel olarak gelişme göstermektedir.

Ayrıca yenilenebilen enerji kaynakları ile çalışan mobil robotlar; güneş enerjisi, hidrojen enerjisi ve benzeri enerji kaynakları ile enerji sağlayabilmekte ve bu sebeple yakıt ve ikmali konusundaki problemleri azalmaktadır. Aynı nedenden ötürü kütlesindeki azalma ile birlikte tasarım kolaylığı ve görevi sürdürebilme kabiliyeti artmaktadır ki, bu keşif amaçlı robotlarda kritik bir öneme sahiptir. Bu kadar kapsamlı uygulama alanı bulunan ve farklı yapısal konfigürasyonlara sahip mobil robotların hareket görevleri ve kontrollerindeki gelişimlerine paralel olarak insanlık yararına sunacağı birçok olanağın geleceğimizi Şekillendirmede giderek artan bir etkiye sahip olacağı da açık bir şekilde ortadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tekerlekli bir mobil robot doğrusal olmayan çoklu girdili ve çoklu çıktılı sistemlerdir. Mekanik tasarımlarına göre holonomik olan ve olmayan olarak ikiye ayrılırlar. Holonomik robotlar, kontrol edilebilir serbestlik derecesi kontrol edilebilir girdisi ile aynı olan robotlardır. Holonomik olmayan robotlar ise kontrol edilebilir girdisi daha az olduğundan kontrolü daha zordur (Ali ve ark., 2016).

Bu bölümde holonomik olmayan mobil robotların yörünge takibi ile ilgili çalışmalar ve engelden kaçma algoritmaları tanıtılarak bunlara ilişkin literatür taramaları sunuldu.

2.1. Holonomik Olmayan Mobil Robotların Yörünge Takibi

Mobil robot araştırmalarındaki en önemli kısım mobil robotun kontrolüdür. Holonomik olmayan robotlar içinse kontrol dahada önem kazanmaktadır. Holonomik olmayan robotun kontrolcü tasarımda kinematik modeli kullanıldığı gibi daha gerçekçi hesaplamalar için dinamik model tercih edilmektedir. Holonomik olmayan robotun navigasyonu 3 temel probleme ayrılabilir: referans yörünge takibi, yol izleme ve noktasal kararlılık. Bu robotların holonomik olmayan karakteristiğinden dolayı Brockett's şartının kararlılık ve pürüzsüzlüğünü sağlayamamaktadır. Bu ise konum takibi ve duruş kararlılığı kontrolünü zorlaştırmaktadır. Buradan holonomik olmayan mobil robotun yörünge takibininin doğrusal olmayan kontrol problemleri sınıfında olduğu söylenebilir. Holonomik olmayan mobil robot başlıca kontrol yöntemleri; doğrusal olmayan durum geri besleme kontrolü, kaymalı kip kontrol, geri adımlamalı kontrol, hesaplamalı tork kontrolü, uyarlamalı kontrol ve akıllı kontrol olmak üzere sınıflandırılabilir. (Wang ve ark., 2011; MOHARERI, 2009; Fierro ve ark., 1995).

Tawfik ve ark. (2014), çalışmalarında holonomik olmayan diferansiyel sürüşlü mobil robotun yörünge takibini incelemişlerdir. Bunun için kesirli haneli PID kontrolcü ve kontrolcünün parametrelerin ayarlaması içinse evrimsel algoritma kullanmışlardır. Dört farklı yörünge üzerinde yaptıkları çalışmada bozucu etkilerde kullanılarak önerilen kontrolcünün etkinliği kanıtlanmıştır.

Ali ve ark. (2014), çalışmalarında holonomik olmayan diferansiyel sürüşlü mobil robotun yörünge takibinde hız ve istikamet açısı için 2 farklı PID kontrolcü uygulamışlardır. PID kontrolcülerin parametrelerinin optimizasyonunda ise yapay arı sürüsü ve genetik algoritmaları uygulayarak sonuçları karşılaştırmışlardır. Çalışmalarını iki farklı yörünge üzerinde gerçekleştirmiş olup arı algoritmasının daha etkin olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Anushree ve Prasad (2016), çalışmalarında mobil robotun yörünge kontrolünü yörünge takip hataları en düşük olacak Şekilde uygulamışlardır. Diferansiyel sürüşlü mobil robot için önerilen yeni kontrol stratejisi Lyapunov kontrolcüden ve gözlemci olarak en küçük ortalama kareler algoritmasının kullanmından oluşturulmuştur. Önerilen kontrolcü ile yapılan çalışmada diferansiyel sürüşlü mobil robotun kinematik modeli için yörünge takip hatası en düşük olacak Şekilde sonuçlanmıştır.

Martins ve ark. (2017), çalışmalarında holonomik olmayan diferansiyel sürüşlü mobil robotların kontrolünde ağır yük ve/veya yüksek hızlarda robot kinematiği tabanlı olan kontrolcülerin yetersizliğini ve bu nedenle robot dinamiğinin dahil edildiği kontrolcülerin litertürde kontrol girdisi olarak tork ve voltajı kullandığını vurgulamışlardır. Ticari robotların kotrol girdisi olarak hızı kullandığı gerekçesiyle hız tabanlı dinamik bir model önermişlerdir. Böyle bir modelin uygulamasını uyarlamalı dinamik kontrolcü ile sunmuşlardır. Simülasyon ve deney sonuçları gösterilererek önerilen modelin avantajları ve sınırlamaları tartışılmıştır.

Lages ve Alves (2017), çalışmalarında yaygın kontrol sistemlerinden farklı olarak bu yaklaşım kısmi gözlemlenebilir Markov karar verme süreci stratejilerini Bayesian tahminleyicileri ile birlikte değerlendirmişlerdir. Bu yöntem yüksek bir işlem gücü gerektirir. Gerekli işlem gücünü azaltmak için parçacık bulutu yaklaşımını kullanmışlardır. Yöntem ile ilgili simülasyon sonuçlarını sunmuşlardır.

Ruan ve ark. (2014), çalışmalarında holonomik olmayan diferansiyel sürüşlü mobil robotun eşdeğer dönme ataleti analiz metoduyla aracın tüm yükü tekerleklere atayıp sonra tekerleklerin yüklerini her bir motor miline eşdeğer motor mili dönme ataleti olarak çevirmişler ve yük değişimi altında mobil robotun hareket modelini değişken yük altında çift çevrimli doğru akım motor sisteminin benzer eşdeğer durum uzay modeli ve kinematik modelinin birleşminden elde etmişlerdir. Gerçek sisteminin hız yanıt verilerini kullanarak ve genetik algoritmayla birleştirilerek doğru bir Şekilde model parametreleri tanımlanmıştır. Deneysel sonuçlarla önerilen yöntemin etkinliği gösterilmiştir.

İbrahim (2016) çalışmasında holonomik olmayan diferansiyel sürüşlü mobil robotun yörünge takibi için kinematik ve dinamik modelininde dahil olduğu iki kademeli kontrolcü uygulaşmıştır. Birincisi, kinematik sistemle ilgili olup yönlendirme kontrolcüsüdür. İkincisi ise kaymalı kip kontrol tekniği tabanlı hız kontrolcüsüdür. Ayrıca farklı başlangıç koşulları için kaymalı kip kontrolcünün değiştirmeli geri besleme kazançlarını seçebilmek için basit bir matematik kuralı da kullanmıştır. Karşılaştırma yapmak için hesaplamalı tork yöntemi uygulanmış ve önerilen kontrolcünün hesaplamalı tork yönteminden daha etkili olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Swadi ve ark. (2016), çalışmalarında holonomik olmayan diferansiyel sürüşlü mobil robotun yörünge takibi için bulanık-geri adımlamalı kontrolcü önermişlerdir. Kontrol algoritması, bulanık-geri adımlamalı kontrolcüyü her bir tahrik tekerine gerekli torku iletmek için oluşturulan düzeltme sinyalini besleyen mobil robotun duruşundaki hataları temel almaktadır. Kontrolcünün kararlılığını Lyapunov yöntemi ile incelenmişlerdir. Kontrolcünün parametrelerini ayarlamak için evrimsel algoritma kullanmışlardır. S şeklindeki yörünge için simülasyon sonuçları ile önerilen kontrolcünün yeterli doğrulukta olduğu gösterilmiştir.

Oubbati ve ark. (2005), çalışmalarında holonomik olmayan mobil robotun yörünge takibi için iki seviyeli uyarlamalı nöro-kontrol sistem önermişlerdir. Birinci seviyede, tekrarlı bir iletişim ağı kinematik kontrolcünün gürbüzlüğünü geliştirmekte ve referans yörüngeyi izlemesi için gerekli olan doğrusal ve açısal hızları oluşturmaktadır. İkinci seviyede, diğer bir iletişim ağı birinci seviyeden sağlanan istenilen hızları torka dönüştürmektedir. Bu kontrol yaklaşımının avantajı, dinamik model hakkında bilgiye gerek duymaması ve robotun parametrelerinin değişiminin var olmasında sinaptik ağırlık değişimine ihtiyaç duymamasıdır. Simülasyon sonuçları önerilen yaklaşımın gürbüzlülüğünün geçerliliğini göstermiştir.

Kanjanawanishkul (2015), çalışmasında diferansiyel sürüşlü mobil robot için optimal ileri hız ile yol izleme ve kontrol sinyallerinde hız ve ivme sırlamasını sağlayacak Şekilde uzaklaşan yatay düzlem metodunu kullanmıştır. Uzaklaşan yatay düzlem algoritması ileriye bakan zaman aralığı boyunca girdi sınırlamaları ve kararlılık kısıtlarını göz önüne alarak ardışık ileri hız üretmektedir. Yaklaşan bir keskin köşenin bilgisi ve aracın duruşu ile birlikte karşılayacak control sinyalini uygun biçimde öngörmektedir. Sonuç olarak mobil robot keskin köşeleri düzgün bir Şekilde dönebilmektedir. Aynı Şekilde mobil robot yüksek hız aralığında güvenli bir Şekilde gezebilmektedir. Deneysel bir model üstünde bahsi geçen durumlar denenmiştir.

Serralheiro ve ark. (2015), çalışmalarında holonomik olmayan diferansiyel sürüşlü mobil robotun herhangi bir engelin olmadığı yörünge takibi için girdi-çıktı doğrusallaştırması ve havucu takip et algoritmasını kullanmıştır. Girdi-çıktıların doğrusallaştırılması hata dinamiklerini doğrusal derece sistemine indirgenmesini sağlamaktadır. Önerilen kontrolcünün etkinliği simülasyonu yapılarak farklı yörüngelerde sınanmıştır.

Asif ve ark. (2015), çalışmalarında holonomik olmayan diferansiyel sürüşlü mobil robotun yörünge takibini çalışmışlardır. Sistem için ileri besleme ve geri besleme bulanık mantık kontrolcü tasarlanmıştır. Buada bulanık mantık kontrolü geri besleme hızlarının hesabında kullanılmıştır. Modeldeki belirsizlikler ve bozucular için yenilikçi bir plan geliştirilmiştir. Önerilen kontrolcünün performans karşılaştırması standart geri adımlamalı kontrolcü ile yapılmıştır ve simülasyon sonuçlarına göre önerilen kontrolcünün çok daha etkin olduğu sonucuna varılmıştır.

Ibari ve ark. (2016), çalışmalarında holonomik olmayan diferansiyel sürüşlü mobil robotun yörünge takibi için geri adımlamalı kontrolcü önermişlerdir. Önerilen kontrolcünün kararlılık analizi Lyapunov teorisi ile yapılmıştır. Simülasyon ve deneysel sonuçlar önerilen kontrolcünün farklı yük koşulları altında kesinlik ve kararlılık açısından etkin olduğunu göstermiştir.

2.2. Mobil Robotların Engelden Kaçması

Engelden kaçma metotları, genel (global) ve yerel (lokal) olmak üzere kabaca iki kategoriye ayrılabilir. Genel yöntemlerde bütün çevre ve engeller ile ilgili bilgiler bilinmelidir ve daha çok yol planlama problemi gibi de düşünülebilir. Bu yöntemler, isminden de anlaşılacağı gibi probleme genel bir çözüm getirir. Yerel yöntemlerde sadece yerel bir yerin bilgisine ihtiyaç vardır ve aracın hedefe doğru olan yoldaki hareketinde duruma göre yeni karar vermesi ile probleme bir çözüm getirir (Sørbø, 2013).

Engelden kaçma için başlıca yöntemler; bulanık mantık, sinirsel ağlar, dinamik pencere (genel ve yerel), A*, potansiyel alan, limit çevrim, çarpma konisi yaklaşımı, vektör alan histogramı ve türevleri (vektör alan histogramı +,vektör alan histagramı*), kabarcık bant metodu, böcek algoritması (teğet böcek algoritması, böcek algoritması 1, böcek algoritması 2), eğrilik hız metodu (temel eğrilik hız yaklaşımı, şerit eğrilik metodu), Schlegel yaklaşımı, ASL yaklaşımı şeklinde sıralanabilir (Mitjans, 2014; Sørbø, 2013; Siegwart ve Nourbakhsh, 2004).

Palm ve Driankov (2014), çalışmalarında tanımlanmış bir yörüngeyi takip eden mobil robotun önceden tanımlı olmayan ve hareket esnasında karşılaşılan engelden kaçmasını değerlendirmişlerdir. Düzgün akışa ek olarak artı bir çift akım ile silindirik engel tanımlanarak engelden kaçma için olası yörüngeler modellellenmiştir. Engelin görünmesi durumunda hangi olası yörüngenin yumuşak geçişi garantilediği hesaplanmakta ve mobil robot bu yörüngeyi izlemektedir. Akışkanlar mekaniği ve hız potansiyel prensibi, yörünge takibi esnasında elgelden kaçmada etkin bir Şekilde uygulanmıştır. Ayrıca hız potansiyeli, kuvvet potansiyeli ile birlikte hareketli engellerden kaçmada başarılı bir Şekilde uygulanmıştır.

Palm ve Driankov (2015), çalışmalarında sıkıştırılamaz akışkanlardaki hız potansiyelinin mobil robotların engelden kaçmasında önemli ve etkin bir araç olduğunu vurgulamışlardır. Birkaç dağılmış dairesel engel akış hızıyla büyük dairesel olmayan engeller ise akış potansiyeliyle çözümü sağlanmıştır. Bu yöntemde akım hatlarının sayısı ve içerdiği veri noktaları nedeniyle önce veri kümesi modelini kullanıp en son akım hattının bulanık modeli kullanılarak engelden kaçma eylemi hesaplanmıştır.

Kim ve Kim (2015), çalışmalarında iki köşe yörünge planlama algoritması kullanarak iki tarafı duvarlı ve köşeli ortamda diferansiyel sürüşlü robotun en uygun zamanda yolu takibini geliştirdikleri algoritma ile gerçekleştirmişlerdir.

Kowalczyk ve ark. (2011), çalışmalarında holonomik olmayan diferansiyel sürüşlü mobil robotun yörünge takibi için engeller bulunan bir çevrede vektör alan yönelimi kontrol algoritması sunulmuştur. Robotun engelden kaçmasını yerel yapay potansiyel fonksiyonu ile gerçekleştirmişlerdir. Gerçek bir robotla deney yaparak robotun istenilen görevi yerine getirdiği gözlemlenmiştir.

Hong ve ark. (2015), çalışmalarında klasik bir reaktif yöntem olarak dinamik pencere yaklaşımının en iyi hız komutlarını seçmek için amaç fonsiyonunu kullandığını ve robotun çalışacağı ortamın genellikle değişken ve karmaşık oluşundan dolayı amaç fonsiyonunun terimlerinin değerlerinin sabit kalmaması gerektiğini vurgulamışlardır. Bu nedenle dinamik pencere yaklaşımını bulanık mantıkla birleştirip mobil robotun hareketi esnasında uygun terim değerine karar verebilecek bir yöntem sunmuşlardır.

Sonuç olarak önerilen yöntemin, mobil robotun daha güvenli ve kolayca hareketini sağladığı görülmüştür.

Yim ve Park (2014), çalışmalarında çeşitli sürüş ve çevre koşullarında mobil robotun navigasyon problemlerini ve vektör alan histogramı ile birlikte analizine odaklanmışlardır. Bu yöntem histogram ızgara haritasında engelleri kutupsal histogram olarak göstermektedir. Vektör alan histogramı, analiz için nümerik simülasyonun numarasını sektör numarasına, robot hızına ve yolun genişliğine göre düzenlenmiştir. Sonuç olarak düzenlenen sürüş ve çevre koşullarına göre başarılı navigasyon için en küçük sayıda sektörü elde etmişlerdir.

Zohaib ve ark. (2013), çalışmalarında mobil robotun engelden kaçması için akıllı böcek algoritmasını önermişlerdir. Diğer böcek algoritmaları ile karşılaştırıldığında hedefe görece daha kısa sürede ulaştığı ve performansın arttığı gözlemlenmiştir. Geliştirilmiş algoritma, düzgün ve kısa yörünge izleyen hedef odaklı bir strateji öneermektedir. Bu ise engelden kaçma esnasında sürekli hedef konumunu değerlendirerek başarmaktadır. Önerilen algoritma daha az hesap gücü gerektirmekte ve ayarlaması kolay olmaktadır. Yapılan simülasyonda önerilen algoritmanın diğer böcek algoritmalarıyla karşılaştırması da sunulmuştur.

Alsaab ve Bicker (2014), çalışmalarında otonom mobil robotun dinamik engeller arasında navigasyon problemiyle ilgilenmişlerdir. Kullanmış oldukları hız engel yaklaşımı, iki dairesel Şekilli engel arasında çarpışma konisi prensibini kullanan basit bir metot olaraktanımlamışlardır. İç yerlerde uygulandığında iki tip zorluk meydana geleceği öngörülmüştür. İlk zorluk, gerçekte bütün engellerin dairesel olmaması ve ikinci zorluk ise mobil robotun hedefe doğru tanımlı tüm hızlarında çarpışma konilerinin bulunması olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmanın katkısı, engel büyüklüğünün ve çarpışma zamanının robot hızının miktarının olarak değerlendirildiği çarpışma konilerinin dairesel olmayan engellere uyarlanması ve gözlemlenemeyen engeller için sanal engel prensibinin önerilmesi olarak ifade etmişlerdir. İç yerlerde gerçekleştirilen deneylerde bu çalışmada önerilen kontrol algoritmasını doğrulamıştır ve elde edilen sonuçlar göstermiştirki mobil robot başarılı bir Şekilde hem statik hem de dinamik engellerden kaçabilmektedir.

Pandey ve Parhi (2014), çalışmalarında mobil robot navigasyonu ve dağınık bir çevrede engellerden kaçma için en az sayıda kural tabanlı Mamdani tipi bulanık mantık kontrolcü tasarlanmayı amaçlamışlardır. Kontrolcü 3 girdiye ve tek çıktıya sahip olacak Şekilde tasarlamışlardır. Bu teknikte, otonom mobil robotun dağınık bir ortamda herhangi bir engele çarpmadan uygun bir yönelme açısı üretmektesi amaçlanmıştır. Tüm navigasyon sistemi, bahsi geçen eşdeğer engel ve zorluklar simülasyon ortamında test edilmiş ve tatmin edici sonuçlar alınmıştır.

3. MOBİL ROBOTLAR

3.1. Mobil Robotların Hareketleri

Mobil robotlar çok farklı hareket özelliklerine sahiptirler ve bu gün geçtikçe farklı uygulamalarla, özellikle doğada biyolojik mekanizmalardan esinlenilerek artmaktadır. Bulunduğu çevreye göre hareketler sınıflandırılabilir: Bunlar su, hava, kara, uzay gibi… Günümüzde karasal hareket sınıfı çalışmaları yoğunlukta olup, başlıca karasal hareketleri şu şekilde sıralalanabilir (Siegwart ve Nourbakhsh, 2004):

- Ayaklı Hareketler
  - Zıplama (çoklu sarkaç salınımı hareketi)
  - Koşma (çoklu sarkaç salınımı hareketi)
  - Yürüme (poligon yuvarlanması)
- Tekerlekli Hareket
- Sürünme Hareketi (boyuna salınım hareketi)

Örnek olarak solucanın hareketi verilebilir.

- Kayma Hareketi (enine salınım hareketi)

Örnek olarak yılanın hareketi verilebilir.

3.2. Tekerlekli Hareket

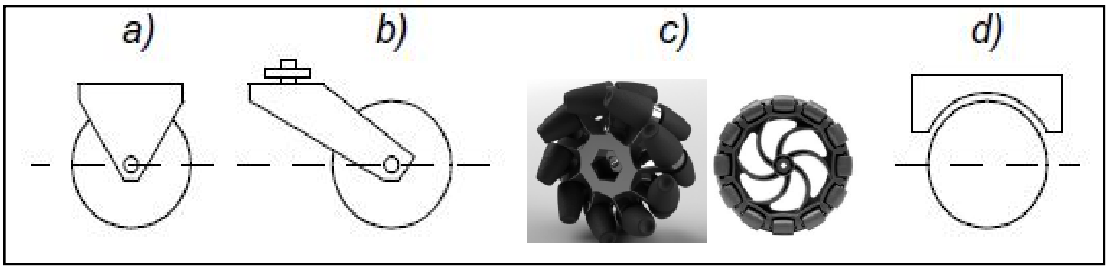
Tekerlekli hareketlerde dört temel tekerlek çeşiti mevcuttur (Siegwart ve Nourbakhsh, 2004):

a) Standart tekerler

b) Sarhoş tekerler

c) İsveç Tekerleri (çok yönlü tekerler)

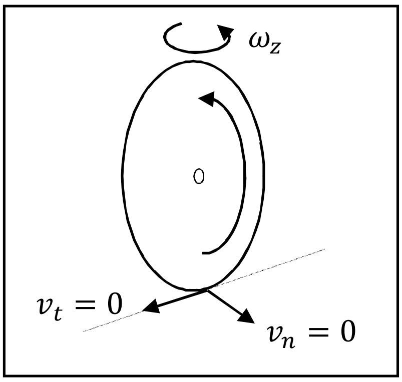
d) Küresel Tekerler



Şekil 3.1. Teker çeşitleri

Tekerlerin herhangi bir motordan tahrik alıp almadığına göre de bu dört temel sınıfı genişletmek mümkündür (Siegwart ve Nourbakhsh, 2004). Hesaplamada kullanılmak üzere teker ve teker ile zemin teması için yapılmış olan kabuller şunlardır(GARCIA, 2013):

- Teker eşit bir çapta rijit (deformasyona uğramayan) bir disktir.
- Tekerler yuvarlanma düzlemine diktir.
- Bir teker ve yuvarlanma düzlemi arasında tekil bir nokta teması vardır.
- Tekerler her zaman zeminle temas halindedir.
- Tekerin hareketi saf dönüş hareketidir, yani zemin (x-y düzlemi) ile temas anındaki nokta hızı sıfırdır.
  - Teğetsel kayma yok: *teğetsel* hız v_t sıfırdır.
  - Yanal kayma yok: *normal*(dik açılı) hız v_n sıfırdır.
  - Rotasyonel kayma var: *açısal* hız ω_z sıfırdan farklı olabilir.



Şekil 3.2. İdeal teker-zemin teması.

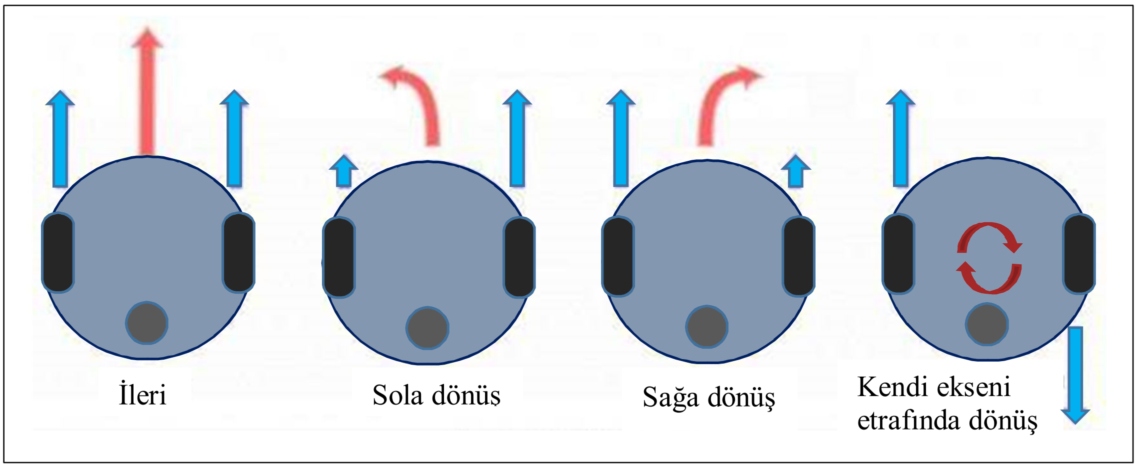
3.3. Tekerlekli Mobil Robotlar

Günümüzde tekerlekli robotların keşif, taşıma, ulaşım, deneysel vb. amaçlı kullanımları bulunmaktadır. Tekerlekli mobil robotların sürüş çeşitlerini ise aşağıdaki gibi sınıflandırmak mümkündür (Tzafestas, 2014):

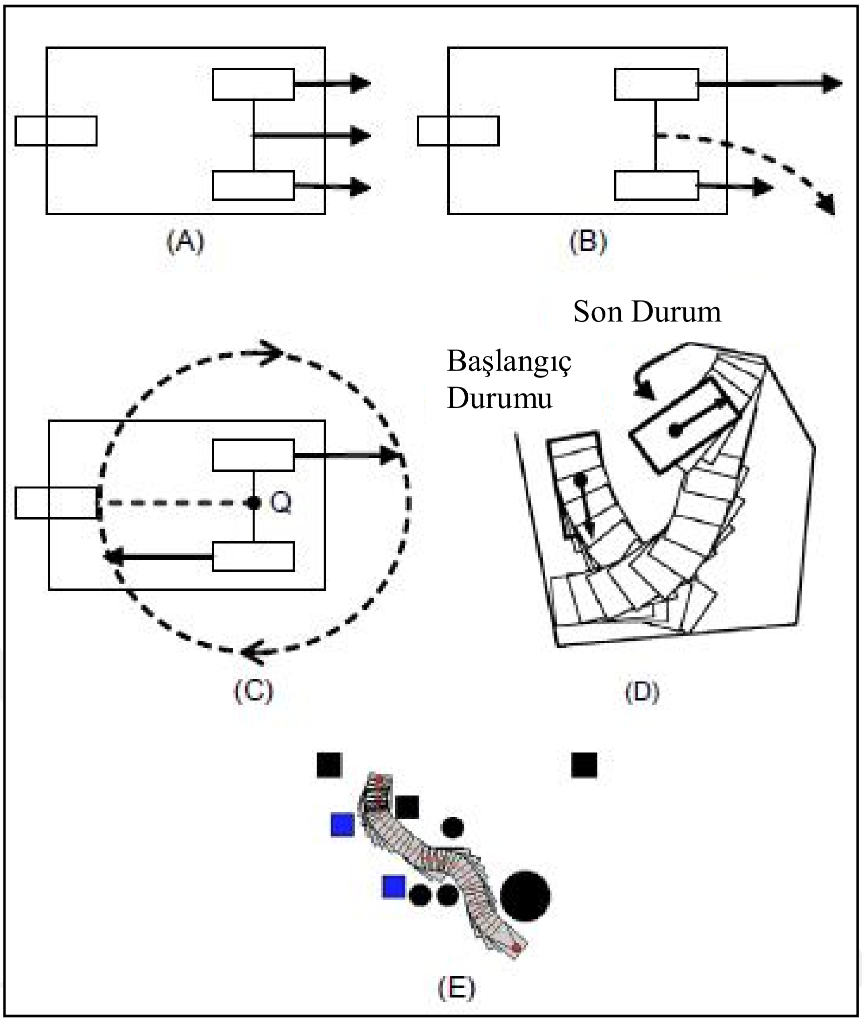
- Üçteker sürüş
- Diferansiyel sürüş
- Her(çok) yönlü sürüş
- Eş zamanlı sürüş
- Kaymalı yönlendirme
- Ackerman yönlendirmesi

3.3.1. Diferasiyel Sürüşlü Mobil Robot

Diferansiyel sürüşlü mobil robotun iki yanında bulunan tahrikli iki teker, birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. Dolayısıyla tekerleklerin hareketleri birbirlerinden etkilenmez. Farklı devirlerde hatta ters yönde dönebilirler. Fakat bu tekerleklerin sağa veya sola dönmesi söz konusu değildir. Bir veya iki adet küresel veya sarhoş teker(ler) ise, serbest hareket ile her yöne dönebilmekte ve dengeyi sağlamaktadır. Tahrikli tekerler, aracı ileri ve geri hareket ettirirken aynı zamanda farklı devirlerde dönerek aracın yön değiştirmesini sağlamaktadırlar. Şekil 3.3. ve 3.4.' te differansiyel robotun hareket modları gösterilmiştir (Tzafestas, 2014).



