

미끄러짐을 고려한 이동 로봇의 제어 기술 동향

유성진 / 중앙대

바퀴로 구동되는 이동 로봇(wheeled mobile robots: WMR)은 서비스 로봇 및 군사 로봇 등 많은 분야에서 활발히 활용되고 있다. 따라서 WMR의 자율 주행을 위한 자동 제어 문제에 많은 연구가 기울여지고 있다[1-6]. 그러나 WMR의 자동 제어 문제를 위한 기존의 많은 제어 기술들은 미끄러짐이 없다는 가정 하에 연구되었다. 미끄러짐은 타이어의 변형(tire deformation)과 물기가 있는 경로나 얼어 있는 경로 등의 운행 환경에 따라 빈번히 발생하는 현상으로 미끄러짐을 없다는 가정은 비현실적이다. 따라서 미끄러짐을 고려하지 않은 이동 로봇의 제어 시스템은 실제 운행 중에 안정성 및 제어 성능의 저하를 야기한다. 따라서 본 글에서는 미끄러짐을 고려한 이동 로봇의 운동학 식 및 제어 기술 동향을 알아본다.

1. 미끄러짐의 종류

이동 로봇의 미끄러짐은 크게 바퀴의 진행 축 방향을 벗어나는 옆으로 미끄러짐(Skidding)과 바퀴 자체의 미끄러짐(Slipping)으로 구분된다[7].

1.1 Skidding

Skidding은 이동 로봇의 방향을 회전할 때, 원심력(lateral force or cornering force)에 의해 발생한다. 이때 원

심력은 경로와 타이어의 상호작용에 의해 발생된다. 그림 1은 원심력에 의한 타이어의 변형을 보여준다. 여기서 δ 는 바퀴의 진행 방향과 바퀴 평면 사이의 각도를 나타내는 미끄러짐 각도(slip angle)이다. 그리고 F 는 원심력을 나타낸다.

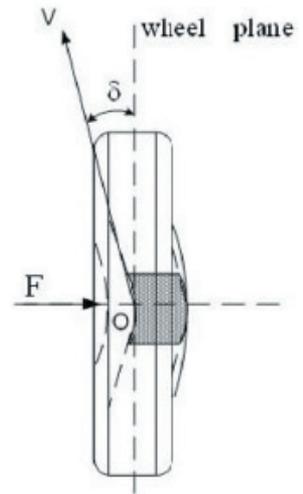


그림 1 원심력에 의한 타이어의 변형

1.2 Slipping

Slipping은 그림 2에서 나타난 무게의 의한 타이어의 변형에 의해 일

어난다. 여기서 r 은 무게가 없을 때의 바퀴의 반지름이고 $\dot{\phi}$ 는 바퀴의 각속도, 그리고 v_l 은 바퀴의 선속도를 나타낸다. 미끄러짐 없이 바퀴가 굴러간다는 가정에서 바퀴의 선속도는 $v_l = r\dot{\phi}$ 이다. 그러나 미끄러짐을 고려할 경우

Slipping은 $i = 1 - \frac{v_l}{r\dot{\phi}}$ 에 의해 나타난다. 여기서 $i \in [-1, 1]$ 이고 $i=0$ 은 미끄러짐이 없는 경우를 나타내고 $i=1$ 은 완벽하게 미끄러져 바퀴가 헛도는 현상을 의미한

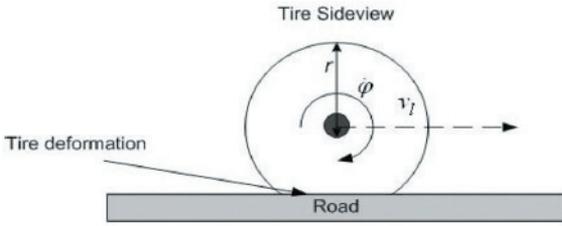


그림 2 무게의 의한 타이어 변형

다. 보통의 경우 Slipping은 $i \in (-1, 1)$ 인 경우를 의미하고 세로 미끄러짐 속도(longitudinal slip velocity)로 명명하고 $d = r\dot{\phi} - v_i$ 로 정의한다.

