

Dinamik Modeli Bilinen Diferansiyel Mobil Robotun Pure Pursuit Algoritması İle Pozisyon Kontrolünün Yapılması

Gürkan GÜRGÜZE^{1*}, İbrahim TÜRKOĞLU²

¹Yazılım Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi Elazığ/ Türkiye

² Yazılım Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi Elazığ/ Türkiye

*(gurkangurgoze@gmail.com)

Özet-Diferansiyel sürürlü otonom mobil robotlarda yörüngesi belirlenmiş bir hareket planlamada ortaya çıkan bir başka problem de robotun yörüngeyi en iyi şekilde takip edebilmesini sağlamaktır. Çeşitli iç ve dış etkenler, matematiksel hesaplamalarla elde edilmiş yolun istenildiği gibi izlenilmesini engellemektedir. Çünkü gerçek uygulamalarda motorların frekanslarının farklılıkları dahi hareketin yapılan hesaplamaların dışına çıkmasına neden olabilmektedir. Bunun yanında zemin sürtünmesi, yük, rotanın kıvrımları, keskinlikleri, engebeleri gibi birçok kısıt karşımıza çıkmaktadır. Genellikle zemin sürtünmesi ile sistemin yükü yol planlama ve pozisyon kontrol çalışmalarında ihmal edilmektedir. Ancak bu çalışmada bu iki parametrenin de dinamik modele eklenmesiyle pozisyon kontrolündeki hata oranları incelenmiştir. Pozisyon kontrolü yerel ve genel koordinat bilgilerine göre mevcut pozisyon ile istenilen yörünge arasındaki sapma olarak oluşur. Burada amaç hata oranını en aza indirmek ve hataya göre motor hızlarını kontrolörlerin (PID, Fuzzy vb.) uygun sinyalleri üretmesini sağlamaktır. Bu amaçla birçok algoritma geliştirilmiştir. Bu çalışmada pozisyon kontrolü için geliştirilen ilk algoritmalarından Pure Pursuit algoritması kullanılmıştır. Pure Pursuit algoritması mobil robotun uç noktaya belirli bir uzaklıkta belirlediği hedef noktaya hareket planlamasıyla çalışmaktadır. İnsanların belirli bir bakış mesafesine göre hareket mantığından elde edilmiştir. Çalışmamızda geliştirdiğimiz otonom mobil robot dinamik modelinin Pure Pursuit algoritmasıyla robot pozisyon kontrol uygulaması ve yörünge takip başarımı incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler- Pure Pursuit, zemin sürtünmesi, yük, pozisyon kontrol, dinamik analiz, kinematik analiz

Position Control With The Pure Pursuit Algorithm Of The Differential Mobile Robot Whose Dynamic Model Is Known

Abstract-In autonomous mobile robots with differential drive, another problem that arises in the planning of an orbit movement is to enable the robot to follow the trajectory in the best way. Various internal and external factors prevent the path obtained by mathematical calculations to be followed as desired. Because, in real applications, the differences in the frequencies of the motors can cause the movement to go out of the calculations. In addition, there are many constraints such as ground friction, load, curves of the route, sharpness and roughness. Generally, ground friction and load of the system are neglected in road planning and position control studies. However, in this study, error rates in position control were investigated by adding these two parameters to the dynamic model. Position control occurs as a deviation between the current position and the desired trajectory according to local and general coordinate information. The aim here is to minimize the error rate and to ensure that the motor speeds (PID, Fuzzy, etc.) of the motor according to the error generate appropriate signals. Many algorithms have been developed for this purpose. In this study, Pure Pursuit algorithm, one of the first algorithms developed for position control, was used. The Pure Pursuit algorithm works with the mobile robot's movement planning to the target point that is determined at a certain distance from the endpoint. It is derived from the logic of movement according to a certain distance of people. In this study, the robot position control application and trajectory tracking performance of the autonomous mobile robot dynamic model developed by Pure Pursuit algorithm was investigated.