Şekil 3.3. a) teker hızlarına göre diferansiyel sürüş



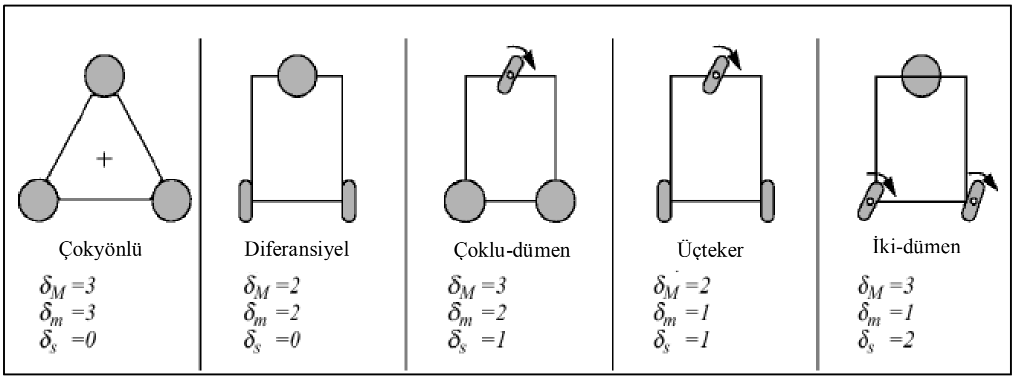
Şekil 3.4. Diferansiyel sürüşün hareket olasılıkları. (A) Doğru yol, (B) Eğri yol, (C) Dairesel yol, (D) Engelsiz manevralar ile başlangıç durumundan son duruma gitme, (E) Manevralar ile engelden kaçarak başlangıç durumundan son duruma gitme

3.3.2. Manevra kabiliyeti

Bir hareketli robotun manevra kabiliyeti (δ_M) hareketlilik derecesi ve yönlendirilebilirlik derecesinin toplamıdır. (Tzafestas, 2014; Siegwart ve Nourbakhsh, 2004). Hareketlilik derecesi (δ_m): Motor ile tahrik olan teker sayısını ifade eder. Yönlendirilebilirlik derecesi (δ_s): Tekerin doğrultusunu değiştirme kabiliyetidir. Robotun manevra kabiliyeti, hareketlilik derecesi ve yönlendirilebilirlik derecesi arasındaki ilişki denklem (3.1)' deki gibidir.

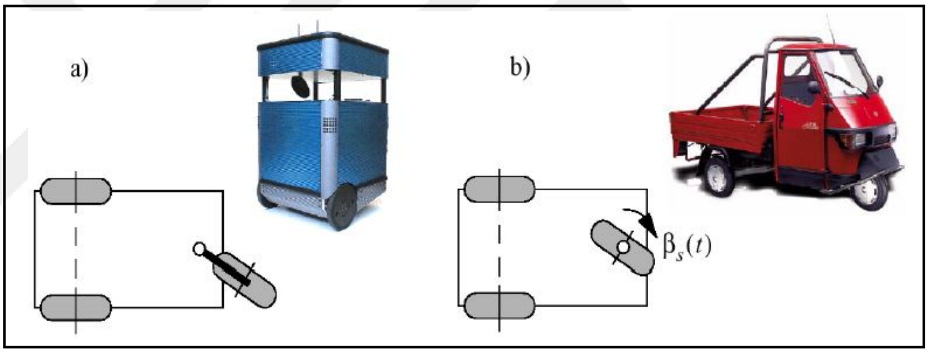
$$\delta_M = \delta_m + \delta_s \tag{3.1}$$

Yukardaki ifadelere göre beş temel üç tekerli araçların manevra yetenekleri aşağıdaki Şekil 3.5.' de gösterilmiştir (Siegwart ve Nourbakhsh, 2004).



Şekil 3.5. Üç tekerlekli mobil robot konfigürasyonları

Manevra kabiliyet derecelerinin aynı olması robotların aynı olduğu anlamına gelmez. Şekil 3.6.' da buna bir örnek verilmiştir (Siegwart ve Nourbakhsh, 2004).



Şekil 3.6. a) diferansiyel sürüşlü mobil araç, b) üçteker motosiklet

3.3.3. Tekerlekli Mobil Robot Çalışma Alanı

Tekerlekli mobil robotların diğer karakteristik parametreleri, serbeslik derecesi (DOF) ve diferansiyel serbestlik derecesi (DDOF) dir ve denklem (3.2)' yi sağlar(Tzafestas, 2014):

$$DDOF \leq \delta_M \leq DOF \tag{3.2.}$$

Diferansiyel serbestlik derecesi (DDOF) hareketlilik derecesi (δ_m) ne eşittir. Serbeslik derecesi (DOF) ise (x, y, θ) şeklinde belirtebilebileceğimiz konfigürasyon uzayının derecesine, yani bu durumda üçe eşittir (Tzafestas, 2014).

- Eğer $DOF = DDOF$ robot *holonomik* olarak adlandırılır.

- Eğer $DOF > DDOF$ robot *holonomik olmayan* olarak adlandırılır.
- Eğer $DOF < DDOF$ robot *aşırı holonomik* olarak adlandırılır.

Holonomik olup olmama durumunu başka biçimde şu şekilde ifade edilir:

Pfaffian kısıtlar integre edilebilir ise holonomik; aksi halde holonomik olmayan bir sistemdir.

Holonomik olmayan tekerlekli robotlara örnek olarakaşağıda belirtilen konfigürasyonlar örnek verilebilir (Tzafestas, 2014):

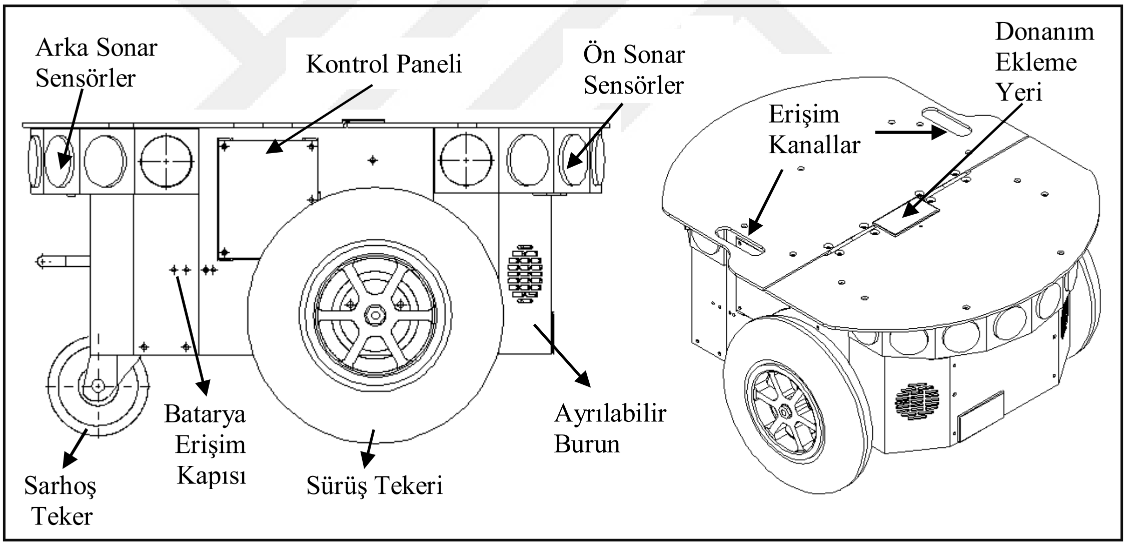
- Üçteker mobil robotlar
- Tekteker mobil robotlar
- Araba benzeri mobil robotlar
- Diferansiyel sürüşlü mobil robotlar

Bu çalışmada holonomik olmayan diferansiyel sürüşlü mobil bir robot incelendi.

4. ÜÇ TEKERLEKLİ DİFERANSİYEL SÜRÜŞLÜ MOBİL ROBOT

Bu çalışmada, kontrolcüde kullanacağımız mobil robot verileri için, eğitim ve araştırma amaçlı kullanılan Şekil 4.1.' de resmi görülen Pioneer 3-DX adlı aracın verileri ve özellikleri referans alındı.

Şekil 4.1. Pioneer 3-DX robotunun genel görünüşü



Şekil 4.2. Pioneer 3-DX robotun unsurları

Şekil 4.2.' de belirtilmiş robotun unsuları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

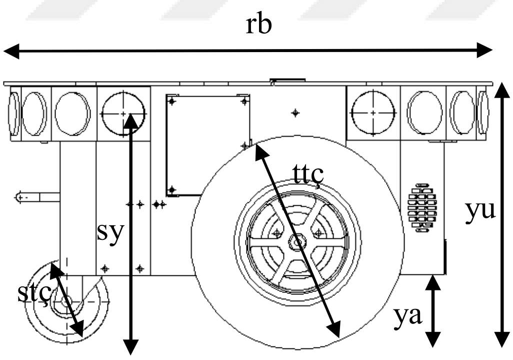
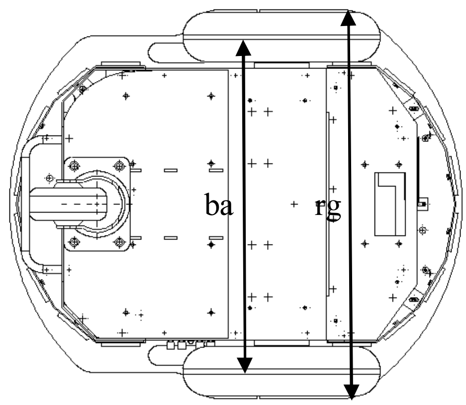
- Robot Üst Kısmı
- Motor Durdurma Tuşu
- Kullanıcı Kontrol Paneli
- Gövde, Burun ve Donanım Paneli
- Sonar Dizisi (arkada ve önde 8'er adet)

- Motorlar, Tekerler ve Enkoderler

4.1. Mobil Robotun Geometrik, Fiziksel ve Diğer Özellikleri

Bu aracın özellikleri aşağıda Tablo 4.1.' de belirtildi.

Tablo 4.1. Pioneer 3-DX ölçü ve özellikleri

Operasyon	
Robot Ağırlığı:	10 kg (gövde) + 1 kg (tekerler)
Taşıma Yükü:	17 kg
Diferansiyel Sürüş Hareketi	
Dönme Yarıçapı:	0 cm
Savrulma Yarıçapı:	26.7 cm
Maksimum İleri/Geri Hız:	1.2 m/s
Açısal hız(atanan değer):	1.65 rad/s
İvme (atanan değer):	1 m/s^2
Açısal İvme (atanan değer):	1.5/s^2
Maksimum Aşılabilir Basamak:	2.5 cm
Maksimum Aşılabilir Aralık:	5 cm
Maksimum Aşılabilirlik Derecesi:	25%
	
Ölçüler	
Robot Genişliği(rg):	381 mm
Robot Boyu(rb):	455 mm
Robot Yüksekliği(üst nokta)(yu):	237 mm
Robot Yüksekliği(alt nokta)(ya):	62 mm
Robot Tahrik Teker Çapı(ttç):	195 mm
Robot Sarhoş Teker Çapı(stç):	76 mm
Sonar Sensör Yüksekliği(sy):	210 mm
Tekerlek Basma Noktalarının Aralığı(ba):	328 mm

4.2. Motor Seçimi

Bu robotun motoru belirtilmediği için aracın özelliklerine göre motor seçimi yapıldı.

Aracın atanan ivme değeri ve kütlesinden gereken kuvvet (4.1) denklemi ile bulunur.

$$F = ma = 28\,kg * 1\,{}^{m}/_{s^2} = 28\,N \tag{4.1}$$

Herbir teker için gerekli kuvvet ise (4.2) denklemindeki gibi elde edilir.

$$F_{lw} = F_{rw} = {}^{F}/_{2} = {}^{28N}/_{2} = 14\,N \tag{4.2}$$

(4.2) denklemi ile bulunan kuvvetten teker çapı kullanılarak her bir motor için gerekli tork değerine (4.3) denklemiyle ulaşılır.

$$\tau_{rm} = \tau_{lm} = F_{lw}R = F_{rw}R = 14\,N * 0.0975\,m = 1.365\,Nm \tag{4.3}$$

Aracın maksimum doğrusal hızı kullanılarak tekerlerdeki gerekli açısal hıza ulaşılır.

$$\omega_w = {}^{v}/_{R} = {}^{1.2\,m/s}/_{0.0975} = 12.30769\,{}^{rad}/_{s} \approx 117.52978\,rpm \tag{4.4}$$

Bulunan tork ve açısal hız değerlerinden ((4.3), (4.4)) güç (4.5) denklemi vasıtasıyla hesaplanır.

$$P_w = \tau_{rm} * \omega_w = 1.365\,Nm * 12.30769\,{}^{rad}/_{s} \cong 16.8\,W \tag{4.5}$$

Güç aktarımı nedeniyle oluşan kayıplar yaklaşık %70 kabul edilebilir. Bu nedenle güç denklemdeki (4.6) gibi hesaplanır.

$$P_m = {}^{P_w}/_{0.7} = {}^{16.8\,W}/_{0.7} = 24\,W \tag{4.6}$$

Aynı Şekilde motor verimini de hesaba katarsak bu değerin 1.5 ve 2 katı arasında almamız gerekir ve bu aralık denklem (4.7) gibi gösterilebilr.

$$36\,W < P_{mr} < 48\,W \tag{4.7}$$

Bu değerler arasında mobil robota uygun olarak 12 volt için Maxon marka, 40 W, fırçasız EC-max 30 motor seçildi. Seçilen motordan 12 volt için olan değerler aşağıda(Tablo 3.1.) belirtildi.

Tablo 4.2. Maxon EC-max 30 motorunun verileri

Maxon EC-max		
EC-max 30 ***30 mm, Fırçasız, 40 Watt***		
Nominal voltajdaki değerler		
Nominal voltaj	***V***	12
Yüksüz hız	***rpm***	8680
Yüksüz akım	***mA***	223
Nominal hız	***rpm***	6650
Nominal tork (maksimum devamlı tork)	***mNm***	34,6
Nominal akım (maksimum devamlı akım)	***A***	2,85
Durgunluk torku	***mNm***	153
Başlama akımı	***A***	11,8
Maksimum verimlilik	***%***	75
Özellikler		
Terminal direnci	***ohm***	1,01
Terminal indüktans	***mH((V*s)/A)***	0,088
Tork sabiti	***mNm/A***	12,9
Hız sabiti	***rpm/V***	738
Hız / tork meyil derecesi	***rpm/mNm***	57,8
Mekaniksel zaman sabiti	***ms***	6,66
Rotor ataleti	***gcm^2***	11

12 volt için yüksüz haldeki hız değerinin %65 ile %90 arasındaki bir değer seçilebilir ki, bu da nominal hız değerine denk gelir. Buradan (4.8-9) denklemlerine ulaşılır:

$$5642\, rpm < istenilen\, devir < 7812\, rpm\ (nominal\, hız\!: 6650\, rpm \qquad (4.8)$$

$$48 < transmisyon\, oranı < 67 \qquad (4.9)$$

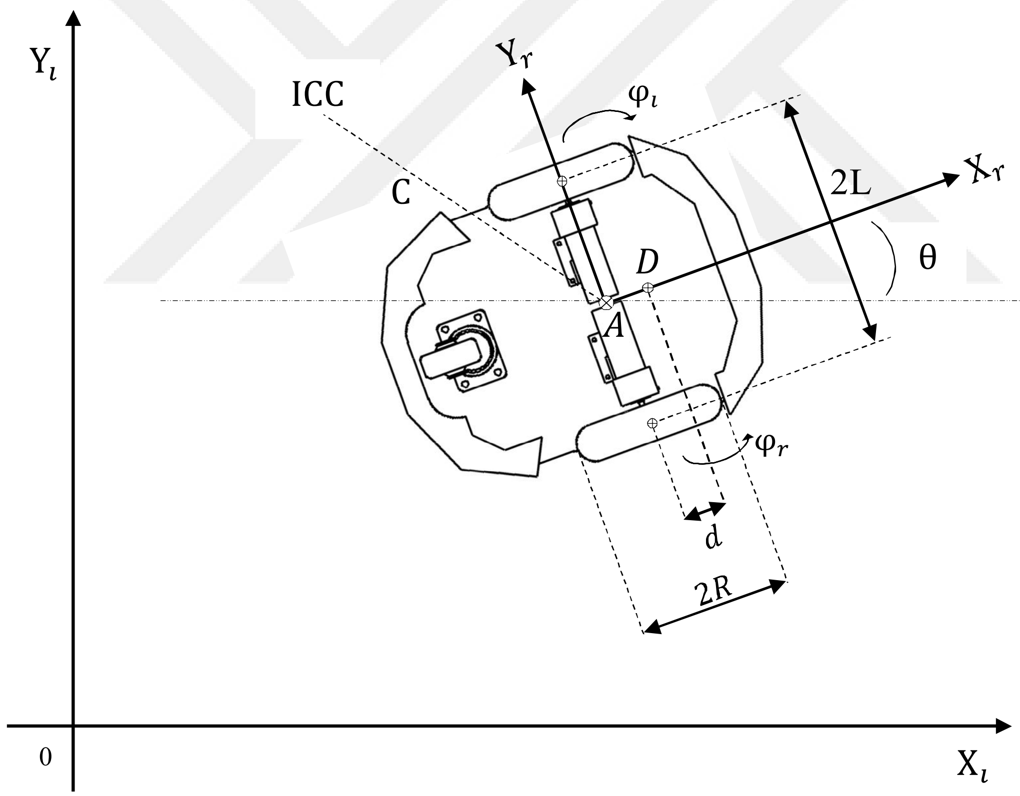
Gerekli transmisyon oranı ise 117.5 rpm için katalogta atıfta bulunulmuş olan dişlilerden 51:1, 53:1, 63:1, 66:1 oranlı olanlar seçilebilir. Bu robot için 53:1 olanı seçildi.

4.3. Diferansiyel Sürüşlü Mobil Robotun Kinematik ve Dinamik Analizi

4.3.1. Koordinat Sistemi

Diferansiyel sürüşlü mobil robotun bulunduğu çevredeki konumunu tanımlayabilmek için iki farklı koordinat sistemine ihtiyaç vadır. Bunlar;

1. Hareketsiz Koordinat Sistemi: Bu koordinat sistemi robotun hareket ettiği çevre veya düzleme tutturulmuş küresel çerçevedir. Diğer bir deyişle referans çerçevedir.$\{X_\iota, Y_\iota\}$ şeklinde gösterilir.
2. Robot Koordinat Sistemi: Bu koordinat sistemi tekerlekli mobil robota tutturulmuş yerel çerçevedir ve bu nedenle robot ile birlikte hareket etmektedir.$\{X_r, Y_r\}$ şeklinde gösterilir.



Şekil 4.3. Referans koordinat sistemi ve robot koordinat sistemi

Bu iki koordinat sistemi arasındaki konum dönüşümü ve hız dönüşümü sırasıyla;

$$q^\iota = R(\theta)q^r \text{ ve } \dot{q}^\iota = R(\theta)\dot{q}^r \tag{4.10}$$

şeklinde tanımlanır. $R(\theta)$ ortagonal dönüşüm matrisidir. Burada;

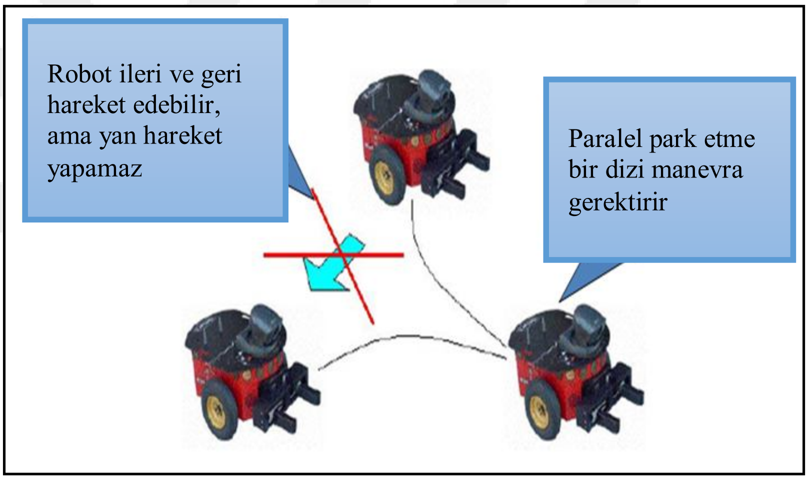
$$q^r = \begin{bmatrix} x^r \\ y^r \\ \theta^r \end{bmatrix}, \; q^\iota = \begin{bmatrix} x^\iota \\ y^\iota \\ \theta^\iota \end{bmatrix} \; ve \; R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.11}$$

4.3.2. Kinematik kısıtlar ve konfigürasyon uzayı

Diferansiyel sürüşlü mobil robotun tekerlek konfigürasyonunun getirdiği iki temel kabul nedeniyle iki adet holonomik olmayan kısıtla karakterize edilebilir. Bu kısıtlar saf dönme harekenin sonucudur ve saf dönme hareketi kısıtları şeklinde de isimlendirilebilir:

1. Yanal kayma hareketi kısıtı: Robot koordinat sisteminde robotun y ekseninde hareketinin olmadığı anlamına gelir ve (4.12) denklemindeki gibi ifade edilir.