2. 미끄러짐을 고려한 이동 로봇의 동역학식

본 글에서는 그림 3과 같이 두 개의 물리적인 바퀴로 구동되는 이동 로봇의 Type(2,0) 모델을 기반으로 미끄러짐을 고려한 이동 로봇의 동역학식을 소개한다. 그림 3의 WMR은 미끄러짐을 고려하지 않았을 경우의 이상적인 모델을 나타내며, 여기서 P점은 두 개의 바퀴사이의 중심이다. 그림 4는 미끄러짐을 고려한 이동 로봇의 움직임을 나타낸다. 이상적인 모델의 경우, 로봇의 선속도는 진행 방향 축과 항상 일치한다. 하지만 미끄러짐을 고려한 이동 로봇 모델의 경우에 바퀴가 미끄러졌을 때 선속도 \vec{v} 는 진행 방향 X_b 축을 δ 의 각도로 벗어난다. 이러한 slipping과 skidding 현상 모두를 고려한 비홀로노믹 제약성은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} \dot{y} \cos \theta - \dot{x} \sin \theta = d_1 \\ \dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta + R\dot{\theta} = r(\dot{v}_1 - d_2) \\ \dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta - R\dot{\theta} = r(\dot{v}_2 - d_3) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 (x, y) 는 두 바퀴사이의 중심점이고, θ 는 이동 로봇의 진행 각도이다. 그리고 \dot{v}_1 와 \dot{v}_2 는 오른쪽과 왼쪽 바퀴의 각속도, R 는 이동 로봇의 폭의 절반, 그리고 r 은 바퀴의 반지름이다. d_1 와 (d_2, d_3) 는 진행 축 방향의 미끄러짐(lateral skidding velocity)과 두 바퀴의 미끄러짐을 나타낸다. 섭동된(perturbed) 비홀로노믹 제약성 (1)을 이용하면 운동학식은 다음과 같다.

$$\dot{q} = J(q)(z - \zeta) + \psi(q, \mu) \quad (2)$$

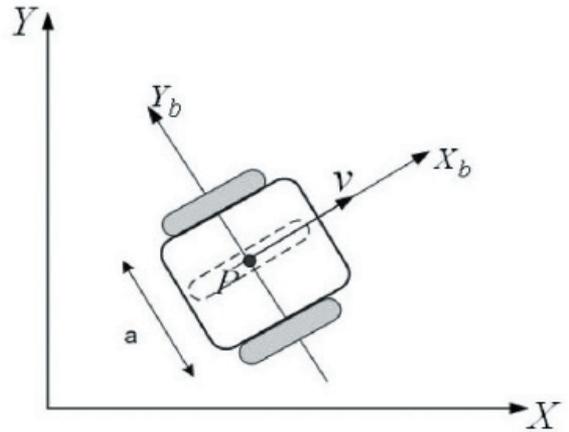


그림 3 Type(2,0) WMR의 이상적인 모델

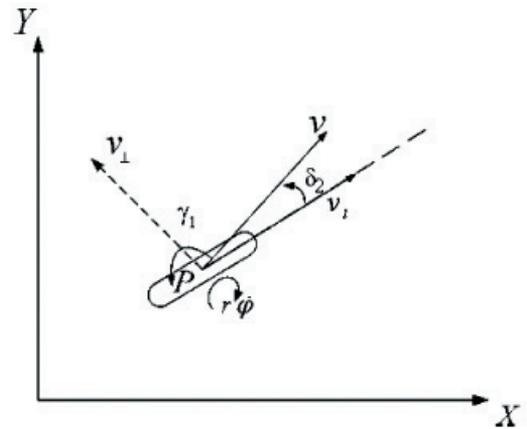


그림 4 미끄러짐을 고려한 Type(2,0) WMR 모델

여기서 $\zeta = [\zeta_1, \zeta_2]^T$; ζ_1 는 바퀴의 앞뒤로의 미끄러짐 속도이고, ζ_2 는 진행 방향의 수직인 옆으로의 미끄러짐이다. 또한 $\psi(q, \mu) = [-\mu \sin \theta, \mu \sin \theta, 0]^T$ 는 섭동된 비홀로노믹 제약성으로부터 유도된 매치되지 않은 외란 벡터이고 μ 는 옆으로의 미끄러짐 속도이다. slipping과 skidding 현상 모두를 고려한 이동 로봇을 제어하기 위해서는 식 (2)의 ζ 와 ψ 를 고려하여 제어를 설계해야 한다.

3. 미끄러짐을 고려한 이동 로봇의 제어 기술 동향

미끄러짐을 고려한 이동 로봇의 자동 제어 기술은 미끄러짐 효과의 유계성에 기반하여 설계된다. 초기의 연구들은 유계된 미끄러짐의 정보를 이용가능하다는 가정 하에



(a)



(b)