Keywords: Pure Pursuit, ground friction, load, position control, dynamic analysis, kinematic analysis

I. GİRİŞ

Otonom mobil robotlar sensör, kamera vb. donanımlarla kendi kendine hareket edebilen, kararlar verebilen insansız mobil araçlardır. Bu araçlardan beklenen çevresini tanıması, bulunduğu ve gideceği noktayı hesaplaması, hedefe yönelik yörüngeleri bulması ve bu bilgilere göre bir karar vererek en uygun yörüngede, yoldan sapmadan hedef noktaya hareket etmesidir. Tabii bunların her biri başlı başına üzerinde çalışılması gereken konular halini almıştır[1].

Nerede olduğunu ve yapay üretilen bir yörüngede nereye gideceğini bilen bir robot için diğer önemli nokta yörüngeden sapmadan yolu izleyebilmektir. Sistemde bu pozisyon kontrol algoritmaları veya yapıları gerçekleştirilmektedir. Pozisyon kontrolünde beklenen mobil robotun referans yola göre sapma hatalarını bulmak ve buna göre hızını ayarlayabilmektir. Hızını ayarlaması bu tür sistemlerin hareketi hız kontrolü ile gerçekleştirilmesindedir [2]. Genellikle hız kontrolü PID gibi kontrolörleri tarafından gerçekleştirirler. Tabii

kullanılan PID'nin parametrelerini de iyi ayarlamak gerekir ki istenilen cevapları alabilelim. Hata miktarlarını ise sisteme bağlı kamera, ultrasonik sensör, enkoder vb. gibi donanımlardan aldığı verilere göre hesaplar. Hatalara odometri de denilmektedir[3]. Pozisyon kontrolünde temelde motorlara bağlı enkoderlerden alınan hız verilerine göre pozisyon hataları hesaplanır. Ancak donanımsal yapıya bağlı doğrudan hesaplamalarda hata birikimi olduğundan bunun yanı sıra geliştirilmiş monte carlo, pure pursuit, markov, kalman filtreleme gibi birçok pozisyon kontrol algoritması mevcuttur[4].

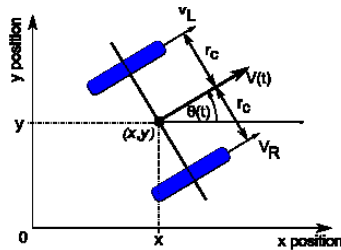
Bunlardan pure pursuit algoritması ilklerden biridir. Mantığı ve kullanımı basit olduğu için yıllarda birçok sistemde kullanılmıştır. Temelde uzaktaki belirlenen bir noktaya odaklanarak o noktaya hareketle çalışan ve yörüngeye yaklaşık gidebilen bir algoritmadır[5].

Pozisyon kontrolünde konum hataları alındığından robotun nerede olduğu ve nereye gideceği önemli olduğundan bu hesaplamaları yapmamız gerekir. Bunu kinematik analiz ile gerçekleştiririz. Kinematik analizin doğru sonuçları vermesi ise doğru parametrelerle doğru dinamik modelin kurulmasıyla olacaktır. Pozisyon kontrolünde genellikle DC motor modeli yeterli modeldir. Ancak bazı durumlarda yükün etkisi ve zemin sürtünmesi çevre şartları için gerekli olabilmektedir.

Bu çalışmada pure pursuit algoritmasının yük ve zemin sürtünmesi parametrelerine bağlı pozisyon kontrolü incelenmiştir. Konum bilgisi için kinematik analiz, donanımsal yapı için DC motor modeli oluşturulmuştur. Daha sonra Pure pursuit algoritmasının yapısından bahsedilmiş ve algoritma sisteme dahil edilmiştir. Son olarak oluşturulan sistemin verilen referans yörüngeye göre yük ve sürtünme parametrelerinin olmadığı ve olduğu durumların başarımları karşılaştırılmıştır.

II. KİNEMATİK ANALİZ

Kinematik analiz, mobil robotların bulunduğu konumunu ve bir sonraki konuma hangi hız ve açılarla yöneleceği bilgilerine ulaşmamızı sağlayan matematiksel hesaplamalardır. Mobil robotların genel koordinat düzlemindeki hareketi verilen yörünge koordinat bilgilerine göre o anki konum ile hedef konum arasındaki değişiklik olarak eşitlik 1'deki gibidir.