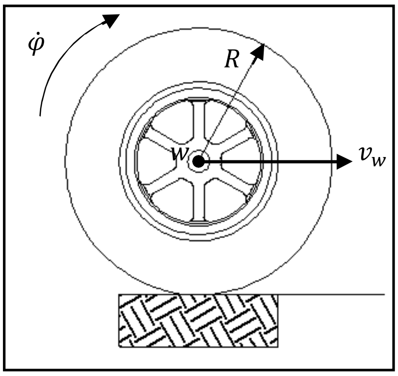
$$\dot{y}_a^r = 0 \tag{4.12}$$



Şekil 4.4. Yanal kayma hareketi kısıtı ve sonuçları

2. Kaymanın var olmadığı (boylamasına) dönme hareketi kısıtı sırasıyla sağ ve sol teker için denklem (4.13) deki gibi ifade edilir.

$$v_{pR} = R * \dot{\varphi}_R, \; v_{pL} = R * \dot{\varphi}_L \tag{4.13}$$



Şekil 4.5. dönme hareketi kısıtı ve sonuçları

Ortogonal dönüşüm matrisi (4.11) ile hareketsiz koordinat sistemine göre saf dönme hareketini incelendiğinde denklem (4.14)' te belirtildiği gibi olur;

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a^l \\ \dot{y}_a^l \\ \dot{\theta}_a^l \end{bmatrix} = R(\theta) \begin{bmatrix} \dot{x}_a^r \\ \dot{y}_a^r \\ \dot{\theta}_a^r \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \dot{x}_a^r \\ \dot{y}_a^r \\ \dot{\theta}_a^r \end{bmatrix} = R(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_a^l \\ \dot{y}_a^l \\ \dot{\theta}_a^l \end{bmatrix} \tag{4.14}$$

Robotun hareketsiz koordinat sistemindeki hız bileşenleri robot koordinat sistemine göre (4.15), (4.16), (4.17) denklemlerindeki gibi ifade edilir.

$$\dot{x}_a^l = \dot{x}_a^r \cos\theta - \dot{y}_a^r \sin\theta \tag{4.15}$$

$$\dot{y}_a^l = \dot{x}_a^r \sin\theta + \dot{y}_a^r \cos\theta \tag{4.16}$$

$$\dot{\theta}_a^l = \dot{\theta}_a^r \tag{4.17}$$

Robotun robot koordinat sistemindeki hız bileşenleri hareketsiz koordinat sistemine göre (4.18), (4.19), (4.20) denklemlerindeki gibi ifade edilir.

$$\dot{x}_a^r = \dot{x}_a^l \cos\theta + \dot{y}_a^l \sin\theta \tag{4.18}$$

$$\dot{y}_a^r = -\dot{x}_a^l \sin\theta + \dot{y}_a^l \cos\theta \tag{4.19}$$

$$\dot{\theta}_a^r = \dot{\theta}_a^l \tag{4.20}$$

D noktasının A noktasına göre hızı (4.21) denklemiyle ifade edilir.

$$v_d = v_a + \omega * d \tag{4.21}$$

(4.12), (4.13), (4.21) denklemlerine göre denklemler (4.15), (4.16), (4.17), (4.18), (4.19), (4.20) tekrar düzenlenirse (4.22), (4.23), (4.24) denklemlerine ulaşılır:

$$-\dot{x}_d^l sin\theta + \dot{y}_d^l cos\theta - \dot{\theta} d = 0 \tag{4.22}$$

$$\dot{x}_d^I cos\theta + \dot{y}_d^I sin\theta + L\dot{\theta} - R * \dot{\varphi}_R = 0 \quad (4.23)$$

$$\dot{x}_d^I cos\theta + \dot{y}_d^I sin\theta - L\dot{\theta} - R * \dot{\varphi}_L = 0 \quad (4.24)$$

Yukarıda bulunan denklemler (4.22), (4.23), (4.24) ile kinematik kısıt matrisi aşağıdaki gibi (4.25), (4.26) denklemleriyle ifade edilir:

$$\mathrm{A}(q)\dot{q} = 0 \quad (4.25)$$

$$\mathrm{A}(q) = \begin{bmatrix} -sin\theta & cos\theta & -d & 0 & 0 \\ cos\theta & sin\theta & L & -R & 0 \\ cos\theta & sin\theta & -L & 0 & -R \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

4.3.3. Kinematik model

Kinematik model, mekanik sistemin hareketini kuvvetleri değerlendirmeden inceler. Diferansiyel sürüşlü mobil robot için robotun tekerlerinin ani dönme merkizine göre açısal hızları aynı olduğundan (4.27) denklemi oluşturulur.

$$\omega(C + L) = v_L, \ \omega(C - L) = v_R \quad \rightarrow \quad C = L\,(v_R + v_L)/(v_R - v_L) \quad (4.27)$$

Robotun doğrusal hızı her iki tekerin ortalaması şeklinde olacaktır ve doğrusal hız denklem (4.28) ile açısal hız denklem (4.29) ifade edilir.

$$v = \omega * C = {(v_R + v_L)}/{2} = R\,{(\dot{\varphi}_R + \dot{\varphi}_L)}/{2} \quad (4.28)$$

$$\omega = {(v_R - v_L)}/{2L} = R\,{(\dot{\varphi}_R - \dot{\varphi}_L)}/{2L} \quad (4.29)$$

Konumu bulmak içinse (4.30), (4.31), (4.32), (4.33) ve (4.11) denklemleri kullanılır.

$$v_x = v(t)\cos\big(\theta(t)\big),\ v_y = v(t)\sin\big(\theta(t)\big) \quad (4.30)$$

$$x(t) = \int v(t)\cos\big(\theta(t)\big)dt \quad (4.31)$$

$$y(t) = \int v(t)\sin\big(\theta(t)\big)dt \quad (4.32)$$

$$\theta(t) = \int \omega(t)dt \quad (4.33)$$

Diferansiyel sürüşlü mobil robotun hızı robot koordinat sisteminde A merkez noktasına göre aşağıdaki Şekilde (4.34) ve (4.35) denklemleri ile ifade edilir:

$$\dot{x}_a^r = {R(\dot{\varphi}_R + \dot{\varphi}_L)}/{2},\ \dot{y}_a^r = 0\ buradan \quad (4.34)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a^r \\ \dot{y}_a^r \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = {}^{R}\!/_{2} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_R + \dot{\varphi}_L \\ 0 \\ {(\dot{\varphi}_R - \dot{\varphi}_L)}/_{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{R}\!/_{2} & {}^{R}\!/_{2} \\ 0 & 0 \\ {}^{R}\!/_{2L} & -{}^{R}\!/_{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_R \\ \dot{\varphi}_L \end{bmatrix} \tag{4.35}$$

Diferansiyel sürüşlü mobil robotun hızı hareketsiz koordinat sistemine göre denklem (4.36) ile ifade edilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a^l \\ \dot{y}_a^l \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos(\theta) & -sin(\theta) & 0 \\ sin(\theta) & cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{R}{2} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_R + \dot{\varphi}_L \\ 0 \\ \dfrac{\dot{\varphi}_R - \dot{\varphi}_L}{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{R}{2}\cos\theta & \dfrac{R}{2}\cos\theta \\ \dfrac{R}{2}\sin\theta & \dfrac{R}{2}\sin\theta \\ \dfrac{R}{2L} & -\dfrac{R}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_R \\ \dot{\varphi}_L \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} R\dfrac{\dot{\varphi}_R + \dot{\varphi}_L}{2} cos(\theta) \\ R\dfrac{\dot{\varphi}_R + \dot{\varphi}_L}{2} sin(\theta) \\ \dfrac{R}{2L}(\dot{\varphi}_R - \dot{\varphi}_L) \end{bmatrix} \tag{4.36}$$

Dinamik model elde edilirken tekerlek dönüşleri de bu dönüşüm matrisine (4.36) eklenecektir. Diferansiyel sürüşlü mobil robotun hareketsiz koordinat sistemindeki hızları denklemler tekrar düzenlenerek denklemdeki (4.37) gibi ifade edilir (Mac ve ark., 2016; Čerkala ve Jadlovska, 2015).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a^l \\ \dot{y}_a^l \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \tag{4.37}$$

4.3.4. Dinamik model

Dinamik, mekanik sistemin hareketinde, kinematik sistemin aksine bu harekete etki eden farklı kuvvetleri ve momentleri de hesaba katar. Korunum kanunları gereği hareket denkleminin elde edilmesinde uygulanan başlıca metotlar şunlardır:

- Lagrange Metodu
- Newton-Euler Metodu
- Diğerleri
  - Kane Metodu
  - Gibbs-Appell Metodu
  - Jourdain Metodu

- Maggie Metodu

Holonomik olmayan mekanik sistemlerin büyük bir kısmının hareket denklemi (4.38) denkleminde olduğu gibi tanımlanır (Dhaouadi ve Hatab, 2013; Fareh ve ark., 2016).

$$M(q)\ddot{q} + V(q,\dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d = B(q)\tau - \mathrm{A}^T(q)\lambda \tag{4.38}$$

$M(q)$ simetrik pozitif tanımlı eylemsizlik matrisini, $V(q,\dot{q})$ merkezcil koriolis matrisini, $F(\dot{q})$ yüzey sürtünme matrisini, $G(q)$ yerçekimi vektörünü, τ_d sınırlanmış bilinmeyen bozucu etkileri, $B(q)\tau$ girdi matrisini, $\mathrm{A}^T(q)$ kinematik sınır matrisini, λ Lagrange çarpanları vektörünü ifade etmektedir.

4.3.4.1. Robotun Lagrange Metodu ile modellenmesi

Lagrange metodu (4.39), (4.40) denklemleri ile ifade edilir.

$$L = T - U \tag{4.39}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = F - \mathrm{A}^T(q)\lambda \tag{4.40}$$

Burada Lagrangian fonksiyonu, T, kinetik enerji, U, potansiyel enerji olmak üzere $L = T - U$ şeklinde ifade edilir. F genelleştirilmiş kuvvet vektörü ve A kısıtlar matrisidir.

Diferansiyel sürüşlü mobil robot için x-y düzleminde potansiyel enerjisi $U = 0$' dır. Genelleştirilmiş koordinatlar; $q = [x_a \;\; y_a \;\; \theta \;\; \varphi_R \;\; \varphi_L]^T$ olarak seçildi.

Robot platformuna ait kinetik enerji ifadesi denklem (4.41) gibi ifade edilir.

$$T_c = \frac{1}{2} m_d v_d^2 + \frac{1}{2} I_d \dot{\theta}^2 \tag{4.41}$$

Tekerlerin kinetik enerji ifadeleri denklem (4.42) gibi ifade edilir.

$$T_{wR} = \frac{1}{2} m_w v_{wR}^2 + \frac{1}{2} I_m \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_w \dot{\varphi}_R^2 \,, \; T_{wL} = \frac{1}{2} m_w v_{wL}^2 + \frac{1}{2} I_m \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_w \dot{\varphi}_L^2 \tag{4.42}$$

Sonraki işlemler için düzlemdeki hız denklemi ifadesi (4.43) kullanıldı.

$$v_i^2 = \dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 \tag{4.43}$$

D noktası için A noktasına göre konum ifadeleri (4.44) denklemindeki gibidir.

$$x_d = x_a + d\cos\theta \,, \; y_d = y_a + d\sin\theta \tag{4.44}$$

D noktası için A noktasına göre hız ifadeleri (4.45) denklemindeki gibidir.

$$\dot{x}_d = \dot{x}_a - d\dot{\theta}\sin\theta\,,\ \dot{y}_d = \dot{y}_a + d\dot{\theta}\cos\theta \tag{4.45}$$

(4.43), (4.44), (4.45) denklemlerinin (4.41) denklemlindeki hız ifadesinde kullanılması için gerekli işlemler (4.46), (4.47), (4.48) denklemlerinde gösterildi.

$$v_d^2 = \dot{x}_a^2 - 2\dot{x}_a d\dot{\theta}\sin\theta + d^2\dot{\theta}^2 sin^2\theta + \dot{y}_a^2 + 2\dot{y}_a d\dot{\theta}\,cos\,\theta + d^2\dot{\theta}^2 cos^2\theta \tag{4.46}$$

$$v_d^2 = \dot{x}_a^2 - 2\dot{x}_a d\dot{\theta}\sin\theta + \dot{y}_a^2 + 2\dot{y}_a d\dot{\theta}\,cos\,\theta + d^2\dot{\theta}^2 \tag{4.47}$$

$$v_d^2 = \dot{x}_a^2 + \dot{y}_a^2 + 2d\dot{\theta}(-\dot{x}_a\sin\theta + \dot{y}_a\,cos\,\theta) + d^2\dot{\theta}^2 \tag{4.48}$$

(4.43), (4.44), (4.45) denklemleri (4.42) denklemindeki hız ifadelerinde kullanılması için gerekli işlemler (4.49 - 54) denklemlerinde gösterildi.

$$x_{wR} = x_a - L\,sin\,\theta, \qquad y_{wR} = y_a + L\,cos\,\theta \tag{4.49}$$

$$x_{wL} = x_a + L\,sin\,\theta, \qquad y_{wL} = y_a - L\,cos\,\theta \tag{4.50}$$

$$\dot{x}_{wR} = \dot{x}_a - L\,cos\,\theta\,\dot{\theta}, \qquad \dot{y}_{wR} = \dot{y}_a - L\,sin\,\theta\,\dot{\theta} \tag{4.51}$$

$$\dot{x}_{wL} = \dot{x}_a + L\,cos\,\theta\,\dot{\theta}, \qquad \dot{y}_{wL} = \dot{y}_a + L\,sin\,\theta\,\dot{\theta} \tag{4.52}$$

$$v_{wR}^2 = \dot{x}_a^2 + L^2 cos^2\theta\,\dot{\theta}^2 - 2\dot{x}_a L\,cos\,\theta\,\dot{\theta} + \dot{y}_a^2 + L^2 sin^2\theta\,\dot{\theta}^2 - 2\dot{y}_a L\,sin\,\theta\,\dot{\theta} \tag{4.53}$$

$$v_{wL}^2 = \dot{x}_a^2 + L^2 cos^2\theta\,\dot{\theta}^2 + 2\dot{x}_a L\,cos\,\theta\,\dot{\theta} + \dot{y}_a^2 + L^2 sin^2\theta\,\dot{\theta}^2 + 2\dot{y}_a L\,sin\,\theta\,\dot{\theta} \tag{4.54}$$

İşlem kolaylığı açısından bazı yeni ifadeler kabul edilip (4.55), (4.56) denklemleri ile aşağıdaki gibi gösterildi.

$$m = m_d + 2m_w \tag{4.55}$$

$$I = I_d + m_d d^2 + 2m_w L^2 + 2I_m \tag{4.56}$$

(4.55), (4,56) denklemleri ile kabul edilen ifadeler ile toplam kinetik enerji ifadesi düzenlenirse aşağıdaki denkleme (4.57) ulaşılır Elde edilen enerji ifadesi ile genelleştirilmiş koordinatlardaki değişkenler için sırasıyla Lagrange metodu uygulanıp sistemin dinamik modeli elde edildi.

$$T = \frac{1}{2}m(\dot{x}_a^2 + \dot{y}_a^2) + m_d d\dot{\theta}(\dot{y}_a\, cos\,\theta - \dot{x}_a\, sin\,\theta) + \frac{1}{2}I_w(\dot{\varphi}_R^2 + \dot{\varphi}_L^2) + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2$$

$$= T_c + T_{wR} + T_{wL} \tag{4.57}$$

Genelleştirilmiş koordinatlardaki x_a değişkeni için Lagrange metodu uygulandığında (4.58), (4,59), (4,60) denklemlerinden (4.61) denklemine ulaşılır.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_a}\right) - \frac{\partial L}{\partial x_a} = C_1 \tag{4.58}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_a} = m\dot{x}_a - m_d d\dot{\theta}\sin\theta \tag{4.59}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_a}\right) = m\ddot{x}_a - m_d d\big(\ddot{\theta}\, sin\,\theta + \dot{\theta}^2\cos\theta\big), \frac{\partial L}{\partial x_a} = 0 \tag{4.60}$$

$$C_1 = m\ddot{x}_a - m_d d\ddot{\theta}\, sin\,\theta - m_d d\dot{\theta}^2\cos\theta \tag{4.61}$$

Genelleştirilmiş koordinatlardaki y_a değişkeni için Lagrange metodu uygulandığında (4.62), (4,63), (4,64) denklemlerinden (4.65) denklemine ulaşılır.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}_a}\right) - \frac{\partial L}{\partial y_a} = C_2 \tag{4.62}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{y}_a} = m\dot{y}_a + m_d d\dot{\theta}\cos\theta, \tag{4.63}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial y_a}\right) = m\ddot{y}_a + m_d d\big(\ddot{\theta}\, cos\,\theta - \dot{\theta}^2\sin\theta\big), \frac{\partial L}{\partial y_a} = 0 \tag{4.64}$$

$$C_2 = m\ddot{y}_a + m_d d\ddot{\theta}\, cos\,\theta - m_d d\dot{\theta}^2\sin\theta \tag{4.65}$$

Genelleştirilmiş koordinatlardaki θ değişkeni için Lagrange metodu uygulandığında (4.66), (4,67), (4,68), (4.69), (4.70) denklemlerinden (4.71) denklemine ulaşılır.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = C_3 \tag{4.66}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = m_d d(\dot{y}_a\, cos\,\theta - \dot{x}_a\, sin\,\theta) + I\dot{\theta} \tag{4.67}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) = I\ddot{\theta} + m_a d\left(\ddot{y}_a \cos\theta - \dot{y}_a\dot{\theta}\sin\theta - \ddot{x}_a \sin\theta - \dot{x}_a \cos\theta\right) \quad (4.68)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = -m_a d\dot{\theta}\dot{y}_a \sin\theta - m_a d\dot{\theta}\dot{x}_a \cos\theta \quad (4.69)$$

$$\rightarrow I\ddot{\theta} + m_a d\left(\ddot{y}_a \cos\theta - \ddot{x}_a \sin\theta - \dot{y}_a\dot{\theta}\sin\theta - \dot{x}_a\dot{\theta}\cos\theta + \dot{y}_a\dot{\theta}\sin\theta + \dot{x}_a\dot{\theta}\cos\theta\right) \quad (4.70)$$

$$C_3 = I\ddot{\theta} + m_a d(\ddot{y}_a \cos\theta - \ddot{x}_a \sin\theta) \quad (4.71)$$

Genelleştirilmiş koordinatlardaki φ_R değişkeni için Lagrange metodu uygulandığında (4.72), (4,73) denklemlerinden (4.74) denklemine ulaşılır.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_R}\right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_R} = C_4 + \tau_R \quad (4.72)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_R} = I_w\dot{\varphi}_R,\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_R}\right) = I_w\ddot{\varphi}_R, \frac{\partial L}{\partial \varphi_R} = 0 \quad (4.73)$$

$$C_4 + \tau_R = I_w\ddot{\varphi}_R \quad (4.74)$$

Genelleştirilmiş koordinatlardaki φ_L değişkeni için Lagrange metodu uygulandığında (4.75), (4,76) denklemlerinden (4.77) denklemine ulaşılır.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_L}\right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_L} = C_5 + \tau_L \quad (4.75)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_L} = I_w\dot{\varphi}_L,\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_L}\right) = I_w\ddot{\varphi}_L, \frac{\partial L}{\partial \varphi_L} = 0 \quad (4.76)$$

$$C_5 + \tau_L = I_w\ddot{\varphi}_L \quad (4.77)$$

(4.61), (4.65), (4.71), (4.74), (4.77) denklemlerindeki C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 ifadeleri kinematik kısıtlarla ilgili denklem (4.26) katsayılarıdır ve denklem (4.78)'deki gibi ifade edilir (Dhaouadi ve Hatab, 2013).

$$\mathrm{A}(q) = [C_1 \quad C_2 \quad C_3 \quad C_4 \quad C_5] \quad (4.78)$$

Hareketin x-y düzleminde olması ve yüzey sürtünmesi hesaba katılmadığı için denklem (4.38) denklem (4.79)' e indirgenmiş olur (Dhaouadi ve Hatab, 2013).

$$M(q)\ddot{q} + V(q,\dot{q})\dot{q} = B(q)\tau - \mathrm{A}^T(q)\lambda \quad (4.79)$$

Lagrange metodu ile hesaplanmış olan (4.79) denkleminin $M(q), V(q,\dot{q}), B(q)\tau, A^T(q)$ matrisleri, sırasıyla (4.80), (4.81), (4.82), (4.83) denklemleri ile ifade edilir.

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & -m_d d\cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & m & m_d d\sin\theta & 0 & 0 \\ -m_d d\sin\theta & m_d d\cos\theta & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_w \end{bmatrix} \tag{4.80}$$

$$V(q,\dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_d d\dot{\theta}\cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m_d d\dot{\theta}\sin\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.81}$$

$$B(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.82}$$

$$A^T(q)\lambda = \begin{bmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & \cos\theta \\ \cos\theta & \sin\theta & \sin\theta \\ -d & L & -L \\ 0 & -R & 0 \\ 0 & 0 & -R \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \end{bmatrix} \tag{4.83}$$

Bu sistem tanımı kontrol ve simülasyon için daha uygun olan olan alternatif bir forma dönüştürülebilir. Bu dönüşümdeki temel amaç kinematik kısıt ve lagrange çarpanı ifadelerinden kurtulmaktır. Bunun için ilk olarak indirgenmiş vektörün tanımlaması (4.84) denklemindeki gibi yapıldı (Dhaouadi ve Hatab, 2013);

$$\eta = \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_R \\ \dot{\varphi}_L \end{bmatrix} \tag{4.84}$$

A noktası için dönüşüm matris denklem (4.85) olduğu gibi tanımlanır;

$$S_a(q) = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} R\cos\theta & R\cos\theta \\ R\sin\theta & R\sin\theta \\ R/L & -R/L \\ 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \tag{4.85}$$

D noktası için dönüşüm matrisi denklem (4.86) olduğu gibi tanımlanır;

$$S_d(q) = S(q) = \begin{bmatrix} R(L\cos\theta - d\sin\theta)/_{2L} & R(L\cos\theta + d\sin\theta)/_{2L} \\ R(L\sin\theta + d\cos\theta)/_{2L} & R(L\sin\theta - d\cos\theta)/_{2L} \\ R/_{2L} & R/_{2L} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.86}$$

D noktası için dönüşüm matrisinin türevi denklem (4.87) olduğu gibi tanımlanır;

$$\dot{S}(q) = \begin{bmatrix} -\dot{\theta}R(L\sin\theta + d\cos\theta)/_{2L} & -\dot{\theta}R(L\sin\theta - d\cos\theta)/_{2L} \\ \dot{\theta}R(L\cos\theta - d\sin\theta)/_{2L} & \dot{\theta}R(L\cos\theta + d\sin\theta)/_{2L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.87}$$

Daha sonra genelleştirilmiş koordinatların zamana göre türevlerini (4.84) ve (4.86) denklemleri kullanılarak denklem (4.88)' de ifade edilir;

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_d \\ \dot{y}_d \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi}_R \\ \dot{\varphi}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(L\cos\theta - d\sin\theta)/_{2L} & R(L\cos\theta + d\sin\theta)/_{2L} \\ R(L\sin\theta + d\cos\theta)/_{2L} & R(L\sin\theta - d\cos\theta)/_{2L} \\ R/_{2L} & R/_{2L} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_R \\ \dot{\varphi}_L \end{bmatrix} \tag{4.88}$$

(4.88) denklemi diğer bir şekli ile (4.89) denklemi ile ifade edilir (Dhaouadi ve Hatab, 2013);

$$\dot{q} = S(q)\eta \tag{4.89}$$

(4.89) denkleminin zamana göre türevi türevini alırsak aşağıdaki (4.90) denklemine ulaşılır (Dhaouadi ve Hatab, 2013);

$$\ddot{q} = \dot{S}(q)\eta + S(q)\dot{\eta} \tag{4.90}$$

Dönüşüm matrisi kısıt matrisinin sıfır uzayı olduğu kanıtlanabilir, bu aşağıdaki (4.91) denkleminde olduğu gibi gösterilir;

$$S^T(q)\mathrm{A}^T(q) = 0 \tag{4.91}$$

Elde edilen değerler (4.79) denkleminde yerine konduğunda (4.92) denklemine ulaşılır (Dhaouadi ve Hatab, 2013);

$$M(q)\left[\dot{S}(q)\eta + S(q)\dot{\eta}\right] + V(q,\dot{q})[S(q)\eta] = B(q)\tau - \mathrm{A}^T(q)\lambda \tag{4.92}$$

(4.92) denklemindeki kinematik kısıtlar ve lagrange çarpanları ifadelerinden kurtulmak amacıyla denklem (4.86)' da ifade edilen dönüşüm matrisi ile (4.92) denklemi çarpılarak (4.93) denklemine ulaşılır (Dhaouadi ve Hatab, 2013):

$$S^T(q)M(q)S(q)\dot{\eta} + S^T(q)\left[M(q)\dot{S}(q) + V(q,\dot{q})S(q)\right]\eta = S^T(q)B(q)\tau - S^T(q)\mathrm{A}^T(q)\lambda \tag{4.93}$$

Denklem (4.93)' deki gerekli sadeleleştirlmeler yapıldığında dinamik denlem için yeni matris ifadeleri (4.94), (4.95), (4.96) denklemlerinde olduğu gibi ifade edilir.

$$\bar{M}(q) = S^T(q)M(q)S(q) \tag{4.94}$$

$$\bar{V}(q,\dot{q}) = S^T(q)M(q)\dot{S}(q) + S^T(q)V(q,\dot{q})S(q) \tag{4.95}$$

$$\bar{B} = S^T(q)B(q) \tag{4.96}$$

Denklem (4.79)' da ifade edilen dinamik denklemin kinematik kısıtlar ve lagrange çarpanı ifadelerinden kurtulmuş yeni hali (4.97) denkleminde olduğu gibi yazılır:

$$\bar{M}(q)\dot{\eta} + \bar{V}(q,\dot{q})\eta = \bar{B}(q)\tau \tag{4.97}$$

İşlem kolaylığı açısından bazı yeni ifadeler kabul edilip (4.98), (4.99) denklemleri ile aşağıdaki gibi gösterilir.

$$k = d^2(m + 2m_d) + I \tag{4.98}$$

$$m_c = m + m_d \tag{4.99}$$

(4.97) denkleminin $\bar{M}(q)\dot{\eta}, \bar{V}(q,\dot{q})\eta, \bar{B}(q)\tau$ matrisleri, sırasıyla (4.100), (4.101), (4.102) denklemleri ile ifade edilir.

$$\bar{M}(q) = \begin{bmatrix} I_w + \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 + k) & \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 - k) \\ \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 - k) & I + \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 + k) \end{bmatrix} \tag{4.100}$$

$$\bar{V}(q,\dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{R^2}{2L}m_c d\dot{\theta} \\ -\frac{R^2}{2L}m_c d\dot{\theta} & 0 \end{bmatrix} \tag{4.100}$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.102}$$

(4.100), (4.101), (4.102) denklemleri (4.97) denkleminde kullanılarak sağ ve sol tekerlerin tork değeri hesaplanıp sırasıyla (4.103), (4.104) denklemleri ile sonuçları verildi:

$$\left[I_w + \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 + k)\right]\ddot{\varphi}_R + \left[\frac{R^2}{4L^2}(mL^2 - k)\right]\ddot{\varphi}_L + \left[\frac{R^2}{2L}m_c d\dot{\theta}\right]\dot{\varphi}_L = \tau_R \quad (4.103)$$

$$\left[I_w + \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 + k)\right]\ddot{\varphi}_L + \left[\frac{R^2}{4L^2}(mL^2 - k)\right]\ddot{\varphi}_R - \left[\frac{R^2}{2L}m_c d\dot{\theta}\right]\dot{\varphi}_R = \tau_L \quad (4.104)$$

Elde edilen (4.103), (4.104) denklemleri kullanılarak taraf tarafa toplama işlemi yapılıp (4.105) denklemine ve uygun işlemlerle (4.106) denklemine ulaşıldı:

$$\left[I_w + \frac{R^2}{4L^2}(2mL^2)\right]\ddot{\varphi}_R + \left[I_w + \frac{R^2}{4L^2}(2mL^2)\right]\ddot{\varphi}_L + \left[\frac{R^2}{2L}m_c d\dot{\theta}\right]\dot{\varphi}_L -$$

$$\left[\frac{R^2}{2L}m_c d\dot{\theta}\right]\dot{\varphi}_R = \tau_R + \tau_L \quad (4.105)$$

$$\frac{2}{R}\left[I_w + \frac{mR^2}{2}\right]\frac{R(\ddot{\varphi}_R + \ddot{\varphi}_L)}{2} + \frac{2L}{R}\left[\frac{R^2}{2L}m_c d\dot{\theta}\right]\frac{R(\dot{\varphi}_L - \dot{\varphi}_R)}{2L} = \tau_R + \tau_L \quad (4.106)$$

(4.106) denklemi (4.28), (4.29) denklemlerine göre yeniden düzenlenerek (4.107), (4.108) denklemlerine ve son olarak (4.109) denklemine ulaşıldı:

$$\frac{2}{R}\left[I_w + \frac{mR^2}{2}\right]\dot{v} + \frac{2L}{R}\left[\frac{R^2}{2L}m_c d\omega\right]\omega = \tau_R + \tau_L \quad (4.107)$$

$$\left[\frac{2I_w}{R} + mR\right]\dot{v} + [Rm_c d\omega]\omega = \tau_R + \tau_L \quad (4.108)$$

$$\left(m + \frac{2I_w}{R^2}\right)\dot{v} - (m + m_d)d\omega^2 = \frac{1}{R}(\tau_R + \tau_L) \quad (4.109)$$

Elde edilen (4.103), (4.104) denklemleri kullanılarak taraf tarafa çıkartma işlemi yapılıp (4.110), (4.111) denklemlerine ve uygun işlemlerle (4.112) denklemine ulaşıldı:

$$\left[I_w + \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 + k)\right](\ddot{\varphi}_R - \ddot{\varphi}_L) + \left[\frac{R^2}{4L^2}(mL^2 - k)\right](\ddot{\varphi}_L - \ddot{\varphi}_R) +$$

$$\left[\frac{R^2}{2L}m_c d\dot{\theta}\right](\dot{\varphi}_L + \dot{\varphi}_R) = \tau_R - \tau_L \tag{4.110}$$

$$\left\{\left[I_w + \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 + k)\right] - \left[\frac{R^2}{4L^2}(mL^2 - k)\right]\right\}(\ddot{\varphi}_R - \ddot{\varphi}_L) +$$

$$\left[\frac{R^2}{2L}m_c d\dot{\theta}\right](\dot{\varphi}_L + \dot{\varphi}_R) = \tau_R - \tau_L \tag{4.111}$$

$$\frac{2L}{R}\left[I_w + \frac{R^2}{4L^2}2k\right]\frac{R(\ddot{\varphi}_R - \ddot{\varphi}_L)}{2L} + \frac{2}{R}\left[\frac{R^2}{2L}m_c d\dot{\theta}\right]\frac{R(\dot{\varphi}_L + \dot{\varphi}_R)}{2} = \tau_R - \tau_L \tag{4.112}$$

(4.112) denklemi (4.28), (4.29) denklemlerine göre yeniden düzenlenerek (4.113) denklemine ve son olarak (4.114) denklemine ulaşıldı:

$$\left[\frac{2LI_w}{R} + \frac{Rk}{L}\right]\dot{\omega} + \left[\frac{R}{L}m_c d\omega\right]v = \tau_R - \tau_L \tag{4.113}$$

$$\left(d^2(m + 2m_d) + I + \frac{2L^2}{R^2}I_w\right)\dot{\omega} + m_c d\omega v = \frac{L}{R}(\tau_R - \tau_L) \tag{4.114}$$

Elde edilen bu iki denklem (4.109), (4.114) ile robotun dinamik denkleminin matlab simulink modellemesi yapıldı.