그림 5 (a) 이동 로봇 시스템 (b) 실험 장소

비선형 모델인 식(2)을 제어하고자 하는 연구가 수행되었다[7,8]. 또한 미끄러짐을 측정하기 위해 GPS(global positioning system)를 이용한 제어 기법이 소개되었다[9,10]. 그림 5에서는 GPS 정보를 이용한 제어 기법의 실험용 로봇과 실험 장소를 보여준다. 그러나 미끄러짐 정보가 정확히 알려진다는 가정은 비현실적이고 미끄러짐 측정을 위해 GPS나 다른 센서를 사용하는 것은 센서 비용 및 센서 잡음을 유발한다. 따라서 최근에는 미끄러짐 요소의 정보가 측정불가능하다는 가정을 적용한 이동 로봇의 자동 제어 기법이 소개되었다. 미끄러짐 요소의 유계를 적용 기법으로 예측하여 그 정보를 이용한 적응 슬라이딩 모드가 소개되었다[11]. 이 연구에서는 미끄러짐을 고려한 이동 로봇 모델의 동역학식이 유도되었으며, 이를 이용하여 운동학식과 동역학식 모두를 고려하였다. 운동학식 (2)을 이용하여 동역학식을 유도하면 동역학식의 비선형성과 미지의 미끄러짐 요소간의 결합 항들이 나타나게 되고 이를 고려하여 제어기를 설계하는 것이 중요하다. 이와 같은 결합 항들을 미지의 비선형 함수로 고려하여 신경회로망이나 퍼지시스템과 같은 함수 근사자를 이용한 지능 제어 기법도 연구되고 있다[12,13]. 이와 같은 연구와 더불어 미지의 미끄러짐을 갖는 이동 로봇의 장애물 회피에 대한 연구도 병행되고 있다[13]. 최근에는 미지의 미끄러짐을 고려한 다수의 이동 로봇의 군집 제어에 대한 연구도 활발히 수행되고 있다[14].

참고문헌

- [1] J. M. Yang and J. H. Kim, "Sliding mode control of trajectory tracking of nonholonomic wheeled mobile robots," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 15, no. 3, pp. 578-587, 1999.
- [2] D. Chwa, "Sliding-mode control of nonholonomic wheeled mobile robots in polar coordinates," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 12, no. 4, pp. 637-644, 2004.
- [3] B. S. Park, S. J. Yoo, J. B. Park, and Y. H. Choi, "Adaptive neural sliding mode control of nonholonomic wheeled mobile robots with model uncertainty," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 17, no. 1, pp. 207-214, 2009.
- [4] T. Fukao, H. Nakagawa, and N. Adachi, "Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 16, no. 5, pp. 609-615, 2000.
- [5] R. Fierro and F. L. Lewis, "Control of a nonholonomic mobile robot using neural networks," *IEEE Trans. on Neural Networks*, vol. 9, no. 4, pp. 589-600, 1998.
- [6] S. J. Yoo, Y. H. Choi, and J. B. Park, "Generalized predictive control based on self-recurrent wavelet neural network for stable path tracking of mobile



- ✦robots: adaptive learning rates approach,” IEEE Trans. Circuit and Systems I, Regular Paper, vol. 53, no. 6, pp. 1381-1394, 2006.
- [7] D. Wang and C. B. Low, “Modeling and analysis of skidding and slipping in wheeled mobile robots: control design perspective,” IEEE Trans. on Robotics, vol. 24, no. 3, pp. 676-687, 2008.
- [8] C. B. Low and D. Wang, “Maneuverability and path following control of wheeled mobile robot in the presence of wheel skidding and slipping,” Journal of Field Robotics, vol. 27, no. 2, pp. 127-144, 2010.
- [9] C. B. Low and D. Wang, “GPS-based path following control for a car-like wheeled mobile robot with skidding and slipping,” IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., vol. 16, no. 2, pp. 340-347, 2008.
- [10] C. B. Low and D. Wang, “GPS-based tracking control for a car-like wheeled mobile robot with skidding and slipping,” IEEE Trans. on Mechatronics, vol. 13, no. 4, pp. 480-484, 2008.
- [11] S. J. Yoo, “Adaptive tracking control for a class of wheeled mobile robots with unknown skidding and slipping,” IET Control Theory and Applications, vol. 4, no. 10, pp. 2109-2119, Oct. 2010.
- [12] S. J. Yoo, “Approximation-based adaptive control for a class of mobile robots with unknown skidding and slipping,” International Journal of Control, Automation, and Systems, vol. 10, no. 4, pp. 703-710, Aug. 2012.
- [13] S. J. Yoo, “Adaptive neural tracking and obstacle avoidance of uncertain mobile robots with unknown skidding and slipping,” Information Sciences, vol. 238, pp. 176-189, Jul. 2013.
- [14] S. J. Yoo, B. S. Park, “Formation tracking control for a class of multiple mobile robots in the presence of unknown skidding and slipping,” IET Control Theory and Applications, vol. 7, no. 5, pp. 635-645, Mar. 2013.