Şekil 1. Mobil robot hareket eksenini [6]

$$\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0 \quad (1)$$

Bu iki nokta arasında hareket motorlarda meydana gelen doğrusal V_R , V_L ve açısal hızlara w_R , w_L göre gerçekleşir. Doğrusal hızlar;

$$V_R = r \cdot w_R \quad V_L = r \cdot w_L \quad (2)$$

Robotlar hareketlerini, tekerlekteki hızların şekill de gösterildiği gibi iki teker arasındaki dönüş ekseninin l

uzaklıktaki orta noktasında bulunan ağırlık merkezine etki ettiği bileşke hızlarla gerçekleştirirler.

Doğrusal bileşke hız;

$$V = V_R + V_L \quad (3)$$

Diferansiyel sürürlü robotlarda yanal kayma olmadığından bileşke hızın y ekseninde hızı $V_y = 0$ dır. Aynı zamanda motorların hızlarının etki ettiği nokta orta noktada olduğundan hızların yarısı mobil robotun istenilen hızdaki hareketi için yeterli olacaktır. Bu durumda bileşke hız;

$$V = V_x = \frac{(V_R + V_L)}{2} = \frac{(r \cdot w_R + r \cdot w_L)}{2}, \quad (4)$$

Olarak ifade edilebilir.

w açısal hızı ise eşitlik 1 de gösterildiği gibi robotun genel koordinat eksenindeki açı değişimidir.

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = w \quad (5)$$

Açısal değişim tekerleklerdeki doğrusal hızın mobil robotun ağırlık merkezine etkisine göre yarım çember şeklinde gerçekleşir. Çember üzerinde hareket ederken saat yönü negatif, saat yönünün tersi ise pozitif olarak ifade edilir.

Bu durumda açısal hızlar;

$$w_R = \frac{r \cdot w_R}{l} \quad w_L = -\frac{r \cdot w_L}{l} \quad (6)$$

Ağırlık merkezine etki eden bileşke açısal hız;

$$w = \frac{(V_R - V_L)}{l} = \frac{(r \cdot w_R - r \cdot w_L)}{l} \quad (7)$$

Mobil robotun bileşke doğrusal hızına ve buna bağlı oluşan açısına göre x, y koordinatlarındaki değişim eşitlik 8 teki gibi olur.

$$\dot{x} = v \cdot \cos \theta \quad (8)$$

$$\dot{y} = v \cdot \sin \theta$$

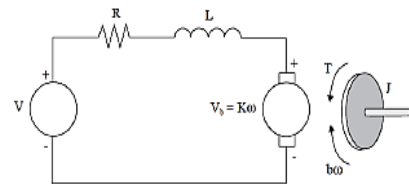
Genel koordinat ve yönelim değişimleri matris formu [6,7]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta(t) & 0 \\ \sin \theta(t) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ w(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

III. DİNAMİK MODEL

Sanal simülasyon bazlı çalışmalar için sistemlerin tüm parametreleriyle matematiksel modelinin oluşturulması gerekli ki, buna dinamik modelleme denir. Diferansiyel sürürlü mobil robotlarda modellemede temel eleman DC motordur. DC motorun en doğru parametrelerle modellenmesi tüm sistemin cevaplarının istenilene yakın olması anlamına gelir.

DC motor elektriksel ve dönen mekanik kısımdan oluşur. Bu iki kısım için eşitlik 10 ve 11 teki gibi Kirchoff ve Newton yasalarına göre kurulan denklemlerle $G_s(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)}$ şeklindeki transfer fonksiyonu sistemimizin dc motor dinamik modeli olacaktır.



Şekil 2. DC Motor modeli

Kirchoff kanunlarına göre;

$$\sum V = V_{in} - V_R - V_L - EMF = 0 \quad (10)$$

$$V_{in} = e(t) + R_a \cdot I_a + L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

$$e(t) = K_e \cdot \frac{d\theta(t)}{dt}$$

V_{in} giriş gerilimi, V_R direnç gerilimi, V_L indüktans gerilimi, $e(t)$ EMF gerilimidir. K_e zıt emk sabitidir.