4.3.4.1. Aktüatörün modellenmesi

DC motorlar diferansiyel sürüşlü mobil robotun tahrik tekerlerinin hareketi için kullanıldı. DC motorlar voltaj ile kontrol edilebilir. DC motorun özellikleri aşağıdaki denklemler ile ifade edilir (Dhaouadi, R. ve Hatab, A. A., 2013).

Tablo 4.3. Motor tanımlamada kullanılacak veriler

	DC-Motor model		**Maxon motor kataloğu (maxon motor catalogue 2014, p. 48)**	
Tanımlamalar	**Değişken**	**Birim**	**Değişken**	**Birim**
Voltaj	$v(t)$	V	U	V
Elektrik Akımı	$i(t)$	A	I	$mA = 10^{-3}A$
Direnç	R_a	Ω	R	Ω
Endüksiyon	L_a	$H = \frac{V*s}{A}$	L	$mH = 10^{-3}H = 10^{-3}\frac{V*s}{A}$
Hız Sabiti	-	-	K_n	$\frac{rpm}{V} = \frac{\pi}{30} * \frac{1}{V*s}$
Geri EMK sabiti	K_b	$V*s$	-	-
Atalet	J	$N*s = kg*m^2$	J	$g*cm^2 = 10^{-7}kg*m^2$
Tork sabiti	K_t	$\frac{N*m}{A}$	K_m	$\frac{mN*m}{A} = 10^{-3}\frac{N*m}{A}$
Sürtünme	b	$N*m*s$	-	-
Hız	$\omega(t)$	$\frac{1}{s}$	n	rpm

$$v(t) = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \tag{4.115}$$

$$e_a = K_b \omega(t) \tag{4.116}$$

$$\tau_m = K_t i(t) \tag{4.117}$$

$$\tau = N\tau_m \tag{4.118}$$

Bu denklemlerde (4.115-118); $v(t)$ girdi voltajını, R_a armatür direncini, L_a armatür endüktansını, $\omega(t)$ motorun açısal hızını, $i(t)$ elektromotif voltaj akım girdisini, e_a karşı elektromotif voltajını, K_b ters elektromotif kuvvet sabitini, K_t tork sabitini, N aktarma oranını, τ çıktı torkunu, τ_m motor torkunu belirtmektedir (Dhaouadi ve Hatab, 2013).

Seçilen maxon motorunun verilerinden hesaplamalarda kulllanacak olan diğer iki parametresine (4.119) ve (4.120) denklemlemleri kullanılarak ulaşıldı.

$$K_b = \frac{30}{\pi K_n} = \frac{30}{\pi 738} = 12.939 * 10^{-3} Nm/A \approx 12.9\ mNm/A \tag{4.119}$$

$$b = \frac{J\dot{\omega}(t) + K_m i(t)}{\omega(t)} = \frac{K_m I}{n} = \frac{12.9 * 10^{-3} * 223 * 10^{-3}}{8680 * \pi/30 * s}$$

$$= 3.16479 * 10^{-6}\ Nms \tag{4.120}$$

5. KONTROLCÜ TASARIMI VE SİSTEM SİMÜLASYONU

5.1. Mobil Robotun Temel Hareket Görevleri

Temel hareket görevleri dört kısımda incelenebilir (De Luca, 2016(2)):

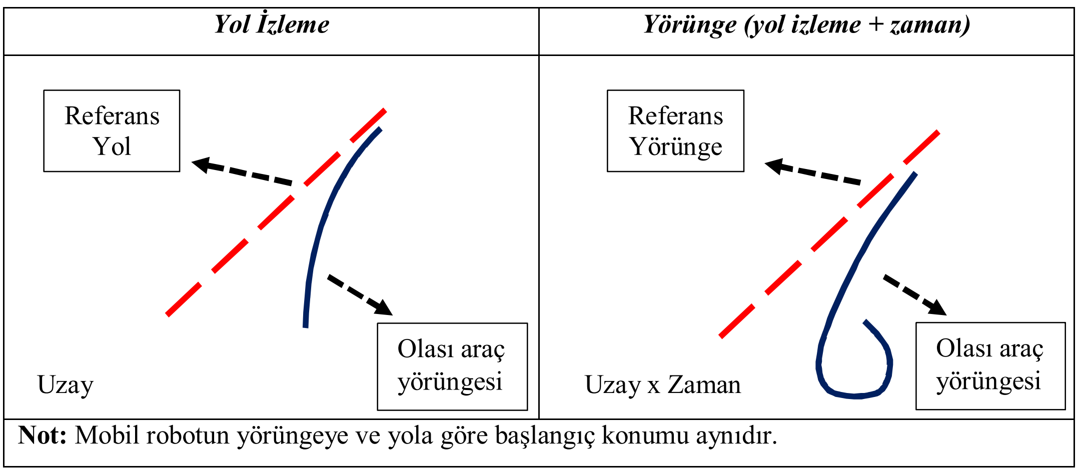
- noktadan noktaya hareket
- yol izleme hareketi
- yörünge takip (yol izleme + zaman fonksiyonu) hareketi
- tepkisel (yerel) hareket
  - duvar izleme
  - hedef takibi
  - çizgi üzerindeki engelden kaçma

5.2. Yörünge Takibi ve Engelden Kaçma

Mobil robotlarda yörünge takibi ve engelden kaçma başlıca araştırma konuları olup alt başlıklarda incelendi.

5.2.1. Yörünge Takibi

Yol izleme zamandan bağımsız olarak tercih edilen noktalar bütünü olarak ifade edilir; yörünge takibi ise yol izlemeye ek olarak zaman fonksiyonunu da içinde barındırır, başka bir ifade ile yol üzerinde seçilen bir noktada hangi zamanda orada bulunması gerektiğini tanımlar (Şekil 5.1.) (Pascoal ve Aguiar , 2011).



Şekil 5.1. Yol ve Yörünge (Zamana bağlı yol)

Şekil (5.1.) den de anlaşılacağı gibi; yol izlemede referansa düzgün ve yumuşak yakınsama gözlemlenirken, yörünge takibinde referansın herbir noktasının gerektirdiği zaman nedeniyle geri veya ters yönde hareketler gözlemlenebilir (Pascoal ve Aguiar, 2011). Bu çalışmada referans yörünge olarak: daire, kare ve sekiz şekli kullanıldı.

5.2.2. Engelden Kaçma

Mobil robotlarda en çok karşılaşılan algoritmalar şunlardır (Sørbø, 2013):

- *Bug Algoritması*: En basit engelden kaçma algoritmasıdır. Bug1 ve Bug2 olark ikiye ayrılır;
  - Bug1 algoritması engel algılanınca engel dış hattında tamamen dolanıp daha sonra hedefe en yakın noktadan devam ederek hedefe ulamayı amaçlar.
  - Bug2 algoritması engelin etrafını dolaşmayı hedefe doğru ulaşabileceği bir pozisyona ulaşınca bırakıp hedefe yönelir.
- *Vektör Alan Histogramı (VFH)*: Çevre ızgara şeklinde tasvir edilir. Izgarada bulunan hücrelerin değerleri o hücrede engel bulunma olasılığını belirtir. Araçta yönlendirme iki kademede hesaplanır;
  - Robotun geçebileceği tüm açıklıklar hesaplanır.
  - En düşük maliyet fonksiyonu hesaplanıp seçilir.

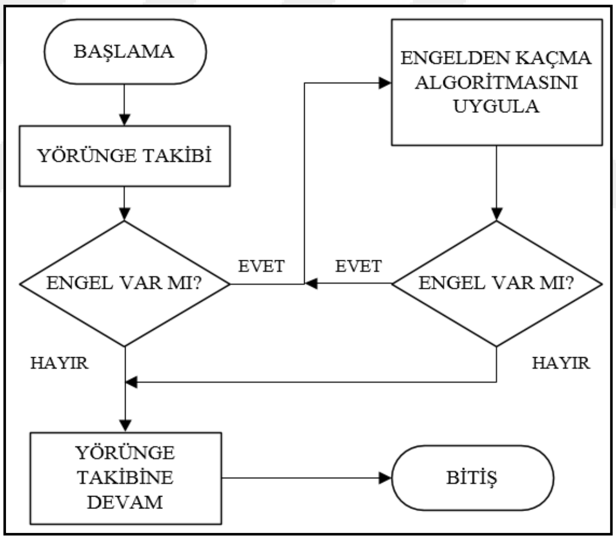
Bu algoritma çok kullanılamakla birlikte daha sonraları VFH+ ve VFH* versiyonları geliştirilmiş ve uygulanmaktadır.

- *Dinamik Pencere Yaklaşımı*: Bir sonraki adım zamanında ulaşılabilir doğrusal hız(v) ve açısal hız(ω) çifti değişkenler grubu tarafından biçimlendirilmiş hız uzayında engelle çarpışmaya neden olacak hız çiftlerinin tanımlı pencere tarafından elimine edilmesi mantığına güder. Geri kalan hız çiftlerinden ise istenilen hız çifti amaç fonksiyonu ile belirlenir.
- *Potansiyel Alan Algoritması*: Bu algoritmada hedef ve engel tarafında oluşturulmuş potansiyel bir alanda robot parçacık gibi davranır. Bu durumda hedef çekici bir potansiyel oluştururken engel itici bir potansiyel oluşturur. Potansiyel alan bir enerji alanı gibi incelenebilir ve her bir noktadaki eğimi

bir kuvvet şeklindedir. Böylece robotun bulunduğu konumda engelden kaçmak için gerekli ivme ve hız değerlerine ulaşılır.

- *Diğerleri*:
  - Eğri Hız Metodu
  - ETH-ASL Yaklaşımı
  - Schlegel Yaklaşımı

Bütün bu uygulamaların avantaj ve dezavantajları olup literatürde karşılatırmalarına rastlamak mümkündür. Sınıflandırma yapılmak istenildiğinde ise genel ve yerel olarak ikiye ayrılabilir(Sørbø, 2013). Bu çalışmada yerel ve belirli mesafede aktif olan özgün bir algoritma denendi ve sonuçları gözlemlendi. Uygulanacak algoritma ise genel olarak aşağıdaki şekilde gösterildi (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Engelden Kaçma Algoritması

Geliştrilen algoritmanın tarifi aşağıdaki gibi yapılabilir:

Eğer; seçili zamandaki yörünge noktası ve engel arasındaki mesafe, engel ve robot yarıçapının tepki mesafesi ile toplamından büyük veya eşit olma şartı doğru ise; doğrusal hız çıktı değeri kontrolcülerin hesapladığı gibidir. Şart doğru değilse; doğrusal hız çıktı değeri 0, açısal hız çıktı değerinin +/- maksimum açısal hız değerinin engel ve robot arasındaki mesafeye bölümü kadar veya 0 olur. Maksimum açısal hız değerinin +/- olması robotun engelin ne tarafından döneceği ile ilgilidir.

5.3. Kontrol Edilebilirlik Analizi

Kontrol edilebilrlik bir sistemin içinde bulunduğu tüm konfigürasyon uzayında yalnızca kesin kabuledilebilir yönlendirme ile (kinematik kısıtlar dahilinde) hareket edebilme yeteneğidir. Kontrol edilebilirlik analizi için (5.1-3) deklemleri incelendi (De Luca, 2016(1)):

$$q \in CS \; dimCS = n \qquad konfigürasyon\; uzayı \tag{5.1}$$

$$\eta \in VS \; dimVS = m \qquad (girdi)\; komut\; uzayı \tag{5.2}$$

$$A(q)\dot{q} = 0 \leftrightarrows \; \dot{q} = S(q)\eta = \sum_{i=1}^{m} g_i\,(q)\eta_i \tag{5.3}$$

Diferansiyel kısıtlar integre edilebiliyor mu, edilemiyor mu? Diğerbir deyişle, robot uygun manevralarla konfigürasyon uzayında *(CS)* herhangi bir q noktasına erişebiliyor mu? (veya, bu sistem kontrol edilebilir mi?)

- Araç ve cevabı doğrusal olmayan kontrol teorisinde bulunur (De Luca, 2016(1)):

  1. araç: $g_1(q)\; ve\; g_2(q)$ vektör alanlarının *Lie bracket' ı (Lie ayraçları)* olarak tanımlanır;

$$[g_1, g_2](q) = \cancelto{0}{\frac{\partial g_2}{\partial q}} g_1(q) - \frac{\partial g_1}{\partial q} g_2(q) \tag{5.4}$$

  $g_1(\eta_2 = 0),\; g_2(\eta_1 = 0)$ denklemlerinin ötesinde hareket için yeni bir yön sağlamaktadır.

  2. *araç:* vektör alanları takımı tarafından üretilir. Örneğin (tekrarlanan *Lie bracket* vasıtasıyla) *erişilebilirlik dağılımı A*, $m = 2$ için;

$$A = \{g_1,\; g_2, [g_1, g_2], [g_1, [g_1, g_2]], \dots\} \tag{5.5}$$

$$= g_1, g_2 \text{ tarafından üretilen } \; Lie\; Cebri$$

<u>*Teorem*</u>:

$$rank\ A = n \qquad \forall q \in CS$$

$$\Updownarrow$$

manevralarla birlikte!

$$CS\ tamamen\ erişilebilir \tag{5.6}$$

$$\Updownarrow$$

$$A(q)\dot{q} = 0\ holonomik\ olmayan$$

5.3.1. Diferansiyel Sürüşlü Mobil Robotun Kontrol Edilebilirliği

$$q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \in CS, \qquad g_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ 0 \end{bmatrix}, \qquad g_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5.7}$$

$$dimCS = n = 3 \tag{5.8}$$

$$[g_1, g_2] = \frac{\partial g_2}{\partial q} g_1 - \frac{\partial g_1}{\partial q} g_2 = \begin{bmatrix} \sin\theta \\ -\cos\theta \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.9}$$

$$rank \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ \sin\theta & 0 & -\cos\theta \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = 3 = n \tag{5.10}$$

Bu durumda, ileri geri ve dönme durumunda robota iki konfigürasyon arasında hareketine izin veriyor (De Luca, 2016(1)).

r çapındaki tekerinde dönme çapı hesaba katılıp (5.11-14) denklemleri elde edilir;

$$q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \in CS, \qquad g_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ 1/r \\ 0 \end{bmatrix}, \qquad g_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5.11}$$

$$dimCS = n = 4 \tag{5.12}$$

$$[g_1, g_2] = \begin{bmatrix} \sin\theta \\ -\cos\theta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \qquad [g_2, [g_1 g_2]] = \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ -\cos\theta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.13}$$

$$rank\left[g_1, g_2 [g_1, g_2][g_2, [g_1 g_2]]\right] = 4 = n \tag{5.14}$$

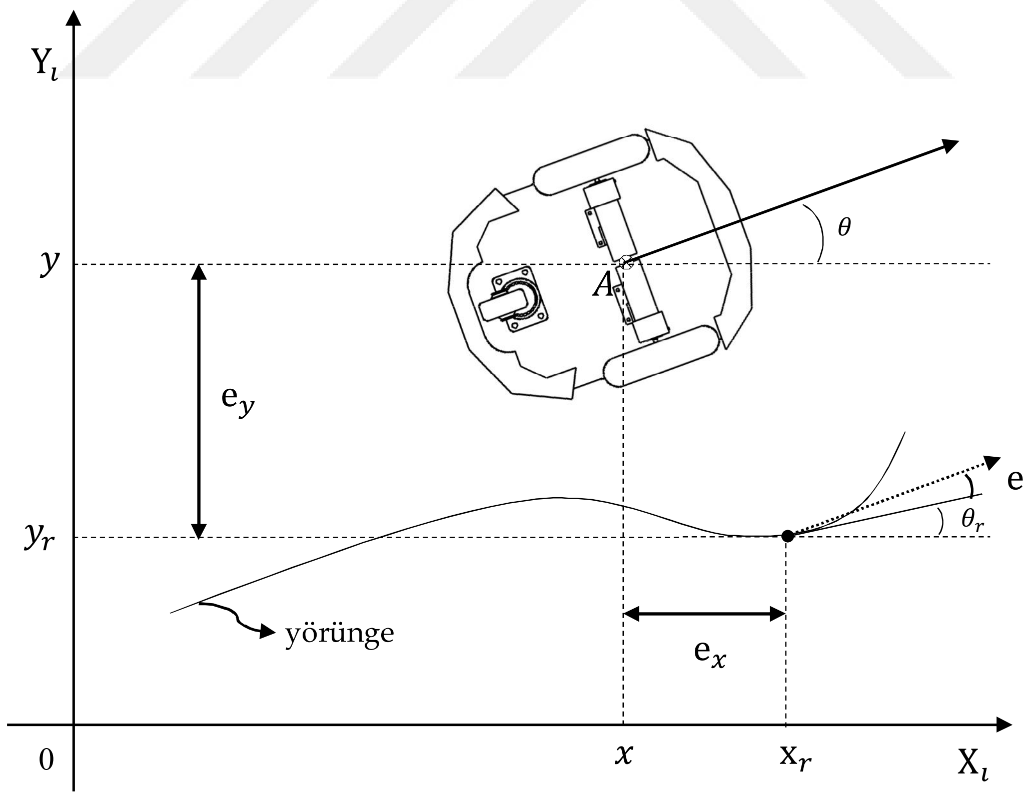
Böylece uygun manevralarla (x, y) düzleminde istenilennoktaya θ açısında ve tekerin istenilen φ dönme açısında ulaşılabilirliği kanıtlanmıştır. (De Luca, 2016(1)).

5.4. Kontrolcü Tasarımı

Diferansiyel sürüşlü mobil robotun arzu edilen yörüngeyi takip edebilmesi için PID ve kinematik tabanlı geri adımlamalı kontrolcü (KTGK) tasarımı yapılmıştır. Geri adımlamalı kontrolcü yörünge takibinin doğrusal olmama durumunun üstesinden gelebilmek için ve PID ve bulanık kontrolcü DC motorların hız ayarlamaları için kullanılmıştır.

5.4.1. Kinematik Tabanlı Geri Adımlamalı Kontrolcü

Bu kontrol sisteminde iki durum kullanılılmıştır ve referans durumu $q_r = [x_r \quad y_r \quad \theta_r]^T$ ve mevcut durumu $q = [\mathrm{x} \quad \mathrm{y} \quad \theta]^T$ olarak belirtilmiştir (MOHARERI, 2009). Hata e_p ise Şekil 5.3.’ te gösterildiği gibi tanımlanmıştır ve denklem (5.15) ile ifade edilmiştir. (Kanayama ve ark., 1990; MOHARERI, 2009; DEMİRBAŞ ve KALYONCU, 2017):



Şekil 5.3. Yörünge takip hataları

$$e_p = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta & sin\theta & 0 \\ -sin\theta & cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \tag{5.15}$$

Kontrol problemi, holonomik olmayan mobil robotun, sistemi asimtotiksel kararlı yapacak hızlarını (v doğrusal hız, ω açısal hız) tahmin etmek olacaktır. Önerilen kinematik tabanlı geri adımlamalı kontrol kuralı aşağıdaki gibi ifade edilir (Kanayama ve ark., 1990):

$$\begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r cose_\theta + K_x e_x \\ \omega_r + K_y v_r e_y + K_\theta v_r sine_\theta \end{bmatrix} \tag{5.16}$$

K_x, K_y ve K_θ pozitif sabitlerdir. Bu sabitler, kinematik tabanlı geri adımlamalı kontrolcünün kazançlarıdır. Lyapunov kararlılık metodu ise kontrol kuralının kararlılığını ispatlamada kullanılır. Kararlılık, genellikle geribeslemeyi içeren, zaman sonsuza yaklaşırken hedefe yakınsaması durumudur (Demirbaş ve Kalyoncu, 2017).

5.4.1.1. Lyapunov kararlılık analizi

Denklem (5.16)' daki kontrol kuralının Lyapunov kararlılık analizi aşağıdaki gibi tanımlanır (Kanayama ve ark., 1990; Mohareri, 2009):

Önerme 1:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{e}_\theta \end{bmatrix} = \dot{e}_p = f(t, e_p) = \begin{bmatrix} \omega e_y - v + v_r cose_\theta \\ -\omega e_x + v_r sine_\theta \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix} \tag{5.17}$$

Bu sonuç (4.37) ve (5.15) denklemleri ile ispatlanabilir:

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta & sin\theta & 0 \\ -sin\theta & cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} (x_r - x) \cos\theta + (y_r - y) \sin\theta \\ -(x_r - x) \sin\theta + (y_r - y) \cos\theta \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \tag{5.18}$$

$$\dot{e}_x = (\dot{x}_r - \dot{x})cos\theta + (\dot{y}_r - \dot{y})sin\theta - (x_r - x)\dot{\theta}sin\theta + (y_r - y)\dot{\theta}cos\theta$$

$$= e_y\omega - v + \dot{x}_r \cos(\theta_r - \theta) + \dot{y}_r \sin(\theta_r - \theta) = e_y\omega - v + v_r cose_\theta \tag{5.19}$$

$$\dot{e}_y = -(\dot{x}_r - \dot{x})sin\theta + (\dot{y}_r - \dot{y})cos\theta - (x_r - x)\dot{\theta}cos\theta - (y_r - y)\dot{\theta}sin\theta$$

$$= -e_x\omega - \dot{x}_r \sin(\theta_r - \theta) + \dot{y}_r \cos(\theta_r - \theta) = -e_x\omega + v_r sine_\theta \tag{5.20}$$

$$\dot{e}_\theta = \dot{\theta}_r - \dot{\theta} = \omega_r - \omega \tag{5.21}$$

(5.19), (5.20) ve (5.21) denklemleri vasıtasıyla denklem (5.17) elde edilir.

Önerme 2:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{e}_\theta \end{bmatrix} = \dot{e}_p = f(t, e_p) = \begin{bmatrix} (\omega_r - v_r(K_y e_y + K_\theta \sin e_\theta))e_y + K_x e_x \\ -(\omega_r - v_r(K_y e_y + K_\theta \sin e_\theta))e_x + v_r \sin e_\theta \\ -v_r(K_y e_y + K_\theta \sin e_\theta) \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

Denklem (5.16) kullanılarak, referans hız $v_r > 0$ ve $e_p = 0$ iken kararlı dengede olduğu bilinmektedir. Bir skalar fonksiyon, denklem (5.23)' te ifade edildiği gibi sistem için Lyapunov fonksiyon adayı olarak önerilir (MOHARERI, 2009; Kanayama ve ark., 1990):

$$V = \tfrac{1}{2}\left(e_x{}^2 + e_y{}^2\right) + {(1 - \cos e_\theta)}/{K_y} \quad (5.23)$$

Açıkça görülürki, $V \geq 0$. $e_p = 0 \Rightarrow V = 0$ ve eğer $e_p \neq 0 \Longrightarrow V > 0$, bu nedenle yukarıdaki denklem (5.23) pozitif tanımlı fonksiyondur. Önerme 2 kullanılarak (5.23) denkleminin bir Lyapunov fonksiyonu olduğu sonucuna varılır (MOHARERI, 2009; Kanayama ve ark., 1990):

$$\dot{V} = \dot{e}_x e_x + \dot{e}_y e_y + \frac{\dot{e}_\theta \sin(e_\theta)}{K_y} + \frac{[-v_r\left(K_y e_y + K_\theta sin(e_\theta)\right)]\sin(e_\theta)}{K_y} \quad (5.24)$$

$$= \left[\left(\omega_r + v_r\left(K_y e_y + K_\theta sin(e_\theta)\right)\right)e_y - K_x e_x\right]e_x$$

$$+ \left[-\left(\omega_r + v_r\left(K_y e_y + K_\theta sin(e_\theta)\right)\right)e_x + v_r \sin(e_\theta)\right]e_y$$

$$+ \frac{[-v_r\left(K_y e_y + K_\theta sin(e_\theta)\right)]\sin(e_\theta)}{K_y} \quad (5.25)$$

$$= -K_x e_x{}^2 - \frac{v_r K_\theta sin^2 e_\theta}{K_y} \leq 0 \quad (5.26)$$

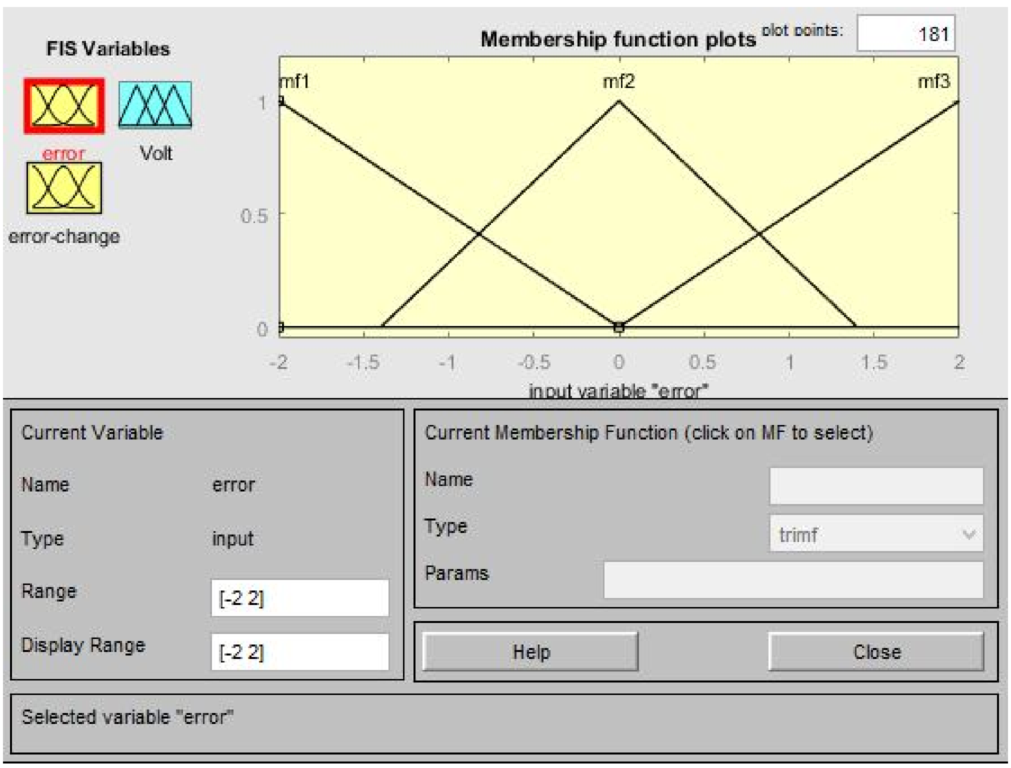
Sonuç olarak Lyapunov fonksiyonu V'nin türevi negatif tanımlı fonksiyondur. v_r, ω_r, K_x, K_y, K_θ sınırlandırılmış ve v_r, ω_r sürekli olduğu koşullar altında $e_p = 0$ civarında düzgün olalarak asimtotik dengede olduğu anlamına gelmektedir (Kanayama ve ark., 1990).

5.4.2. Bulanık Mantık Tabanlı Kontrolcü

Bulanık mantık sistemlerinin teorisi, insanın işlem yapma kapasitesinden ve algısal tabanlı bilgi ile ilişkilendirmesinden esinlenmiştir. Kural tabanlı bulanık mantık kesin olmayan ve belirsiz bilgiler ile muhakeme ve karar verme için bilimsel bir biçim sağlamaktadır. Bulanık mantık yaklaşımı kontrol problemine bir kişinin karar alması nasılsa öyle yaklaşmaktadır. Bulanık mantığın asıl avantajı; insan deneyiminden sezgisel kurallar çıkarmak ve bu şekilde analitik model gereklerini çözmektir (Mac ve ark., 2016).

Bu çalışmada bulanık mantık kontrolcüsü; hata ve hata değişiminin girdi olarak ifade edildiği üyelik fonksiyonlarından (bulanıklaştırıcı) (Şekil 5.4-5.), kişisel bilgiler dahilinde oluşturulan kurallar kümesinden (Şekil 5.6.) ve hesaplanan değerlerin çıktı olarak ifade edildiği üyelik fonksiyonlarından (durulayıcı) (Şekil 5.7.) oluşmaktadır.

Bulanık mantık üyelik fonksiyonlarının üçgen, yamuk, çan eğrisi gibi çeşitleri vardır. Üyelik fonksiyonu seçimi sistem gereklerini değerlendiren kişiye bağlıdır ve başka bir kişiye göre farklılık gösterebilir. Bu çalışmada girdi ve çıktılar üçgen üyelik fonksiyonu olarak seçilidir (Şekil 5.4., Şekil 5.5., Şekil 5.7).

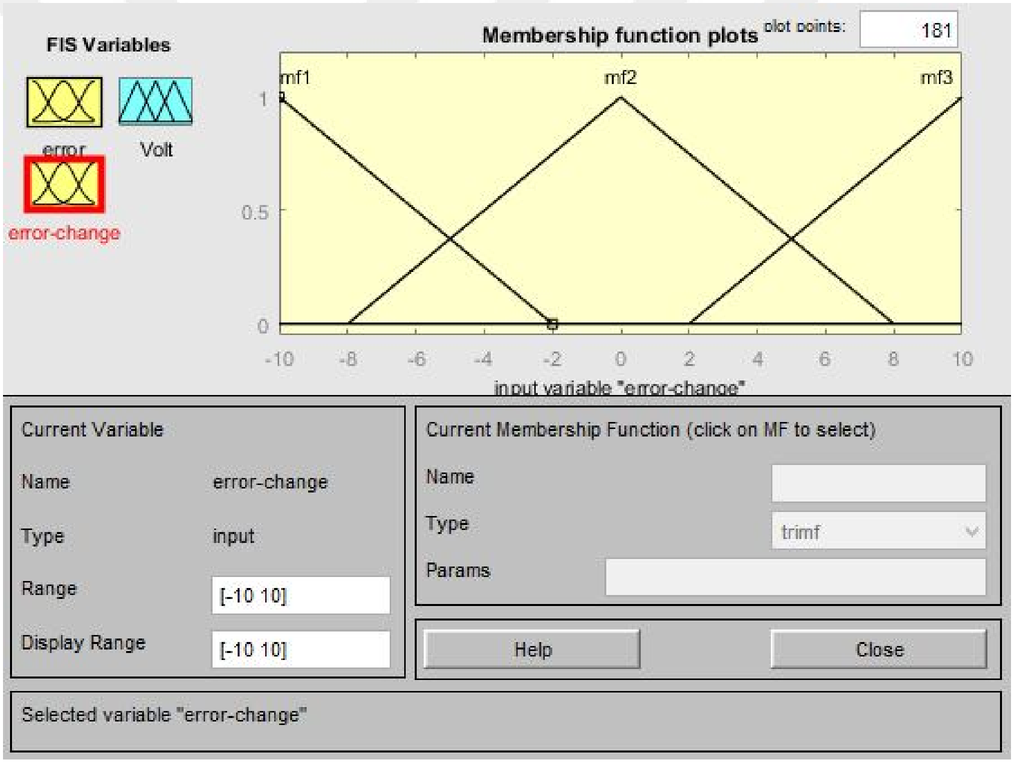


Şekil 5.4. Hata üyelik fonksiyonu girdisi

Bu çalışmada hata üyelik fonksiyonu girdisi olarak volt alındı. Aralıklar yörünge üzerinde yapılan ölçümlere göre belirlendi (Tablo 5.1.) ve bu aralık [-2 2] olarak seçildi.

Tablo 5.1. Hata üyelik fonksiyonu

Üyelik Fonksiyonu Giriş Aralıkları	Tanım	Tanıma Karşılık Gelen Genel İfade
[-2 -2 0]	mf1	Negatif
[-1.4 0 1.4]	mf2	Sıfır
[0 2 2]	mf3	Pozitif

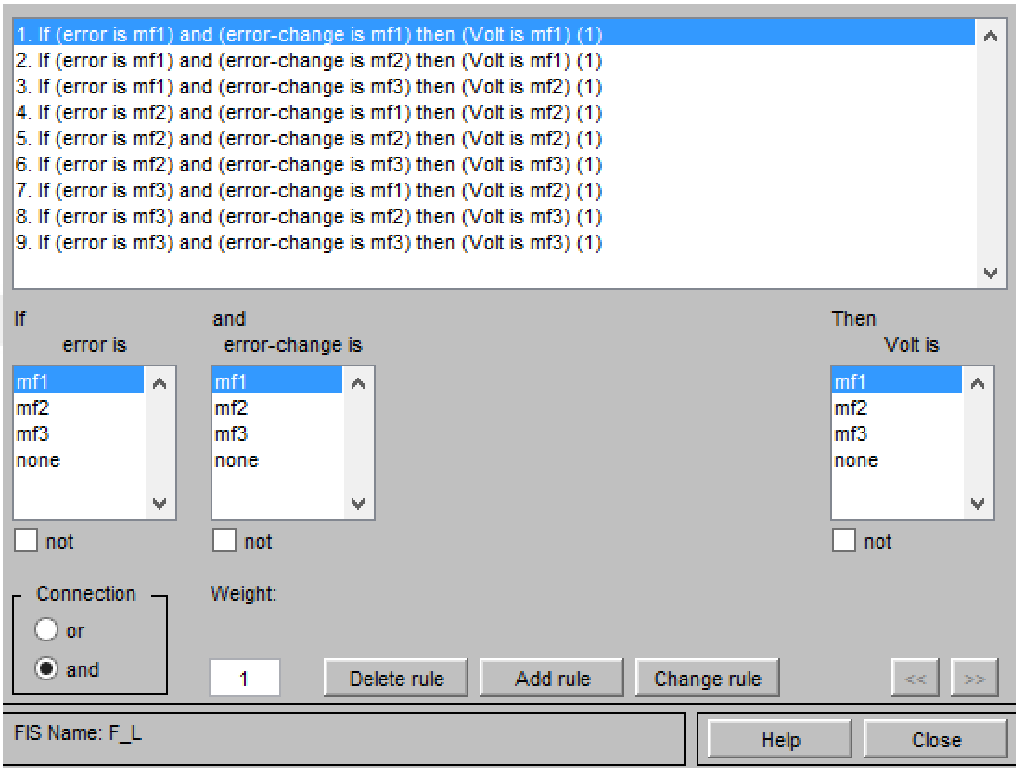


Şekil 5.5. Hata değişimi üyelik fonksiyonu girdisi

Bu çalışmada hata değişimi aralığı yörünge üzerinde yapılan ölçümlere göre belirlendi (Tablo 5.2.) ve bu aralık [-10 10] olarak seçildi.

Tablo 5.2. Hata değişimi üyelik fonksiyonu

Üyelik Fonksiyonu Giriş Aralıkları	Tanım	Tanıma Karşılık Gelen Genel İfade
[-10 -10 -2]	mf1	Negatif
[-8 0 8]	mf2	Sıfır
[2 10 10]	mf3	Pozitif

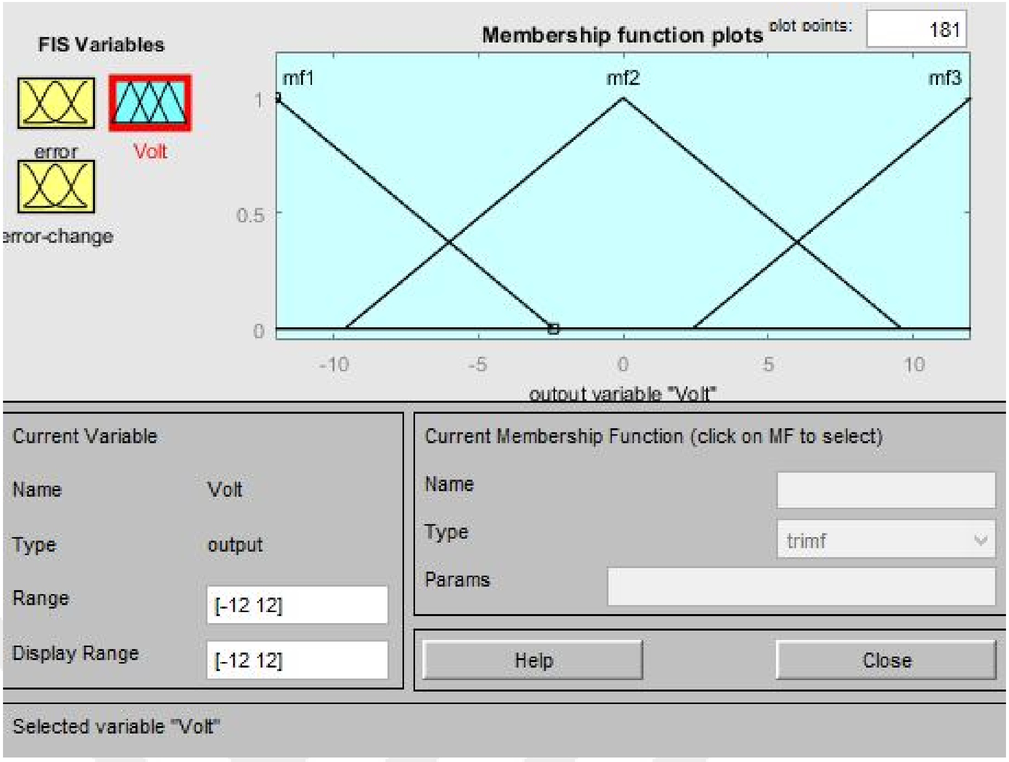


Şekil 5.6. Bulanık mantık kuralları

Şekil 5.6.' da belirtilen kurallar aşağıda belirtildi (Tablo 5.3.).

Tablo 5.3. Kural İlişkileri

ve		Hata Değişimi		
		Negatif	Sıfır	Pozitif
Hata	Negatif	*Negatif*	*Negatif*	*Sıfır*
	Sıfır	*Sıfır*	*Sıfır*	*Pozitif*
	Pozitif	*Sıfır*	*Pozitif*	*Pozitif*



Şekil 5.7. Çıktı üyelik fonksiyonu

Bu çalışmada çıktı aralığı sağlanabilen maksimum voltaja göre belirlendi (Tablo 5.4.) ve bu aralık [-12 12] olarak seçildi.

Tablo 5.4. Çıktı üyelik fonksiyonu

Üyelik Fonksiyonu Giriş Aralıkları	Tanım	Tanıma Karşılık Gelen Genel İfade
[-12 -12 -2.4]	mf1	Negatif
[-9.6 0 -9.6]	mf2	Sıfır
[2.4 12 12]	mf3	Pozitif

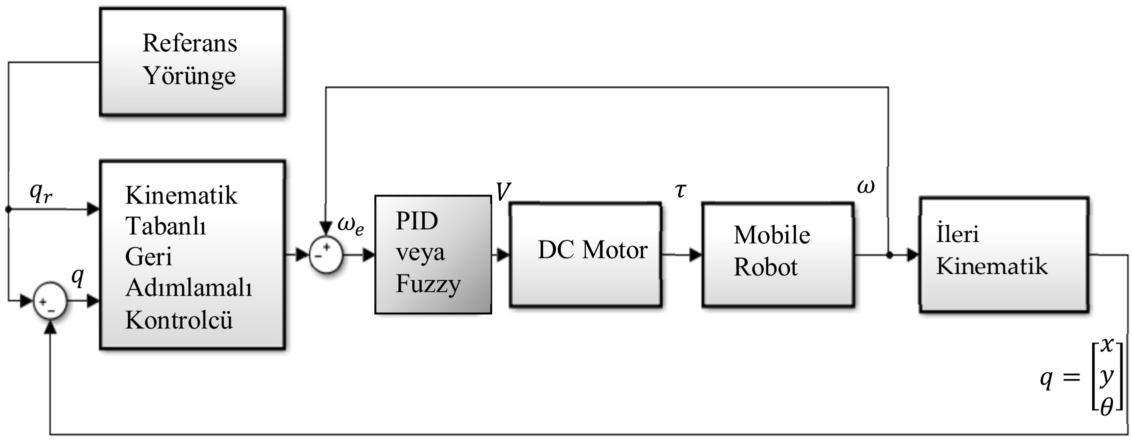
5.5. Sistem Simülasyonu

Mobil robotun simülasyonunda kullanılacak parametreler aşağıdaki tabloda verildi (Tablo 5.5.):

Tablo 5.5. Simülasyon Parametreleri

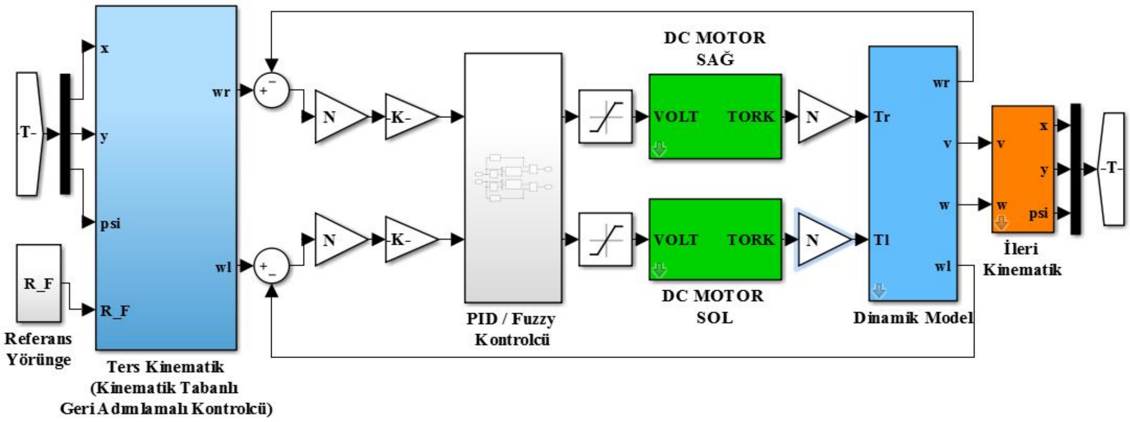
Robot			DC-Motor		
Terim	**Birim**	**Değer**	**Terim**	**Birim**	**Değer**
m_d	kg	27	$v(t)$	V	12
m_w	kg	0.5	$i(t)$	A	2.85
I_d	$kg * m^2$	0.732	R_a	Ω	1.01
I_w	$kg * m^2$	0.0025	L_a	$H = V * s/A$	$0.088 * 10^{-3}$
I_m	$kg * m^2$	0.0012	K_b	$V * s$	$12{,}939 * 10^{-3}$
d	m	0.05	K_t	$N * m/A$	$12{,}939 * 10^{-3}$
R	m	0.0975	τ	$N * m$	0.1537
L	m	0.164	$i(t)$	A	11.8
N	-	53	$\omega(t)$	rpm	6640

Elde edilen denklemler ve robotun gerekli parametreleri kullanılarak matlab/ simulink programı yardımıyla simülasyon gerçekleştirildi.

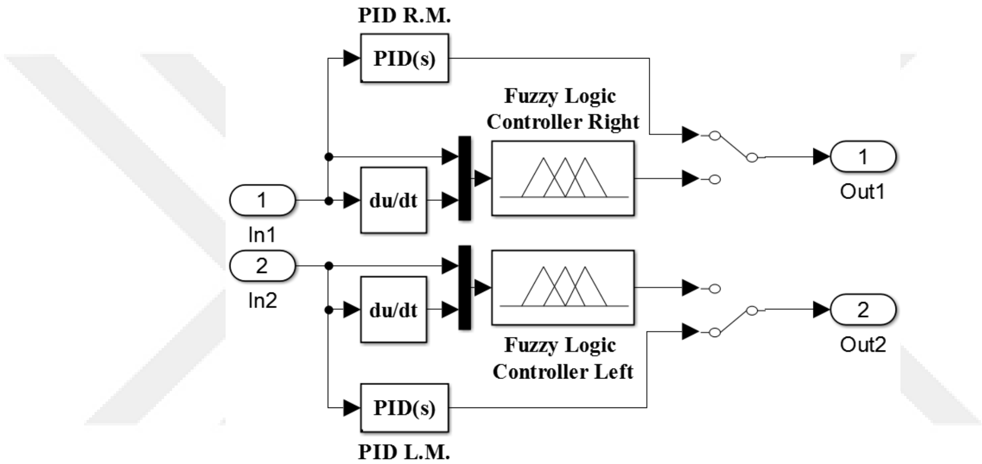


Şekil 5.8. Kontrol Blok diyagramı

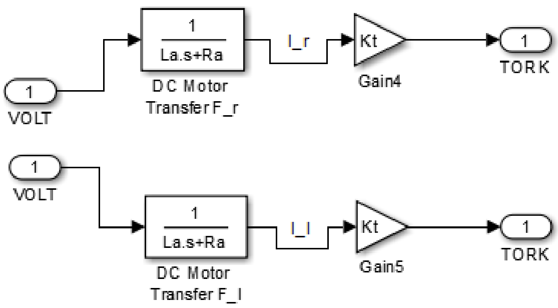
Şekil 5.8.' de gösterilen kontrol blok diyagramının simülasyon blok diyagramı halindeki gösterimi şekil 5.9.' da gösterildi.



Şekil 5.9. Simülasyon Blok diyagramı

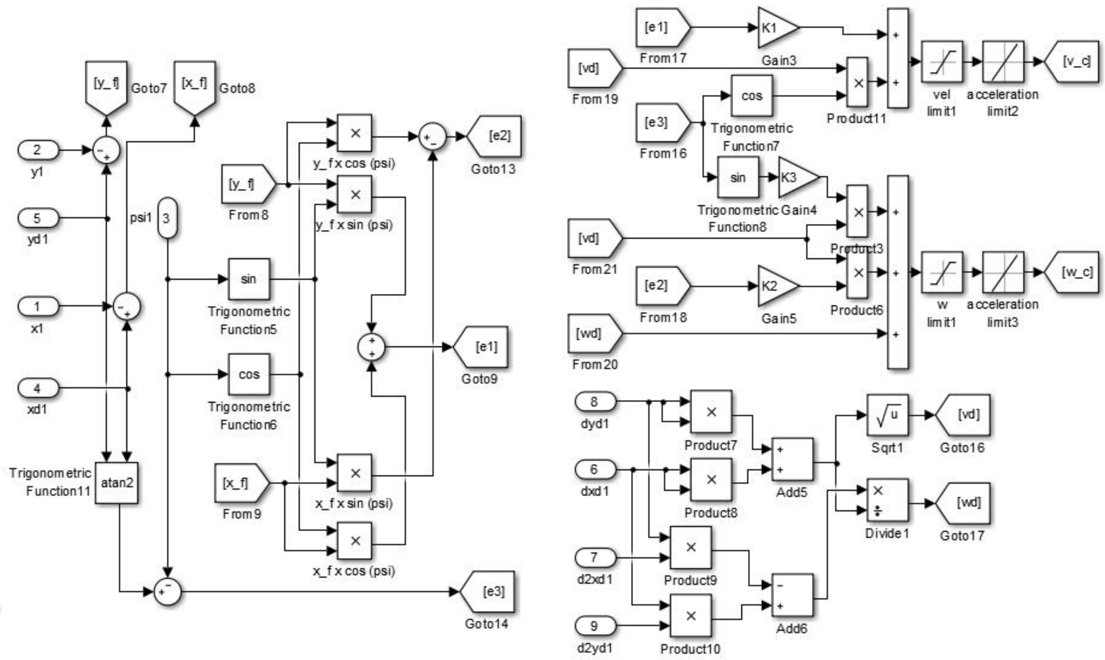


Şekil 5.10. PID kontrolcü ve BMK blok diyagramı

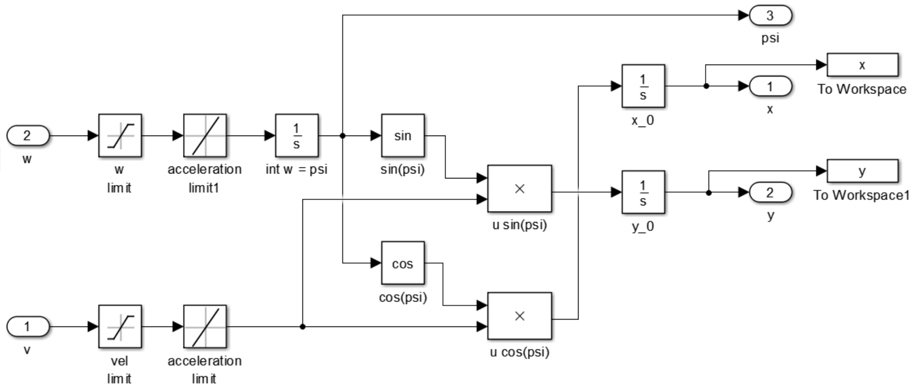


Şekil 5.11. DC motor sağ ve sol block diyagramı

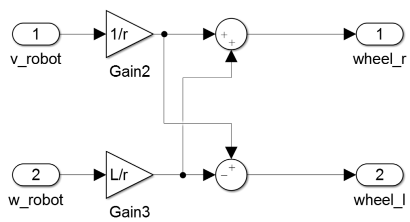
Şekil 5.10.' da BMK' ler ve PID kontrolcüler gösterildi. Sağ ve sol DC motorların blok diyagramı şekil 5.11.' de olduğu gibidir. Şekil 5.12.' de KTGK' nin blok diyagramı verildi.