Newton yasasına göre;

$$T_m = T_L + T_s + T_a$$

$$T_m = I_a \cdot K_t = T_L + b_m \cdot \omega(t) + J_m \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (11)$$

T_m - motor, T_L -yük, T_s - viskoz sürtünme ve T_a -atalet torkudur. Genelde $K_t = K_e = K$ alınır

Yukardaki eşitliklere göre DC motor transfer fonksiyonu aşağıdaki eşitlikteki gibi elde edilir[8].

$$G_S(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K}{(L \cdot s + R_a)(J_m \cdot s + b_m) + K^2} + T_L \quad (12)$$

Bu transfer fonksiyonuna göre oluşturulan mobil robot sistemi yörünge izleme çalışmalarında konuma göre hızın ayarlanması ile yeterli olabilmekte. Bazı hassas çalışmalarda motorun çalışma torkunu zorlayıcı yük, zemin sürtünmesi gibi parametreler sisteme dahil edilebilir. Yük (F_L) ve zemin sürtünme kuvveti (F_Z) motora ters yönde engelleyici olarak negatif olarak eklenir. b_z zemin sürtünme katsayısı, m sistemin kütleleridir. Kütle ağırlık merkezinin ortada olmasından $m/2$ oranında etki eder.

Mobil robot sistemin net itici kuvveti $-F_m$;

$$F_m = F_L + F_Z \quad (13)$$

$$F_L = \frac{m}{2} \cdot a = \frac{m}{2} \cdot \dot{w} \cdot r \quad F_Z = b_z \cdot \omega$$

Tork ise kuvvetin mesafeyle çarpımıdır. Bu kuvvetlerin motor miline uzaklığı tekerleğin r yarıçapıdır [9].

Bu durumda tork;

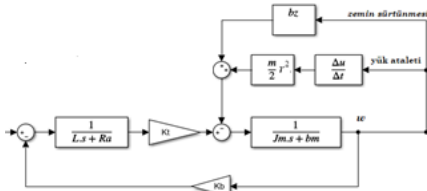
$$T_m = T_L + T_Z \quad (14)$$

$$T_m = F_L \cdot r + F_Z$$

$$T_m = \frac{m}{2} \cdot \dot{w} \cdot r^2 + b_z \cdot \omega$$

$$w = \frac{d\theta}{dt} \quad \text{ve} \quad \dot{w} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

$$T_m = \frac{m}{2} \cdot r^2 \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + b_z \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (15)$$



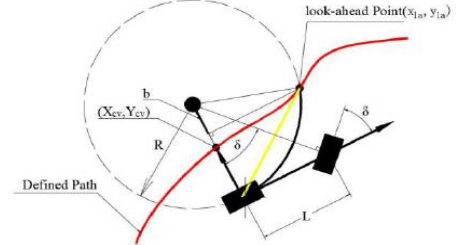
Şekil 3. Sürtünme ve yükün dâhil edildiği her bir motor için dinamik simulink modeli.

IV. PURE PURSUIT ALGORİTMASI

Pozisyon kontrol algoritmalarının temel amacı mobil robotun yoldan sapmadan gitmesini sağlamaktır. Bu amaçla geliştirilen bir çok tahmini, olasılıksal ve geometrik tabanlı algoritmalar mevcuttur. Pure pursuit algoritması da bu amaçla 1980'li yıllarda geliştirilmiş geometrik tabanlı bir algoritmadır[5].

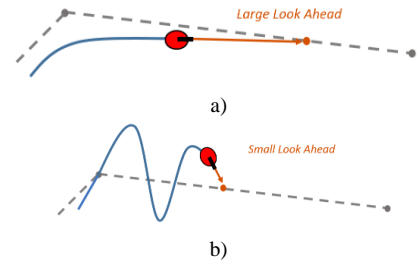
Pure Pursuit algoritmasının temel mantığı insanlardaki gibi hareket edeceği bir ileri görüş mesafesini belirleyip bulunduğu noktaya göre hedef noktaya hız ve yönelimini ayarlayarak hareket etmektir. Öncelikle algoritma mevcut konumu hesaplar. Nerede olduğu öğrendikten sonra verilen yörünge üzerinde bir ileri görüş noktası (look-ahead point) belirler. Belirlediği bu noktaya göre belirlenen bir açıda daire çizerek yumuşak bir şekilde hareket etmeye çalışır. Hareketini