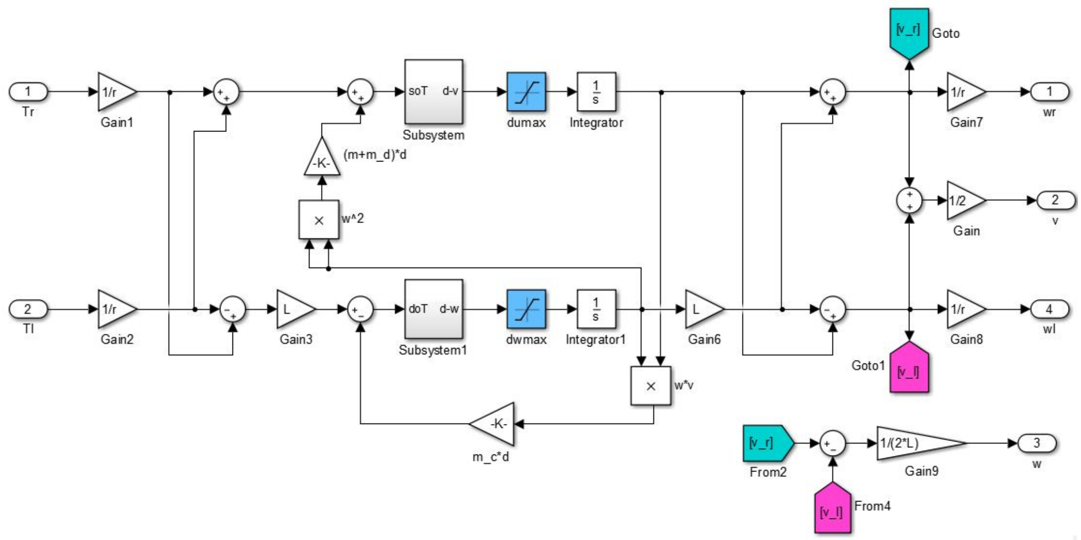
Şekil 5.12. KTGK blok diyagramı



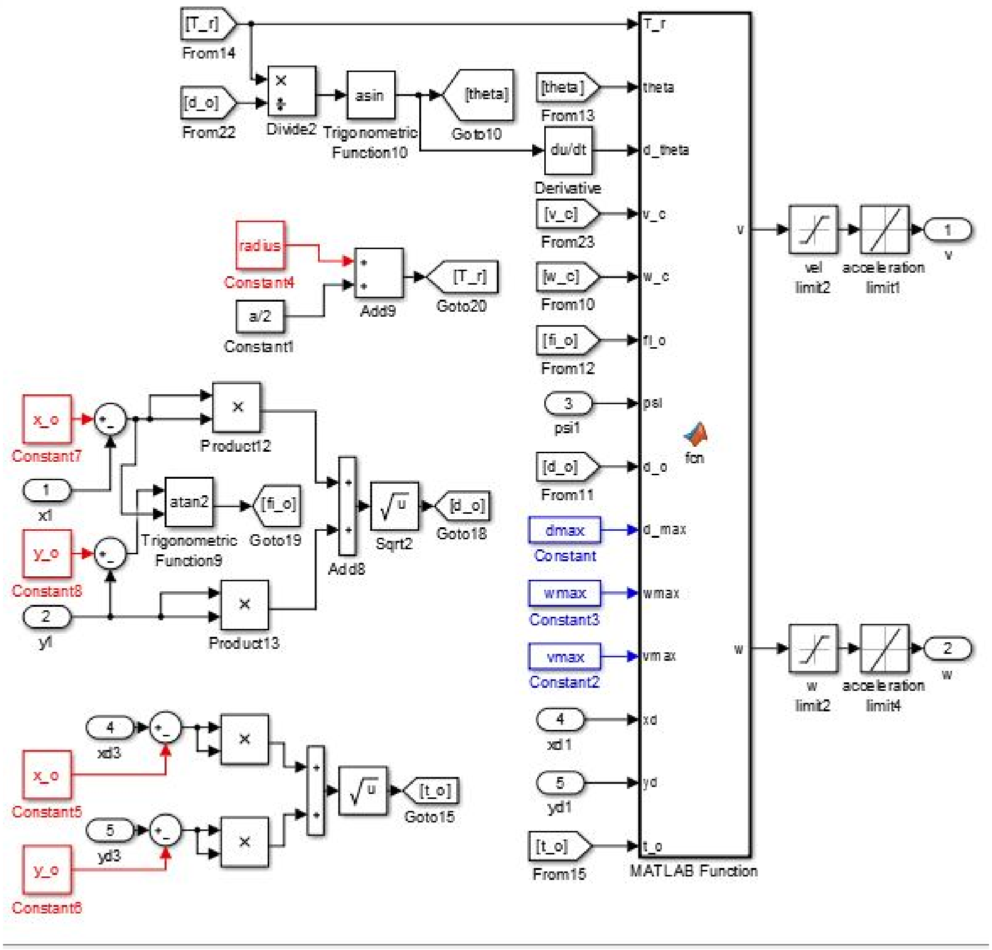
Şekil 5.13. İleri kinematik blok diyagramı



Şekil 5.14. Hız dönüşüm blok diyagramı



Şekil 5.15. Robot dinamiği blok diyagramı



Şekil 5.16. Engelden kaçma algoritması blok diyagramı

Şekil 5.13.' te ileri kinematik blok diyagramı, şekil 5.14.' te hız dönüşümü blok diyagramı, şekil 5.15.' te robot dinamiği blok diyagramı, şekil 5.16.' da engelden kaçma algoritması blok diyagramı gösterildi.

5.5.1. Kontrolcü parametrelerinin belirlenmesi

Kinematik tabanlı geri adımlamalı kontrolcünün parametre değerleri denenerek bu çalışmada kare ve daire Şekilleri için $K_x = 0.3685, K_y = 49, K_\theta = 0.3685$ olarak ve sekiz şekli için $K_x = 0.7, K_y = 78, K_\theta = 0.7$ olarak belirlendi.

PID kontrolcü içinse deneme yapılarak $K_p = 10, K_i = 1, K_d = 1$ değerleri seçilmiştir. Fuzzy (bulanık) kontrolcü ise Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12 gösterildiği gibi tasarlandı.

Kontrolcüde uygulanacak kısıtlar; doğrusal hız için $v_{max} = \pm 1.2\, m/s$, açısal hız için: $\omega_{max} = \pm 1.65\, rad/s$, doğrusal ivmelenme için $a_{max} = \pm 1\, m/s$, açısal ivmelenme için $\alpha_{max} = \pm 1.5\, m/s$ şeklinde belirlendi. Simülasyon zamanları herbir simülasyondan önce belirtildi. Ayrıca başlangıç doğrusal ve açısal hızları 0 kabul edildi. Kare ,daire ve sekiz şekilli yörüngeler sırasıyla (5.27-29) denklemlerinde belirtildi. Yörüngelerin merkezlerinin konumu (0,0) olarak belirlendi.

Kare şekilli yörünge denklemi;

$$k * abs(\sin(w * t)) * \sin(w * t) + k * abs(\cos(w * t)) * \cos(w * t) \quad (5.27)$$

Daire şekilli yörünge denklemi;

$$k * \sin(w * t) + k * \cos(w * t) \quad (5.28)$$

Sekiz şekilli yörünge denklemi;

$$k \sin(wt) + k * \sin(2wt) \quad (5.29)$$

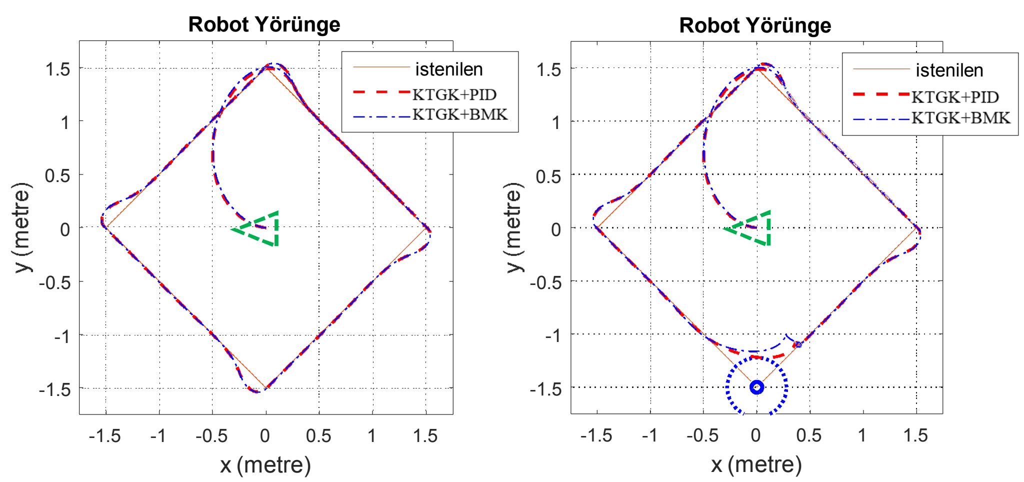
(4.27-29) denklemlerinde; t zamanı, w yörüngenin açısal hızını, k ise ölçek fatörünü ifade eder. Ölçek faktörü bu çalışma için metre cinsinden yörüngenin sınırlarıdır.

6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

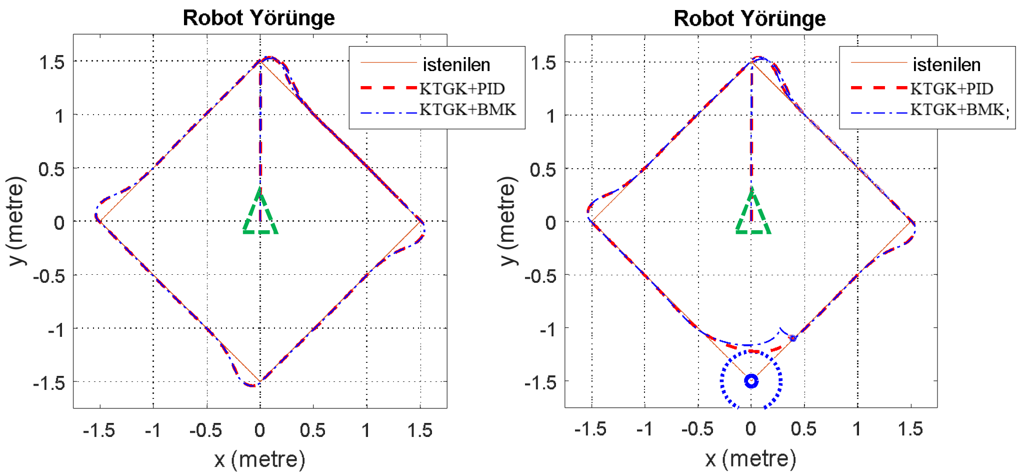
Simülasyonu yapılan sistem ve parametreleri Bölüm 3 ve 4’ te verildi. Simülasyonda kullanılan kontrolcü parametreleri dışındaki parametreler; simülasyon zamanı, yörünge açısal hızı, engelin konumu ve çapı, robotun konumu ve açısı, seçili zamandaki yörünge noktası ve engel arasındaki tepki mesafesidir. Bu çalışmada bunlardan bazıları sabit alınıp diğerleri değiştirilerek çıkan sonuçlara göre karşılaştırma yapıldı. Seçili zamandaki yörünge noktası ve engel arasındaki tepki mesafesi simülasyon zamanının bir fonksiyonudur. Bu durum simülasyon sonuçları sonrası değerlendirildi. Kontrolcülerin kıyaslamasında bu çalışma için kullanılan tanımlar; yerleşme zamanı sistem cevabının %98’ine ulaşıncaya kadar geçen süreyi, yükselme zamanı sistem cevabının %90’ ına ulaşıncaya kadar geçen süreyi ifade etmektedir. Aşım yörüngeye olan dik uzaklığı ifade etmektedir.

6.1. Kare Şekilli Yörüngede Simülasyon

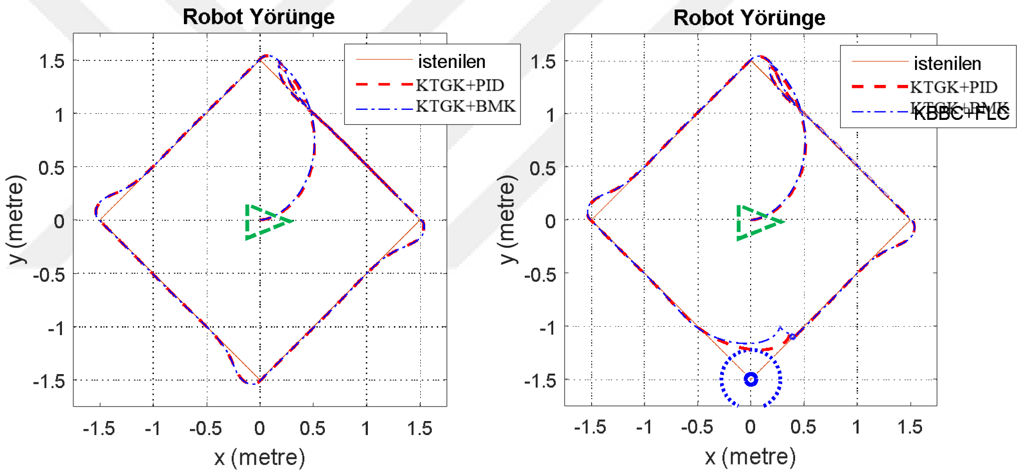
Şekil 6.1-3. için engel çapı 0.05 metre, simülasyon zamanı t = 300 saniye, yörünge için açısal hız w = 0.025 rad/s, ölçek faktörü k = 1.5 metre, seçili zamandaki yörünge noktası ve engel arasındaki tepki mesafesi 0.2 metre ve her şekil için engelin konumu ise olarak tanımlanmıştır. Başlangıç pozisyonları sırasıyla [0, 0, pi], [0, 0, pi/2], [0, 0, 0] olarak tanımlanmıştır.



Şekil 6.1. Başlangıç pozisyonu [0, 0, pi] 300saniye, 0.2metre

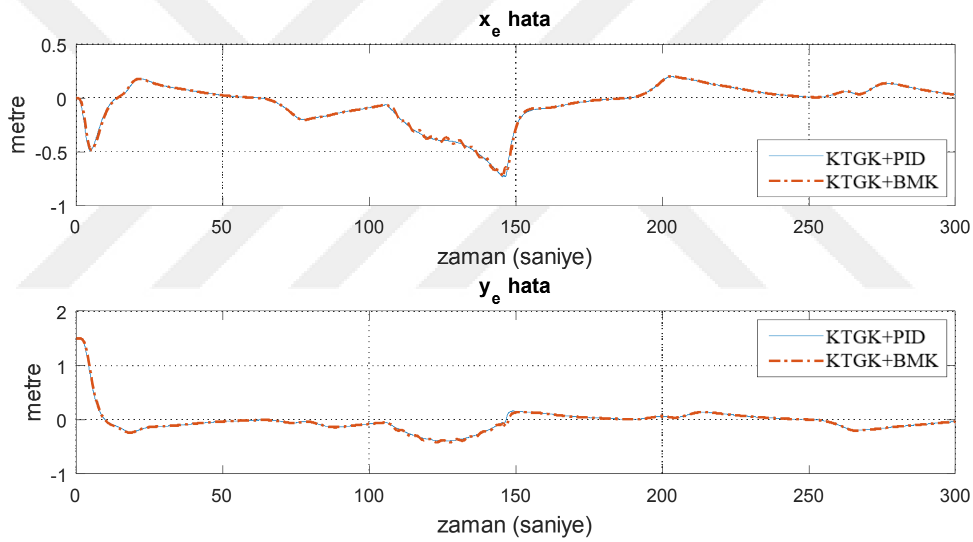


Şekil 6.2. Başlangıç pozisyonu [0, 0, pi/2] 300saniye, 0.2 metre

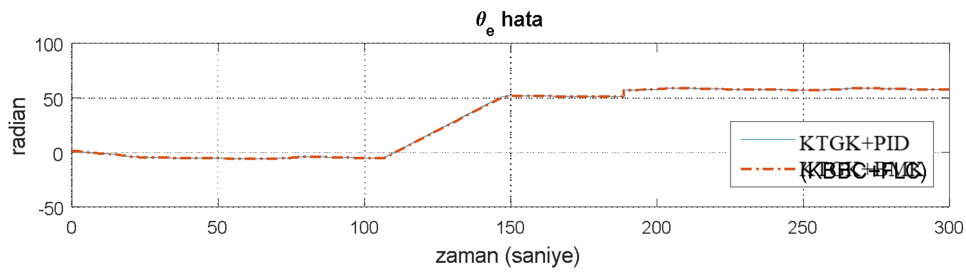


Şekil 6.3. Başlangıç pozisyonu [0, 0, 0] 300saniye, 0.2 metre

Kare şekilli yörüngede üç farklı başlangıç durumunda (Şekil 6.1-3.) görülen simülasyon sonuçlarına göre KTGK + PID kontrolcü ve KTGK + bulanık mantık kontrolcünün yerleşme zamanları ve maksimum aşımları birbirlerine yakın olduğu görüldü ve bu yüzden daire şekilli yörüngedeki değerler karşılaştırıldı. Her iki kontrolcüde engele yaklaşık 0,28 metre kala engelden kaçma algoritması gereği yörünge engelin içinden geçtiği sırada robot kendi eksenine yakın bir eksen etrafında dönüp, yörünge engel dışına çıktığında KTGK + PID kontrolcü için (0.3635, -1.069) noktası ve KTGK + BMK için (0.2689,-0.9969) noktasına (şekilde engel önünde görülen sivri kısım) gelerek tekrar yörüngeyi takibe başladığı görüldü. Bu verilerden yola çıkarak simülasyonlarda KTGK + bulanık mantık kontrolcünün engelden kaçarken göstermiş olduğu daha keskin ve yumuşak olmayan hareketlerde bulunduğu gözlemlendi. Daha detaylı bir inceleme için Şekil 6.3.' deki simülayonun engel bulunduğu durumdaki hataları şekil 6.4-5. gösterildi. Şekil 6.4-5.' te 107-146 saniyeleri arasında robot kendi eksenine yakın bir eksen etrafında yapmış olduğu dönme hareketleri ve yörünge engel dışına çıktığında yapmış olduğu manevra gözlemlenebilir. Şekil 6.5.' te bu açısal hatanın artması gibi görünmekte fakat her 2π radyan devirde aynı istikamete yönelmektedir. Benzer durum 188. saniyede de köşeyi dönmesi esnasında açısal hatada ani dikey bir yükseliş olarak görülmektedir. Robotun engeli aştıktan sonra 152. saniyede hem KTGK + PID kontrolcü hem de KTGK + BMK için yörüngeye yerleştiği görülmektedir.



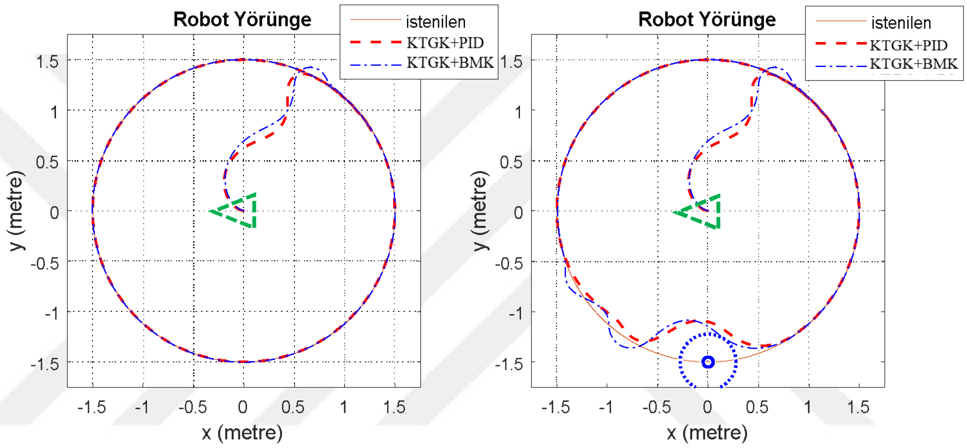
Şekil 6.4. Doğrusal hatalar



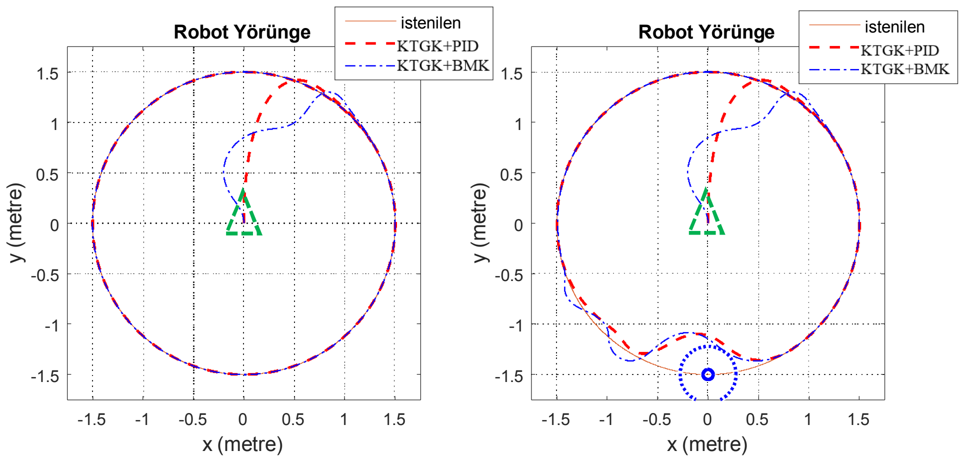
Şekil 6.5. Açısal hatalar

6.2. Daire Şekilli Yörüngede Simülasyon

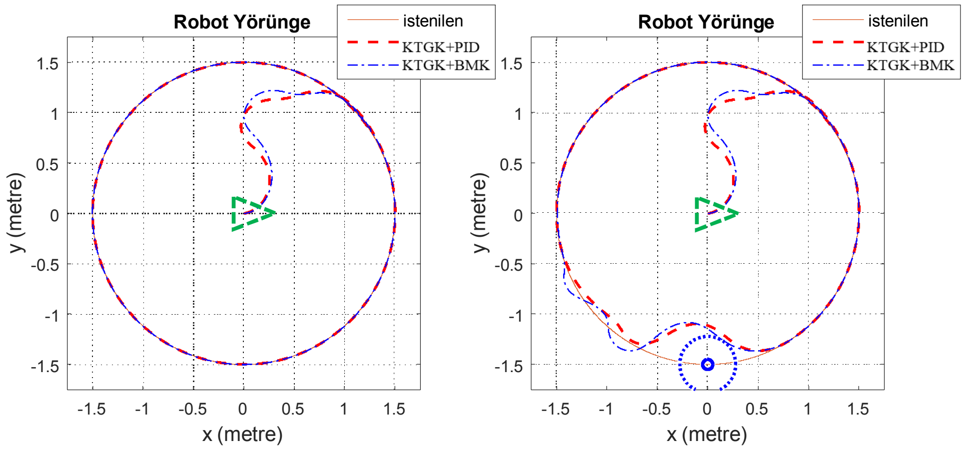
Şekil 6.6 – 8. için engel çapı 0.05 metre, simülasyon zamanı t = 75 saniye, yörünge için açısal hız w = 0.1 rad/s, ölçek faktörü k = 1.5 metre, seçili zamandaki yörünge noktası ve engel arasındaki tepki mesafesi 0.3 metre ve her şekil için engelin konumu ise (0, -1.5) olarak tanımlandı. Balangıç pozisyonları sırasıyla [0, 0, pi], [0, 0, pi/2], [0, 0, 0] olarak tanımlandı. Üç farklı başlangıç konumunda gerçekleştirilen ve Şekil 6.6-8.' da sonuçlarını gördüğümüz simülasyonlarda KTGK+PID kontrolcünün yerleşme süresinin daha kısa olduğu görüldü.



Şekil 6.6. Başlangıç pozisyonu [0, 0, pi], 75 saniye, 0.3 metre



Şekil 6.7. Başlangıç pozisyonu [0, 0, pi/2], 75 saniye, 0.3 metre



Şekil 6.8. Başlangıç pozisyonu [0, 0, 0], 75 saniye, 0.3 metre

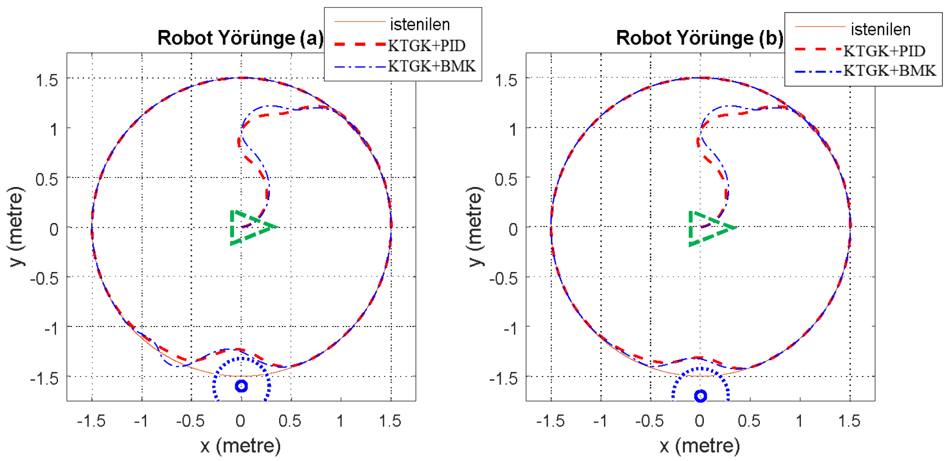
Robotun (0, 0, pi) konumundan (şekil 6.6.) yörüngeye olan hareketinde sırasıyla KTGK+PID ve KTGK+BMK için yükselme zamanı =5,44 saniye ve 5,30 saniye , yerleşme zamanı = 6,12 saniye ve 8,37 saniye, maksimum aşım = 0,0032 metre ve 0,0856 metre olduğu görüldü.

Robotun (0, 0, pi/2) konumundan (şekil 6.7.) yörüngeye olan hareketinde sırasıyla KTGK+PID ve KTGK+BMK için yükselme zamanı =3,57 saniye ve 6,65 saniye , yerleşme zamanı = 7,26 saniye ve 10,27 saniye, maksimum aşım = 0,0402 metre ve 0,0755 metre olduğu görüldü.

Robotun (0, 0, 0) konumundan (şekil 6.8.) yörüngeye olan hareketinde sırasıyla KTGK+PID ve KTGK+BMK için yükselme zamanı =6,50 saniye ve 6,86 saniye , yerleşme zamanı = 7,68 saniye ve 8,01 saniye, maksimum aşım = 0,0182 metre ve 0,0137 metre olduğu görüldü.

Ayrıca bu üç durumda (Şekil 6.6-8) sırasıyla KTGK+PID ve KTGK+BMK için sürekli hal aşımının +/-0,0004 metre ve +0,0014 metre civarlarında olduğu görüldü.