de sonuçta ileri görüş noktasına hangi doğrusal ve açısal hızlarla hareket edeceğini belirler ve motora bu bilgileri gönderir. Mobil robotta ilerleme hızını ve açısını ayarlayarak ileri görüş noktasına harekete başlar. Hareket sırasında bu bilgileri güncelleyerek en son noktaya ulaşır. Ancak bu algoritmada dairesel oluşuma göre bir ilerleme yapıldığı için tam yörüngede bir ilerleme olmaz yakın bir yörünge izlenir[10].



Şekil 4. Pure Pursuit yaklaşımı

Yörüngeye yakın hesaplamalar için look-ahead parametresi önemli bir yer tutar. Look-ahead parametresi büyük seçildiğinde şekil 4 a da gösterildiği gibi daha geniş açılı, yumuşak ve az salınımlı bir yol izlenir. Ancak bu durumda da keskin dönüşlerde yörüngeden sapma çok olacağından hareket rotası uzaçacak ve istenmeyen geniş mesafeli ilerlemeler meydana gelecektir. Look-ahead parametresi küçük seçildiğinde ise şekil 4-b de gösterildiği gibi her görüş noktasına manevra yapılacağından salınımlar meydana gelecektir. Salınımların artması ise motorların ani hız değişimleri yapmasına neden olacaktır. Bu nedenlerden dolayı look-ahead parametresini kullanılan yörüngeler için doğru seçmek performansı arttıracaktır [11]



Şekil 5. Look ahead parametresinin kullanımı a) Look-Ahead büyük seçimi b) Look-ahead küçük seçimi [12]

V. SİMÜLASYON SONUÇLARI

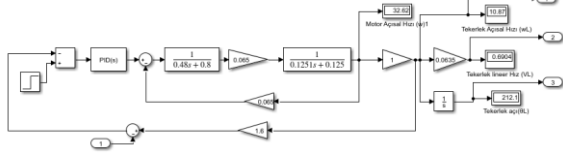
Simülasyon çalışmaları için öncelikle sistemin temel elemanı DC motorun modellenmesi gerekir. Tablo 1 de verilen parametrelere göre dc motor modeli için gerekli transfer fonksiyonu eşitlik 2 deki gibi elde edilmiştir.

Tablo1. DC motor parametreleri

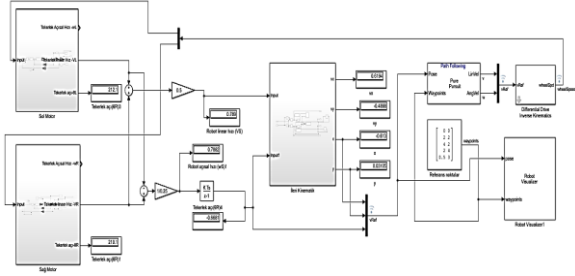
Parametreler	Sembol	Değer	Birim
Tork Sabiti	K_t	0,065	Nm/A
Zıt EMK Sabiti	K_e	0,065	Vs/rad
Motor Rotor Ataleti	J_m	0,1251	Kg/m ²
Motor Viskoz Sürtünme	b_m	0,125	Nms/rad
Armatür Direnci	R_a	0.80	Ohm
Armatür Endüktansı	L_a	0,48	mH
Zemin Sürtünmesi	b_z	0,7	Nms/rad
Takometre Sabiti	K_{tac}	1,6	Volt.s/rad
Yük	m	5	Kg

$$G_S(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{0,065}{(0,48 \cdot s + 0,8)(0,1251 \cdot s + 0,125) + 0,065^2} \quad (16)$$

Sistemin PID parametreleri ise deneme yanılma yöntemiyle $K_p = 50$ $K_i=1$ ve $K_d=50$ olarak elde edilmiştir. Bu parametrelere göre oluşan dc motor simulink modeli şekil 5'teki gibidir. Pure Pursuit algoritmasına göre tüm sistem ise şekil 7'deki gibi oluşturulmuştur. Look-ahead değeri 0,35 olarak seçilmiştir.



Şekil 6. DC motor simulink modeli

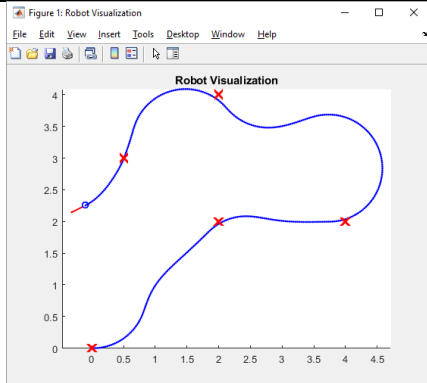


Şekil 7. Pure Pursuit algoritmasına göre oluşturulmuş mobil robot sistemi

Sürtünmesiz ve yüksüz sistem ile sürtülmeli ve yüklü sistemin süre ve enerji durumları tablo2 de ki gibidir. Oluşan yollar ise şekil7 de gösterilmiştir.

Tablo2. Sürtünmesiz, yüksüz ile sürtülmeli, yüklü durumların sistem cevapları

	Süre (ms)	Enerji tüketimi (j)	En yüksek Lineer Hız	En yüksek Açısal hız
Sürtünmesiz ve yüksüz	17.8	7550	0.688	0.798
Sürtülmeli ve yüklü	18.6	16995	0.628	0.7378



a)

Şekil 7. Mobil robotun hareket yörüngesi

VI. SONUÇ

Bu çalışmada kinematik ve dinamik analizi mevcut bir sistemde mobil robotun pure pursuit algoritmasıyla yaptığı pozisyon kontrolü üzerinde durulmuştur. Pozisyon kontrolünün aynı zamanda sisteme yük ve zemin sürtünmesi dahil edildiğinde oluşan sonuçlar gözlenmiştir. Sonuçlara bakıldığında zemin sürtünmesi

yükün hareket süresi ve enerji tüketimini arttırdığı gözlemlendi. Mobil robotun en yüksek lineer ve açısal hızlarının yaklaşık %9 oranında arttığı görüldü. Ancak mobil robotun motorlarının pozisyon kontrolünü farklı hızlarda da sağlayabilecek kapasitede olması oluşan yörüngenin aynı olmasını sağlamıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Urrea, Claudio, and José Muñoz. "Path tracking of mobile robot in crops." *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 80.2 (2015): 193-205.
- [2] Patle B. K., Parhi D., Jagadeesh A., Sahu O. P. Real time navigation approach for mobile robot. c. 12, s. 2, ss. 135-142, 2017
- [3] Leena, N., and K. K. Saju. "Modelling and trajectory tracking of wheeled mobile robots." *Procedia technology* 24 (2016): 538-54
- [4] Malu, S. K., Majumdar, J. Kinematics, localization and control of differential drive mobile robot. *Global Journal of Research In Engineering.* (2014).
- [5] Samuel, Moveh, Mohamed Hussein, and Maziah Binti Mohamad. "A review of some pure-pursuit based path tracking techniques for control of autonomous vehicle." *International Journal of Computer Applications* 135.1 (2016): 35-38.
- [6] Marchewka, D., Piątek, M. Wheeled mobile robot modeling aspects. AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland. (2006).
- [7] Gürgüze, G ve Türkoğlu İ. "Otonom Diferansiyel Sürücülü Mobil Robotlarda Kinematik Model", UBAK, 2019.
- [8] Gürgüze, G ve Türkoğlu İ. "Otonom Diferansiyel Sürücülü Mobil Robotlarda Kinematik Model", UBAK, 2019.
- [9] Stepniewski, A., et al. "Dynamics model of a vehicle with DC motor." *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa* 15.1 (2015)
- [10] Lundgren, Martin. "Path tracking for a miniature robot." *Masters, Department of Computer Science, University of Umea* (2003): 9.
- [11] Wang, Wei-Jen, Tusng-Ming Hsu, and Tzu-Sung Wu. "The improved pure pursuit algorithm for autonomous driving advanced system." *2017 IEEE 10th International Workshop on Computational Intelligence and Applications (IWCIA)*. IEEE, 2017.
- [12] Matlab Team (2019) [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/robotics/ug/pure-pursuit-controller.html>