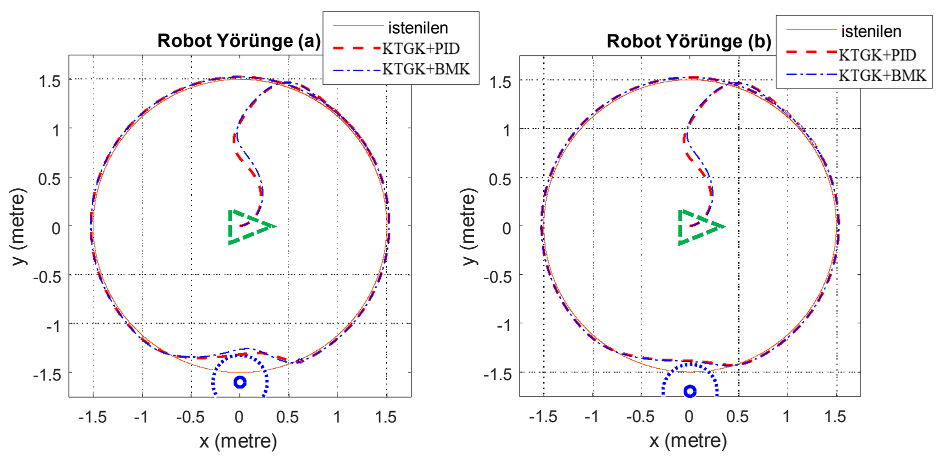
Şekil 6.9. için engel çapı 0.05 metre, simülasyon zamanı t = 75 saniye, yörünge için açısal hız w = 0.1 rad/s, ölçek faktörü k = 1.5 metre, seçili zamandaki yörünge noktası ve engel arasındaki tepki mesafesi (a) için 0.17 metre ve (b) için 0.13 metredir. Bu şekil için engelin konumu ise (a) için (0, -1.6) ve (b) için (0, -1.7) olarak tanımlandı. Balangıç pozisyonu (a) ve (b) için [0, 0, 0] olarak tanımlandı.



Şekil 6.9. Başlangıç pozisyonu [0, 0, pi], 75 saniye, (a) 0.17 metre (b) 0.13 metre

Şekil 6.9.' de engelin konumu yörünge merkezinin dışına sırasıyla 0.1 ve 0.2 metre kaydırılarak ((a) için (0,-1.6) noktası, (b) için (0,-1.7))sonuçlar incelendi. Engelin takip edilen yörüngeden uzaklaşması, beklenildiği gibi yerleşme zamanı ve maksimum aşımın her iki kontrolcü içinde azalması ile sonuçlandı.

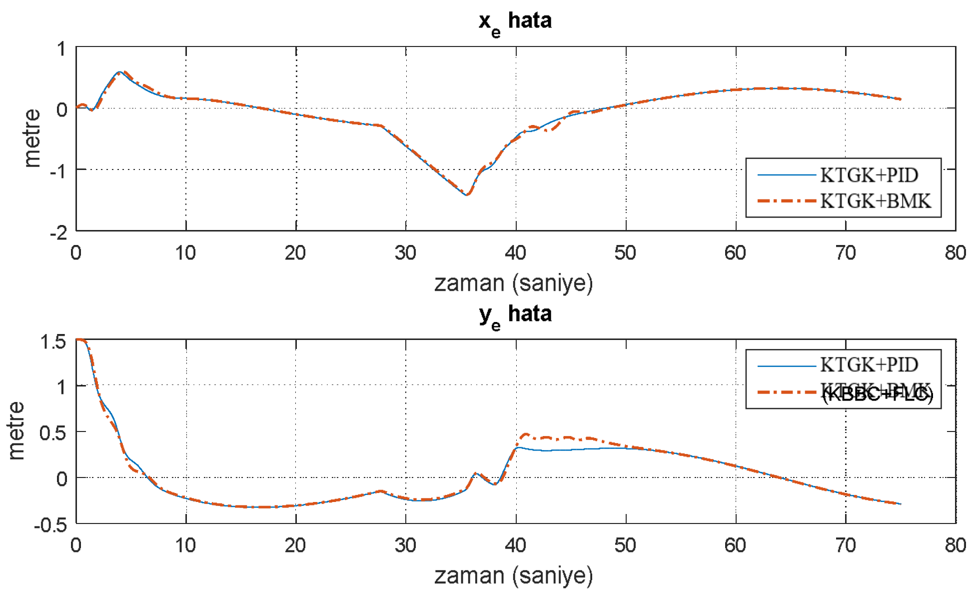
Şekil 6.10. için engel çapı 0.05 metre, simülasyon zamanı t = 150 saniye, yörünge için açısal hız w = 0.05 rad/s, ölçek faktörü k = 1.5 metre, seçili zamandaki yörünge noktası ve engel arasındaki tepki mesafesi (a) için 0.2 metre ve (b) için 0.3 metredir. Bu Şekil için engelin konumu ise (a) için (0, -1.6) ve (b) için (0, -1.7) olarak tanımlandı. Balangıç pozisyonu (a) ve (b) için [0, 0, 0] olarak tanımlandı.



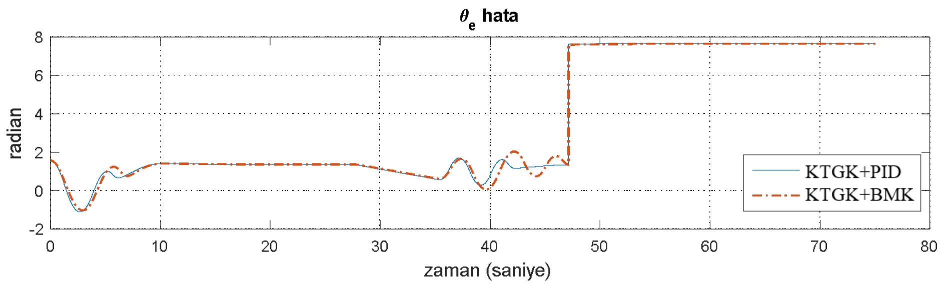
Şekil 6.10. Başlangıç pozisyonu [0, 0, pi], 150 saniye,(a) 0.2 metre (b) 0.3 metre

Şekil 6.10., Şekil 6.9.’ den farklı olarak yörünge süresi iki katına çıkarıldı ve yine beklenildiği üzere yerleşme süresinin ve maksimum aşımın her iki kontrolcü içinde azalması ile sonuçlandı fakat artan süre ile birlikte kalıcı durum aşımının ve hatanın arttığı gözlemlendi. Yörünge dolanım zamanının 150 saniye olduğu durumda (Şekil 6.10.) kalıcı durum aşımı her iki kontrolcü için 0.024 metre ve yörünge dolanım zamanı 75 saniye olduğu durumda (Şekil 6.9.) KTGK+BMK için 0.001 metre, KTGK+PID kontrolcü için 0.0001 metredir. Bu durum kabul edilen sınırlar dışına çıktığı takdirde KTGK kontrolcünün bir önceki simülayona göre kazanç değerlerinin tekrar ayarlanmasını gerektirmektedir. Şekil 6.6-8. de engelle karşılaştıktan sonra KTGK + BMK için maksimum aşım 0.0697 metre ve KTGK + PID kontrolcü için ise -0.0881 metre oldu.

Daha detaylı bir inceleme için şekil 6.8.’ deki simülayonun engel bulunduğu durumdaki hataları şekil 6.11-12. gösterildi.Robotun (şekil 6.8.) engelden kaçma hareketinde sırasıyla KTGK+PID ve KTGK+BMK için yerleşme zamanının 44,35 saniyede ve 46,14 saniyede, yükselme zamanının 39,42 saniyede ve 39,53 saniyede olduğu, maksimum aşımın ise 41,82. saniyede -0,0881 metre ve 41,02. saniyede 0,0977 metre olduğu görüldü. Robotun engelden kaçma için tepki vermeye 27,6. saniyede başlayıp 50. saniyede normal yörüngesine oturduğu görüldü (şekil 6.11-12.).



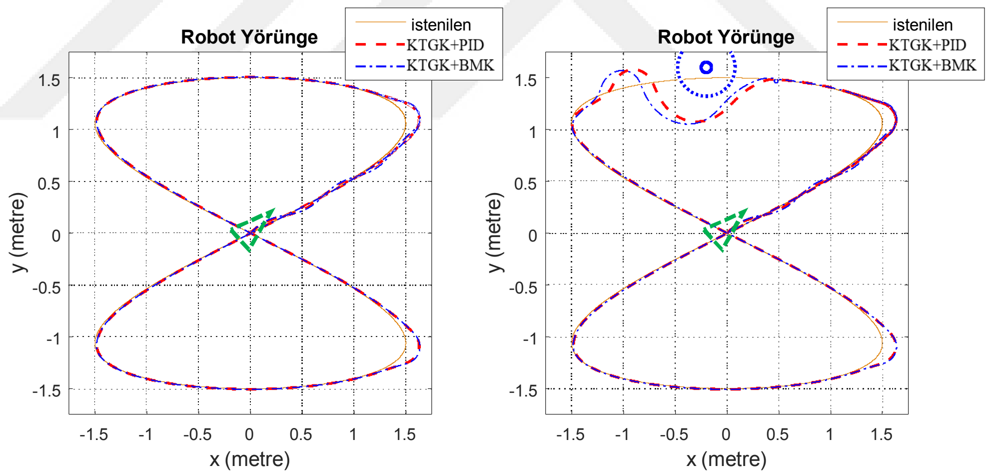
Şekil 6.11. Doğrusal hatalar



Şekil 6.12. Açısal hatalar

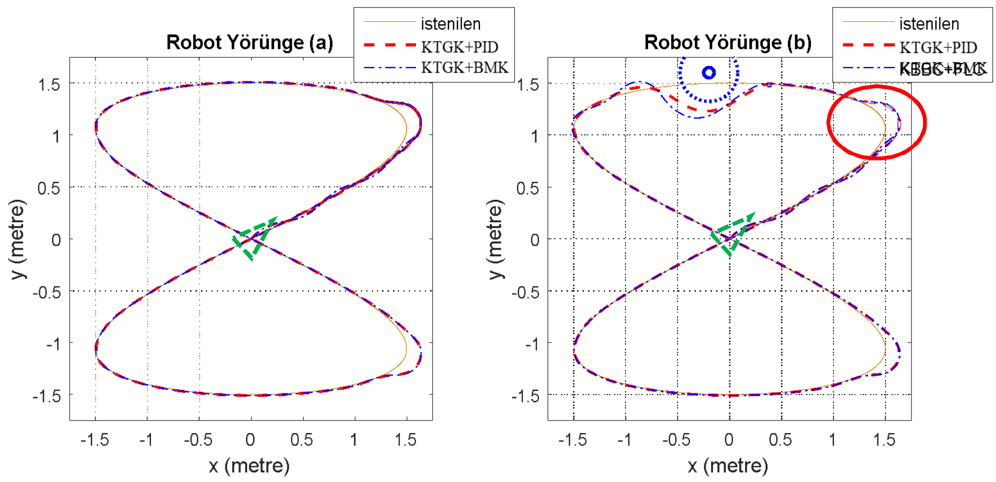
6.3. Sekiz Şekilli Yörüngede Simülasyon

Şekil 6.13. için engel çapı 0.05 metre, simülasyon zamanı t = 150 saniye, yörünge için açısal hız w = 0.05 rad/s, ölçek faktörü k = 1.5 metre, seçili zamandaki yörünge noktası ve engel arasındaki tepki mesafesi 0.2 metre ve engelin konumu (-0.2, 1.6) olarak tanımlandı. Balangıç pozisyonu ise [0, 0, pi/4] olarak tanımlandı.



Şekil 6.13. Başlangıç pozisyonu [0, 0, pi/4], 150 saniye, 0.2 metre

Şekil 6.14. için engel çapı 0.05 metre, simülasyon zamanı t = 300 saniye, yörünge için açısal hız w = 0.025 rad/s, ölçek faktörü k = 1.5 metre, seçili zamandaki yörünge noktası ve engel arasındaki tepki mesafesi 0.2 metre ve engelin konumu (-0.2, 1.6) olarak tanımlandı. Balangıç pozisyonu ise [0, 0, pi/4] olarak tanımlandı.



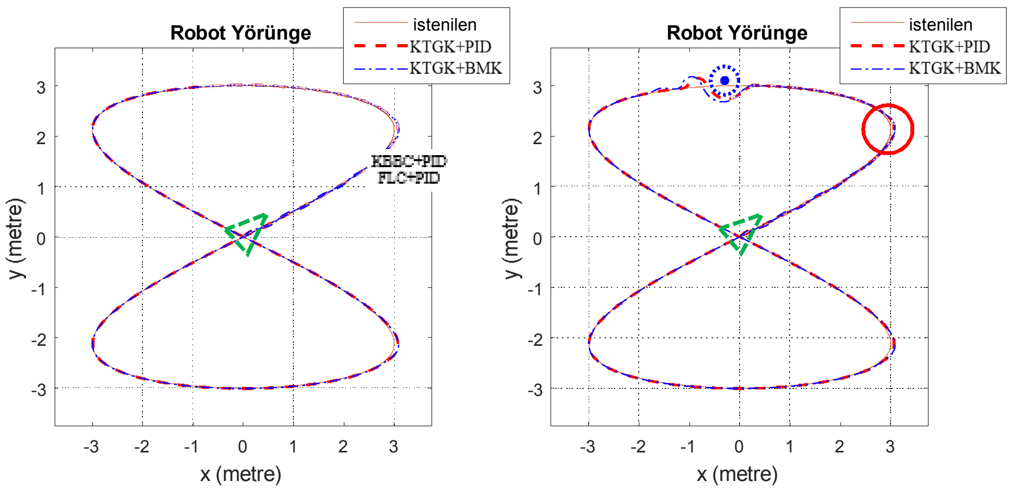
Şekil 6.14. Başlangıç pozisyonu [0, 0, pi/4], 300 saniye, 0.2 metre

Daire şekilli yörüngede olduğu gibi sekiz şekilli yörüngede de artan simülasyon zamanı ile yerleşme süresinin ve maksimum aşımların her iki kontrolcü içinde azalması ile sonuçlandı (şekil 6.13., şekil 6.14.).

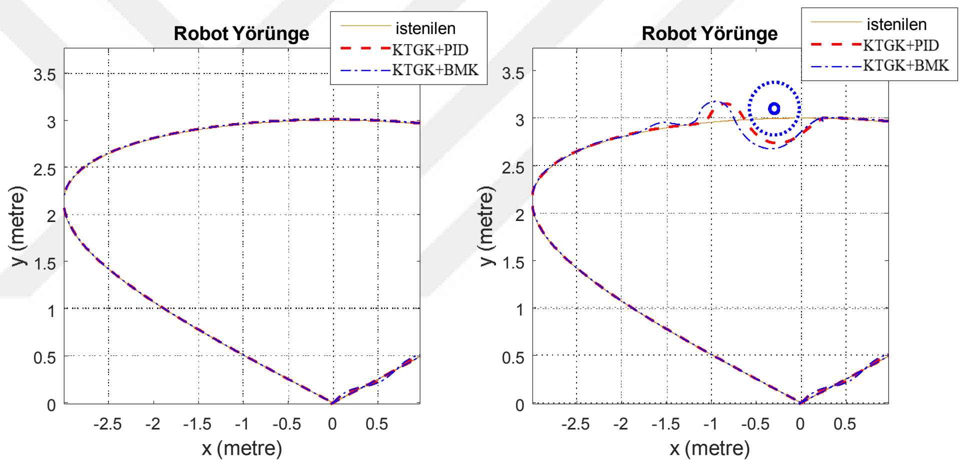
Şekil 6.13' te simülasyonun engel bulunduğu durumda robotun engelden kaçma hareketinde KTGK+PID ve KTGK+BMK için sırasıyla yerleşme zamanının 47,69 saniyede ve 48,34 saniyede, yükselme zamanının 39,94 saniyede ve 40,37 saniyede olduğu ve maksimum aşımların ise 40,94. saniyede 0,155 metre ve 41,70. saniyede 0,171 metre olduğu görüldü.

Şekil 6.14' te simülasyonun engel bulunduğu durumda(Şekil 6.14(b)) robotun engelden kaçma hareketinde KTGK+PID ve KTGK+BMK için sırasıyla yerleşme zamanının 75,82. saniyede ve 75,96. saniyede, yükselme zamanının her ikisi içinde 80-81. saniyeler arasında olduğu görüldü. Maksimum aşımların ise 77.48. saniyede 0,033 metre ve 77,40. saniyede 0,085 metre olduğu görüldü.

Şekil 6.15 ve Şekil 6.16 için engel çapı 0.05 metre, simülasyon zamanı t = 400 saniye, yörünge için açısal hız w = 0.02 rad/s, ölçek faktörü k = 3 metre, seçili zamandaki yörünge noktası ve engel arasındaki tepki mesafesi 0.12 metre ve engelin konumu (-0.3, 3.1) olarak tanımlandı. Başlangıç pozisyonu ise [0, 0, pi/4] olarak tanımlandı.



Şekil 6.15. Başlangıç pozisyonu [0, 0, pi/4], 400 saniye, 0.12 metre



Şekil 6.16. Şekil 6.15.’ nin büyütülmüş hali

Şekil 6.15-16.’ da yapılan simülasyonlarda ölçek faktörünün büyümesi ile engele çarpmamak için robot ve engel arasındaki mesafenin katsayı olarak kullanıldığı engelden kaçış algoritmasında bu katsayıyı 2’ ye bölerek şartlara uygunluğu sağlandı. Seçili zamandaki yörünge noktası ve engel arasındaki tepki mesafesi, Şekil 6.15-16.’ da yapılmış olan simülasyonlardan da anlaşılacağı gibi ölçek faktörü ile ters orantılı olarak davranmaktadır. Ayrıca önerilen kontrolcülerin ölçek faktörünün artması ile yörünge takibindeki etkinliğinin arttığı şekil 6.14 ve şekil 6.15.’de kırmızı daire ile gösterildi. Kırmızı daire içine alınan aşımlar şekil 6.14’.te 36. ve 37. saniyeler arasında sırasıyla KTGK+PID ve KTGK+BMK için 0,14 metre ve 0,15 metre; aşımın ölçek faktörünün artmasıyla (Şekil 6.15-16.) sırasıyla KTGK+PID için 41,9.-42,0. ve KTGK+BMK için

40,5.-40,6. saniyelerde 0,08 metre ve 0,09 metre olduğu görüldü. Daha detaylı bir inceleme için Şekil 6.14.(b)' de gerçekleştirilmiş simülasyondaki kontrolcülerin; doğrusal ve açısal hızlarının sağ ve sol DC motor torklarının, x ve y koordinatlarındaki hatalarının, açısal hatalarının, karşılaştırması Şekil 6.17-22.' de gösterildi.

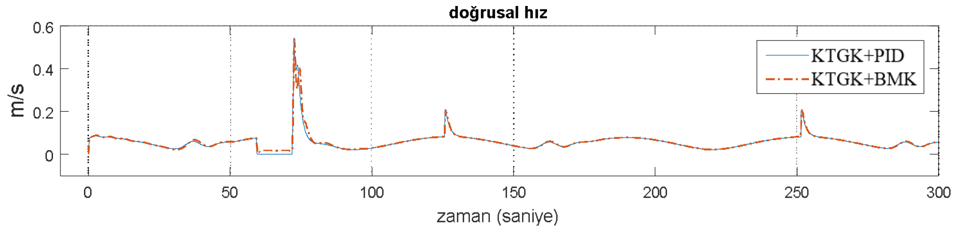
Şekil 6.20.' de KTGK+PID için 0,02. saniyede tork değeri 0,1537 Nm, 59,28. saniyede tork değeri -0,0179 Nm, 125,7. saniyede tork değeri 0,0486 Nm, 251,3. saniyede tork değeri 0,1046 Nm ve robotun engelle karşılaştıktan sonra 71,91. saniyede tork değeri 0,0507 Nm olarak sağ DC motor tork değerlerinin tepe noktaları gözlemlendi. Seçilen motorda 0,1537 Nm anlık maksimum tork 0,0346 Nm ise sürekli maksimum tork değeridir. KTGK+BMK içinse sağ DC motorda tork değerinde robotun manevraları gereği tepe noktaları görülmekle birlikte sürekli maksimum tork değeri(0,0346 Nm) dışına çıkmamaktadır.

Şekil 6.19.' da KTGK+PID için 0,02. saniyede tork değeri 0,1537 Nm, 59,28. saniyede tork değeri -0,0342 Nm, 125,7. saniyede tork değeri 0,0477 Nm, 251,3. saniyede tork değeri 0,1059 Nm, robotun engelle karşılaştıktan sonra 71,91. saniyede tork değeri 0,0297 Nm ve 72,46. saniyede tork değeri 0,0303 Nm olarak sol DC motor tork değerlerinin tepe noktaları gözlemlendi. Seçilen motorda 0,1537 Nm anlık maksimum tork 0,0346 Nm ise sürekli maksimum tork değeridir. KTGK+BMK içinse 59,36. saniyede tork değeri 0,0700 Nm görülmekle birlikte sürekli maksimum tork değeri(0,0346 Nm) dışına çıktığı ve hemen ardından 59,34. saniyede -0.0166 Nm olduğu görüldü. 125,80. saniyede tork değeri 0,0163 Nm, 251.50. saniyede tork değeri 0,0163 Nm ve robotun engelle karşılaştıktan sonra 72,50. saniyede tork değeri 0,0272 Nm olarak sol DC motor tork değerlerinin tepe noktaları gözlemlendi

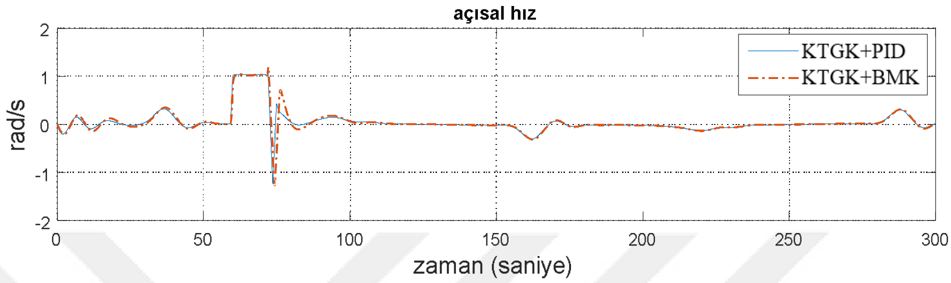
Şekil 6.17.' de robot engelle karşıştıktan sonra KTGK+PID için 72,47. saniyede 0,544 m/s ve KTGK+BMK içinse 72,63. saniyede 0,5446 m/s olarak bu yörüngedeki en yüksek doğrusal hızına ulaştığı görüldü.

Şekil 6.18.' de robot engelle karşıştıktan sonra KTGK+PID için 71,98. saniyede 1,129 rad/s ve hemen ardından 73,65. saniyede -1,246 rad/s; KTGK+BMK içinse 72,15. saniyede 1,195 rad/s ve hemen ardından 74,21. saniyede -1,27 rad/s olarak bu yörüngedeki en yüksek açısal hızına ulaştığı görüldü.

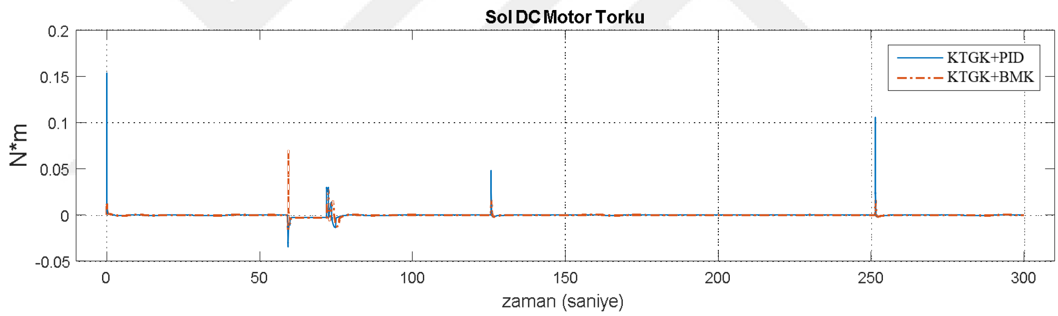
Şekil 6.21-22. 'de yukarıda bahsedilen tepe noktaları ve zaman aralıkları doğrusal ve açısal hatalarda da görülmektedir.



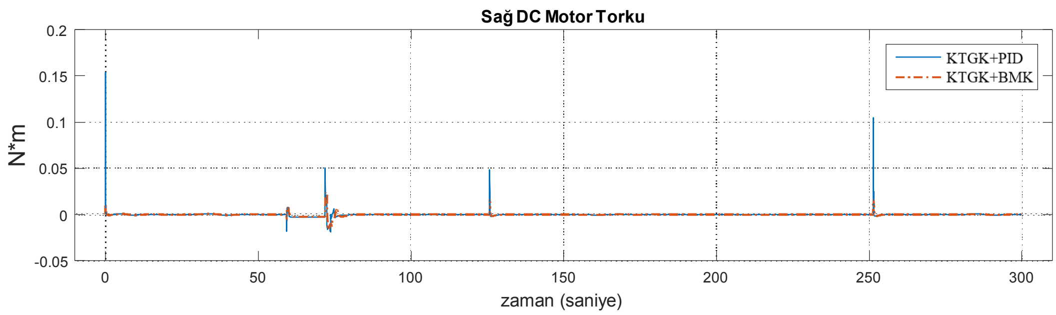
Şekil 6.17. Doğrusal hız hataları



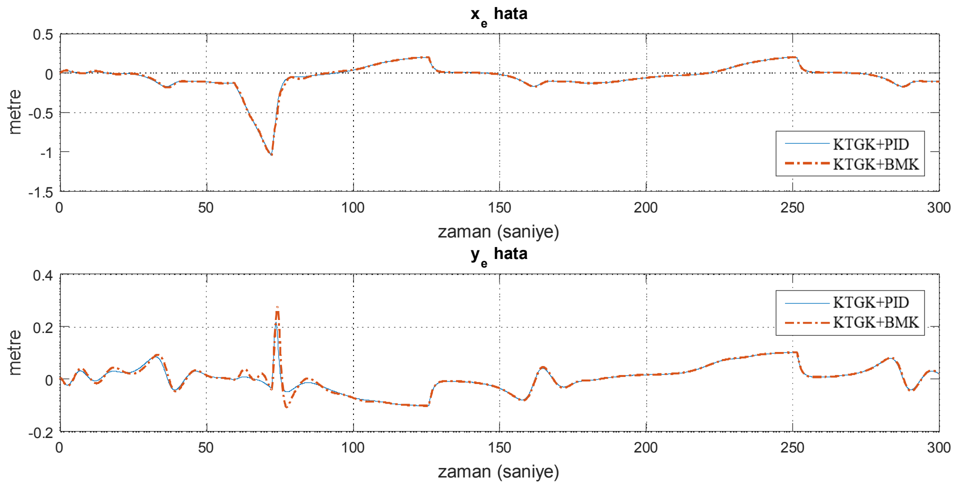
Şekil 6.18. Açısal hız hataları



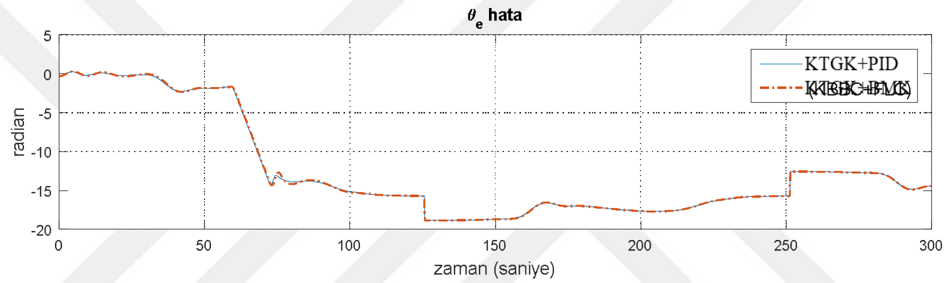
Şekil 6.19. Kontrolcülere göre sol motor torkları



Şekil 6.20. Kontrolcülere göre sağ motor torkları



Şekil 6.21. Doğrusal hatalar



Şekil 6.22. Açısal hatalar

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, diferansiyel sürüşlü mobil bir robotun kinematik ve doğrusal olmayan dinamik denklemi elde edildi. KTGK yörünge takibinin doğrusal olmama durumunun üstesinden gelebilmek için; PID kontrolcü ve BMK, DC motorların hız ayarlamaları için kullanıldı. Yörünge olarak; kare, daire, sekiz şekilleri seçildi. Kare, daire ve sekiz şekilli yörüngelerde engelli ve engelsiz olarak simülasyonlar gerçekleştirildi. Engelden kaçma için özgün bir algoritma geliştirildi. Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşıldı ve öneriler verildi:

Tasarlanan kontrolcülerde kinematik tabanlı geri adımlamalı kontrolcünün kazançları denenerek bulunmuş olup daha sonraki çalışmalar için bu kazançlar, optimizasyon metotları ve algoritmalar ile belirlenebilir. Motor hızları için kullanılan PID kontrolcünün BMK' den daha iyi sonuçlar verdiği araştırma sonuçları ve tartışmalar kısmında somut olarak gözlemlendi. BMK' nin üyelik fonksiyonları ile kuralların geliştirilerek bu durumun giderilebileceği yorumunda bulunuldu.

Yapılan simülasyonlarda, beklenildiği gibi, yörünge dolanım süresinin artmasıyla veya yörüngenin açısal hızının düşürülmesiyle kontrolcülerdeki engelden kaçma esnasındaki maksimum aşım ve yerleşme zamanı azaldı fakat daire şekilli yörünge için sürekli hal hataları ve aşımlarının 0,0001- -0,00001 metre seviyelerinden 0,024 metre seviyelerine çıktıkları gözlemlendi. Ölçek faktörünün artmasıyla birlikte sekiz şekilli yörüngede robotun yörüngeyi şekle daha uygun olarak takip ettiği fakat engelle karşılaştığı durumda maksimum aşım ve yerleşme süresinin olumsuz etkilendiği görüldü. Bu durumun engelden kaçış algoritmasının değişkenleri ile yörünge denkleminin değişkenlerinin arasındaki bağıntıların hesaplanması ve algoritmaya uygulanması ile çözülebileceği sonucuna varıldı.

Engelden kaçış için önerilen algoritmanın seçili zamandaki yörünge noktası ve engel arasındaki tepki mesafesinin, ölçek faktörü ile ters orantılı olduğu gözlemlendi. Ayrıca yörünge simülasyon zamanının artmasıyla veya yörüngenin açısal hızının düşürülmesiyle yerleşme süresinin ve maksimum aşımın azaldığı gözlemlendi. Engelden kaçma algoritmasındaki bütün bu girdilerin katsayılarının optimizasyon metotları ve algoritmalar ile belirlenerek değişken durumlarda karalı bir kaçış algoritması olarak geliştirilebileceği öngörüsünde bulunuldu.

Daire şekilli simülasyonda engelin yörüngeden uzaklaşması ki engel çapı küçülmesi ile eşdeğer olan bu durumda sonuçlar karşılaştırıldı ve beklenildiği gibi kararlılığın arttığı gözlemlendi.

Engelden kaçış algoritmasının şartın doğru olmadığında yörüngeye bağlı olarak belirlenmiş olan ve 0 veya maksimum açısal hız değerinin engel ve robot arasındaki mesafeye bölümü kadar olacak şekilde seçilen açısal hız değerinin 0 ve tanımlanan değer arasında da yörüngenin devamındaki eğrilik ile belirli bir fonksiyon ile optmize edilebileceği ve böylece her yörüngeye uygun değerin hesaplattırılabileceği yorumunda bulunuldu. Ayrıca açısal hız değerinin +/- olmasının engelin yörüngenin ne tarafına uzak olduğuna ve yörüngenin eğriliğinin nasıl devam ettiğine göre algoritmanın geliştirilerek dönüş yönünü kendisinin hesaplayabileceği öngörüsünde bulunuldu.

Yapılan bu çalışmada dairesel yörüngedeki sonuçlar, Ibari ve ark. (2016) tarafından holonomik olmayan diferansiyel sürüşlü mobil robotun dairesel yörünge takibi için KTGK kullanarak yapmış olduğu ve arduino robot ile deneylerini gerçekleştirdiği çalışmadaki sonuçlar ile tutarlı ve benzer olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

Ali, R. S., Aldair, A. A., Almousawi, A. K., 2014, Design an Optimal PID Controller using Artificial Bee Colony and Genetic Algorithm for Autonomous Mobile Robot, *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Volume 100 – No.16*

Ali, Z. A., Wang, D., Safwan, M., Jiang, W. ve Shafiq, M., 2016, Trajectory Tracking of a Nonholonomic Wheeleed Mobile Robot Using Hybrid Controller, *International Journal of Modeling and Optimization, Vol. 6, No. 3.*

Alsaab, A., Bicker, R., 2014, Moving Obstacle Avoidance in Indoor Environments, *International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 5, Issue 2, ISSN 2229-5518*

Anushree, R. and Prasad, B. K. S., 2016, Design and development of novel control strategy for trajectory tracking of mobile robot: Featured with tracking error minimization, *IEEE Annual India Conference (INDICON)*, *Bangalore, pp. 1-6.*

Asif, M., Khan, M. J., Safwan, M., Rehan, M., 2015, Feedforward and Feedback Kinematics Controller for Wheeled Mobile Robot Trajectory Tracking, *Jounal of Automation and Control Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 178-182.*

Čerkala, J., Jadlovska, A., 2015, Nonholonomic Mobile Robot with Differential Chassis Mathematical Modelling and Implementation in Simulink with Friction in Dynamics, *Acta Electrotechnica et Informatica, Vol. 15, No. 3, 3–8.*

De Luca A., 2016(1), Wheeled Mobile Robots- Analysis, Planning, and Control, *Course material Robotics 1,Department of Computer, Control and Management Engineering, Sapienza Università di Roma.*

De Luca A., 2016(2), Wheeled Mobile Robots- Introduction and Kinematic Modeling, *Course material Robotics 1,Department of Computer, Control and Management Engineering, Sapienza Università di Roma.*

Demirbaş, F., Kalyoncu, M., 2017, Differential drive mobile robot trajectory tracking with using pid and kinematic based backstepping controller, *Selcuk Univ. J.Eng. Sci. Tech., Vol.5, No.1, ISSN: 2147-9364.*

Dhaouadi, R. and Hatab, A. A., 2013, Dynamic Modelling of Differential-Drive Mobile Robots using Lagrange and Newton-Euler Methodologies: A Unified Framework, *Research Article, Advances in Robotics & AutomationTechnology*, 2:2.

Fareh, R., Saad, M., Khadraoui, S., Rabie, T., 2016, Lyapunov-Based Tracking Control for Nonholonomic Wheeled Mobile Robot, *International Scholarly and Scientific Research & Innovation 10(8).*

Fierro, R. and Lewis, F. L., 1995, Control of a nonholonomic mobile robot: backstepping kinematics into dynamics, *in Proc. Of 34th IEEE Conf. on Decision and Control, Piscataway, NJ, IEEE press, USA, pp. 3805-3810.*

Garcia., G., 2013, Wheeled Mobile Robots: Kinematic Modelling, *Mobile Robots course, Ecole Centrale de Nantes.*

Hong, Z., Chun-Long, S., Zi-Jun, Z., Wei, A., De-Qiang, Z. and Jing-Jing, W., 2015, A Modified Dynamic Window Approach to Obstacle Avoidance Combined with Fuzzy Logic, *14th International Symposium on Distributed Computing and Applications for Business Engineering and Science (DCABES), Guiyang, pp. 523-526.*

Ibari B., Benchikh L., Elhachimi A. R. H., Foitih Z. A., 2016, Backstepping Approach for Autonomous Mobile Robot Trajectory Tracking, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, IAES, 2 (3), pp.478-485.*

İbrahim, A. E. B., 2016, Wheeled Mobile Robot Trajectory Tracking using Sliding Mode Control, *Journal of Computer Sciences 2016, 12 (1): 48.55*

Kanayama, Y., Kimura Y., Miyazaki, F., Noguchi T., 1990, A stable tracking control method for an autonomous mobile robot, *in Proc. IEEE Conf. Robot Autom., pp. 384–389.*

Kanjanawanishkul, K., 2015, A recedıng horızon controller for path followıng of a mobıle robot wıth actuator constraınts, *Journal of Engineering Science and Technology Vol. 10, No. 1, 57 - 71.*

Kim, Y., Kim, B. K., 2015, Efficient time-optimal two-corner trajectory planning algorithm for differential-driven wheeled mobile robots with bounded motor control inputs, *Robotics and Autonomous Systems,Vol. 64, pp. 35 - 43*

Kowalczyk, W., Michałek, M., Kozłowski K., 2011, An Adaptive Trajectory Tracking Control of Wheeled Mobile Robots, *Preprints of the 18th IFAC World Congress, Milano (Italy).*

Lages, W. F. and Alves, J. A. V., 2017, Differential-drive mobile robot control using a cloud of particles approach, *International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol 14, Issue 1.*

Mac, T. T., Copot, C., De Keyser, R., Tran, T. D., Vu, T., 2016, MIMO Fuzzy Control for Autonomous Mobile Robot, *Journal of Automation and Control Engineering Vol. 4, No. 1.*

Martins, F.N., Sarcinelli-Filho, M. and Carelli R., 2017, A Velocity-Based Dynamic Model and Its Properties for Differential Drive Mobile Robots, *Journal of Intelligent & Robotic Systems Volume 85, Issue 2, pp 277–292.*

Mitjans, M., 2014, Collision avoidance control design, *Bachelor Semester Project, École Polytechnique Féderale de Lausanne.*

Mohareri, o., 2009, Mobile robot trajectory tracking using neural networks, *Degree of Master of Science in Mechatronics Engineering, American University of Sharjah, United Arab Emirates.*

Oubbati, M., Schanz, M. and Levi, P., 2005, Kinematic and dynamic adaptive control of a nonholonomic mobile robot using a RNN, *in Proceedings of IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA '05),* pp. 27–33.

Palm, R., Driankov, D., 2014, Fluid mechanics for path planning and obstacle avoidance of mobile robots, *ICINCO proceedings of the 11th International Conference on Informatics in Control Automation and Robotics (pp. 231-238).*

Palm, R., Driankov, D., 2015, Velocity potentials and fuzzy modeling of fluid streamlines for obstacle avoidance of mobile robots, *IEEE conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE) (pp. 1-8). IEEE Press*

Pandey, A., Parhi, D. R., 2014, MATLAB Simulation for Mobile Robot Navigation with Hurdles in Cluttered Environment Using Minimum Rule Based Fuzzy Logic Controller, *Procedia Technology 14, 28 – 34.*

Pascoal, A. M. and Aguiar, A. P., 2011, Cooperative Control of Multiple Robotic Vehicles: Theory and Practice - Trajectory tracking & Path-following control, *course material, EECI Graduate School on Control, Supélec.*

Ruan, Z. H., Wang, N., Ran, B. X., 2014, Motion Model of Two-Wheel Differential Drive Mobile Robot under Variable Load, *Applied Mechanics and Materials, Vols. 668-669, pp. 352-356.*

Serralheiro, W. A. de O., Maruyama, N., Tannuri, E. A., 2015, Motion control of an underactuated wheeled mobıle robot: a kınematıc ınput-output lınearızatıon approach, *23rd ABCM Interntional Congress of Mechanical Engineering,Rio de Janerio, RJ, Brazil.*

Siegwart, R. ve Nourbakhsh, I. R., 2004, Introduction to Autonomous Mobile Robots, *The MIT Press*

Sørbø, E. H., 2013, Vehicle Collision Avoidance System, *Master of Science in Engineering Cybernetics, Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology.*

Swadi, S. M., Tawfik, M. A., Abdulwahab, E. N. ve Kadhim, H. A., 2016, Fuzzy-Backstepping Controller Based on Optimization Method for Trajectory Tracking of Wheeled Mobile Robot, *UKSim-AMSS 18th International Conference on Computer Modelling and Simulation.*

Tawfik, M. A., Abdulwahb, E. N. and Swadi, M. S., 2014, Trajectory Tracking Control for a Wheeled Mobile Robot Using Fractional Order PID Controller, *Al-Khwarizmi Engineering Journal,* Vol. 10, No. 3, P.P. 39- 52.

Tzafestas, S. G., 2014, Introduction to Mobile Robot Control, *Elsevier Press.*

Wang, J., Lu, Z., Chen, W., Wu, X., 2011, Trajectory Tracking Control and Obstacle Avoidance for a Differentially Driven Mobile Robot, *6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 978-1-4244-8756-1/11.*

Yim, W. J. and Park, J. B., 2014, Analysis of mobile robot navigation using vector field histogram according to the number of sectors, the robot speed and the width of the path, *14th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2014)*, Seoul, pp. 1037-1040.

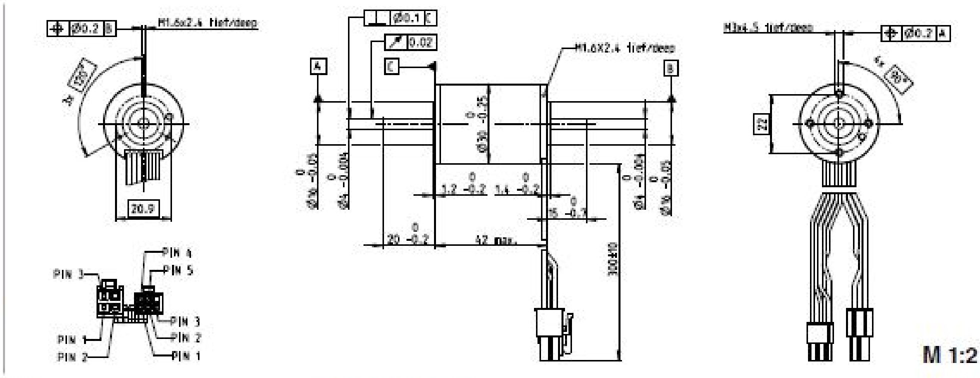
Zohaib, M., Pasha, S. M., Javaid, N., Iqbal, J., 2013, Intelligent Bug Algorithm (IBA): A Novel Strategy to Navigate Mobile Robots Autonomously, *International Multi Topic Conference 2013 (IMTIC '13)*

EKLER

EK-1 Seçilmiş motorun katalog sayfası

maxon *EC*-max

EC-max 30 ∅30 mm, brushless, 40 Watt



Stock program
Standard program
Special program (on request)

Article Numbers

Motor Data		272766	272768	272769	272770
Values at nominal voltage					
1 Nominal voltage	V	12	24	36	48
2 No load speed	rpm	8680	9250	9150	9250
3 No load current	mA	223	123	80.5	61.4
4 Nominal speed	rpm	6650	7220	7100	7210
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	34.6	33.7	33.3	33.4
6 Nominal current (max. continuous current)	A	2.85	1.49	0.969	0.737
7 Stall torque	mNm	153	160	154	157
8 Starting current	A	11.8	6.57	4.18	3.24
9 Max. efficiency	%	75	75	75	75
Characteristics					
10 Terminal resistance phase to phase	Ω	1.01	3.65	8.61	14.8
11 Terminal inductance phase to phase	mH	0.088	0.31	0.713	1.24
12 Torque constant	mNm/A	12.9	24.3	36.8	48.6
13 Speed constant	rpm/V	738	393	259	197
14 Speed/torque gradient	rpm/mNm	57.8	59.1	60.6	59.9
15 Mechanical time constant	ms	6.66	6.81	6.98	6.9
16 Rotor inertia	gcm^2	11	11	11	11

Specifications

Thermal data

17	Thermal resistance housing-ambient	8.6 K/W
18	Thermal resistance winding-housing	1 K/W
19	Thermal time constant winding	3.25 s
20	Thermal time constant motor	777 s
21	Ambient temperature	-40...+100°C
22	Max. permissible winding temperature	+155°C

Mechanical data (preloaded ball bearings)

23	Max. permissible speed		15000 rpm
24	Axial play at axial load	< 6.0 N	0 mm
		> 6.0 N	0.14 mm
25	Radial play		preloaded
26	Max. axial load (dynamic)		5 N
27	Max. force for press fits (static)		98 N
	(static, shaft supported)		2000 N
28	Max. radial loading, 5 mm from flange		25 N

Other specifications

29	Number of pole pairs	1
30	Number of phases	3
31	Weight of motor	195 g

Values listed in the table are nominal.

Connection motor (Cable AWG 20)

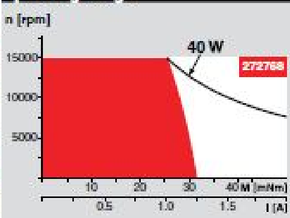
red	Motor winding 1	Pin 1
black	Motor winding 2	Pin 2
white	Motor winding 3	Pin 3
	N.C.	Pin 4
Connector	**Article number**	
Molex	39-01-2040	

Connection sensors (Cable AWG 26)

yellow	Hall sensor 1	Pin 1
brown	Hall sensor 2	Pin 2
grey	Hall sensor 3	Pin 3
blue	GND	Pin 4
green	V_{Hall} 3...24 VDC	Pin 5
	N.C.	Pin 6
Connector	**Article number**	
Molex	430-25-0600	

Wiring diagram for Hall sensors see p. 27

Operating Range



Comments

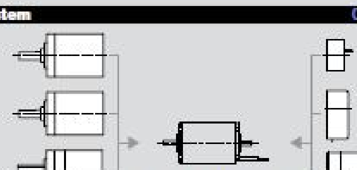
Continuous operation
In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.
= Thermal limit.

Short term operation
The motor may be briefly overloaded (recurring).

Assigned power rating

maxon Modular System

Overview on page 16 - 21



Planetary Gearhead
∅32 mm
1.0 - 8.0 Nm
Page 238/239

Koaxdrive
∅32 mm
1.0 - 4.5 Nm
Page 240

Spindle Drive
∅32 mm
Page 255/256/257

Recommended Electronics:

Encoder MR
500/1000 CPT,
3 channels
Page 272

Encoder HEDL 5540
500 CPT,
3 channels
Page 279

Brake AB 20
24 VDC
0.1 Nm
Page 328

May 2012 edition / subject to change

EK-2 Maxon motor kataloğu 2014, sayfa 48

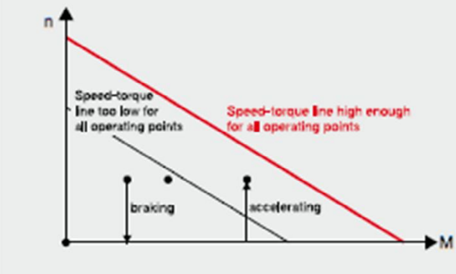
maxon motor

Regulated servo drives

In work cycles, all operating points must lie beneath the curve at a maximum voltage U_{max}. Mathematically, this means that the following must apply for all operating points (n_L, M_L):

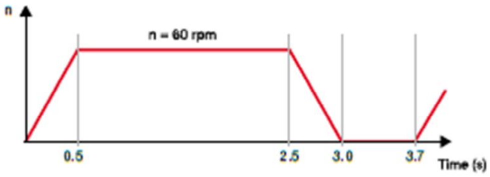
$$k_n \cdot U_{max} = n_0 > n_L + \frac{\Delta n}{\Delta M} M_L$$

When using servo amplifiers, a voltage drop occurs at the power stage, so that the effective voltage applied to the motor is lower. This must be taken into consideration when determining the maximum supply voltage U_{max}. It is recommended that a regulating reserve of some 20% be included, so that regulation is even ensured with an unfavorable tolerance situation of motor, load, amplifier and supply voltage. Finally, the average current load and peak current are calculated ensuring that the servo amplifier used can deliver these currents. In some cases, a higher resistance winding must be selected, so that the currents are lower. However, the required voltage is then increased.



Example for motor/gear selection

A drive should move cyclically according to the following speed diagram.



The inertia of the load to be accelerated J_L is 140 000 gcm². The constant coefficient is approximately 300 mNm. The 4-quadrant operation allows controlled and dynamic motor operation and brake operation in two directions of rotation (all 4 quadrants). The power supply unit delivers max. 3 A and 24 V.

Calculation of load data

The torque required for acceleration and braking are calculated as follows (motor and gearhead inertia omitted):

$$M_a = J_L \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t} = 0.014 \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{60}{0.5} = 0.176 \text{ Nm} = 176 \text{ mNm}$$

Together with the friction torque, the following torques result for the different phases of motion.

– Acceleration phase	(duration 0.5 s)	476 mNm
– Constant speed	(duration 2 s)	300 mNm
– Braking (friction brakes with 300 mNm)	(duration 0.5 s)	124 mNm
– Standstill	(duration 0.7 s)	0 mNm

Peak torque occurs during acceleration.
The RMS determined torque of the entire work cycle is

$$M_{RMS} = \sqrt{\frac{t_1 \cdot M_1^2 + t_2 \cdot M_2^2 + t_3 \cdot M_3^2 + t_4 \cdot M_4^2}{t_{tot}}}$$

$$= \sqrt{\frac{0.5 \cdot 476^2 + 2 \cdot 300^2 + 0.5 \cdot 124^2 + 0.7 \cdot 0}{3.7}} \approx 285 \text{ mNm}$$

The maximum speed (60 rpm) occurs at the end of the acceleration phase at maximum torque (463 mNm). Thus, the peak mechanical power is:

$$P_{max} = M_{max} \cdot \frac{\pi}{30} n_{max} = 0.476 \cdot \frac{\pi}{30} \cdot 60 \approx 3 \text{ W}$$

Physical variables **and their units**

		SI	Catalog
i	Gear reduction*		
I_{mot}	Motor current	A	A, mA
I_A	Stall current*	A	A, mA
I_0	No load current*	A	mA
I_{RMS}	RMS determined current	A	A, mA
I_N	Nominal current*	A	A, mA
J_R	Moment of inertia of the rotor*	kgm²	gcm²
J_L	Moment of inertia of the load	kgm²	gcm²
k_M	Torque constant*	Nm/A	mNm/A
k_n	Speed constant*		rpm/V
M	(Motor) torque	Nm	mNm
M_L	Load torque	Nm	mNm
M_H	Stall torque*	Nm	mNm
M_{mot}	Motor torque	Nm	mNm
M_R	Moment of friction	Nm	mNm
M_{RMS}	RMS determined torque	Nm	mNm
M_N	Nominal torque	Nm	mNm
$M_{N,G}$	Max. torque of gear*	Nm	Nm
n	Speed		rpm
n_L	Operating speed of the load		rpm
n_{max}	Limit speed of motor*		rpm
$n_{max,G}$	Limit speed of gear*		rpm
n_{mot}	Motor speed		rpm
n_0	No load speed*		rpm
P_{el}	Electrical power	W	W
P_J	Joule power loss	W	W
P_{mech}	Mechanical power	W	W
R	Terminal resistance	Ω	Ω
R_{25}	Resistance at 25°C*	Ω	Ω
R_T	Resistance at temperature T	Ω	Ω
R_{th1}	Heat resistance winding housing*		K/W
R_{th2}	Heat resistance housing/air*		K/W
t	Time	s	s
T	Temperature	K	°C
T_{max}	Max. winding temperature*	K	°C
T_U	Ambient temperature	K	°C
T_W	Winding temperature	K	°C
U_{mot}	Motor voltage	V	V
U_{ind}	Induced voltage (EMF)	V	V
U_{max}	Max. supplied voltage	V	V
U_N	Nominal voltage*	V	V
α_{Cu}	Resistance coefficient of Cu	= 0.0039	
α_{max}	Maximum angle acceleration	rad/s²	
$\Delta n/\Delta M$	Curve gradient*	rpm/mNm	
ΔT_W	Temperature difference winding/ambient	K	K
Δt	Run up time	s	ms
η	(Motor) efficiency		%
η_G	(Gear) efficiency*		%
η_{max}	Maximum efficiency*		%
τ_m	Mechanical time constant*	s	ms
τ_S	Therm. time constant of the motor*	s	s
τ_W	Therm. time constant of the winding*	s	s

(*Specified in the motor or gear data)

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Faik DEMİRBAŞ
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Niğde 07.03.1983
Telefon	**:**	+90 554 356 22 81
e-mail	**:**	faik_37@yahoo.com

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Niğde Anadolu Lisesi, Merkez, Niğde	2001
Üniversite	:	Yıldız Teknik Üniversitesi, Beşiktaş, İstanbul	2007
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya	2017

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2007	Materyal Araştırma ve Test Merkezi Federal Enstitüsü	Stajyer
2009	Birinci Ana Bakım Merkezi Komutanlığı	Tercümanlık ve Teknik Destek
2010	ASAŞ	Kalite Proses Kontrol
2010/2011	KENTPAR	Laboratuvar, Ürün ve Proses Geliştirme Sorumlusu
2012/2014	PETROTEK	Arge Sorumlusu
2015/2017	PETROTEK	Tasarım Sorumlusu

YABANCI DİLLER

İngilizce, Almanca

YAYINLARI

Demirbaş F., Kalyoncu M., 2017, Differential drive mobile robot trajectory tracking with using and kinematic based backstepping controller, *Selcuk Univ. J. Eng. Sci. Tech., Vol.5, No.1, 2017, ISSN: 2147-9364 (Electronic)*