

운용자 중심의 차동바퀴형 모바일 로봇 조종을 위한 속도 제어 알고리즘⁺

(Velocity Control Algorithm for Operator-centric Differential-Drive
Mobile Robot Control)

김 동 환¹⁾, 이 동 현^{2)*}

(Dong-Hwan Kim and Dong-Hyun Lee)

요 약 본 논문에서는 물류창고, 제조업, 협업 로봇 등 다양한 애플리케이션에 활용되고 있는 비홀로노믹 제약을 가진 차동 바퀴형 모바일 로봇의 용이한 운용을 위한 로컬 속도 생성 제어 알고리즘을 제안한다. 기존의 차동 바퀴형 모바일 로봇 운용 방법은 운용자가 자신의 좌표계가 아닌 로봇의 좌표계를 기준으로 인지하고 로봇의 속도를 직접 생성해야 하였으며, 이로 인해 운용의 직관성이 낮아지고 업무의 효율 저하 및 사고 발생률이 증가하게 된다. 본 연구에서는 이를 개선하여 운용자가 자신의 좌표계를 기준으로 로봇을 운용할 수 있도록 한다. 제안하는 알고리즘은 실제 차동 바퀴형 모바일 로봇을 활용한 실험을 통하여 알고리즘의 효용성을 검증한다.

핵심주제어: 차동 바퀴형 모바일 로봇, 비홀로노믹 제약, 역미분 모바일 로봇 기구학

Abstract This paper proposes an operator-centric velocity generation and control algorithm for differential-drive mobile robots, which are widely used in many industrial applications. Most of the previous works use a robot centric velocity generation and control for the operators to control the differential-drive mobile robots, which makes the robot control difficult for the operators. Such robot-centric control can cause the increase of accidents and the decrease of work efficiency. The experimental results with a real differential-drive mobile robot testbed demonstrate the efficiency of operator-centric mobile robot control.

Keywords: Differential-drive mobile robot, Nonholonomic constraints, Inverse differential mobile robot kinematics

1. 서 론

* Corresponding Author: donglee@kumoh.ac.kr

+ 이 연구는 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음 (2019-104-026)

Manuscript received August 28, 2019 / accepted October 02, 2019

1) 금오공과대학교 전자공학부, 제1저자

2) 금오공과대학교 IT 융복합공학과, 교신저자

차동 바퀴형 모바일 로봇 플랫폼은 단순한 기구학적 특성에 비해 효율적인 선속도, 각속도 제어, 및 기계적인 제작의 용이함으로 인해 다양한 분야에서 활용되고 있는 형태의 모바일 로봇 플랫폼이다. 특히 4차 산업혁명으로 인해 제조업, 물류 창고, 스마트 팩토리 등에 대표적인 모바일 로봇 플랫폼으로 활용되고 있다. 기존의 모바일 로봇의 연구는 로봇이 외부와의 충돌 없

이 스스로 주어진 목적지까지 도달하기 위한 네비게이션의 요소기술들에 대한 연구가 활발히 진행되었다(Durrant-Whvte and Bailey, 2006; Choset et al., 2005; Thrun et al., 2005; Siegwart et al., 2004; Tack and Kwon, 2014). 하지만 실제 모바일 로봇의 활용에 있어, 운용자가 원격지 또는 운용자의 시야 범위에 있는 모바일 로봇을 직관적으로 조종해야 하는 경우가 자주 발생한다. 이 경우 운용하고자 하는 모바일 로봇의 기구학적 제약이 중요한 요소이며, 이러한 제약을 고려함과 동시에 운용자가 직관적으로 모바일 로봇을 제어할 수 있는 방법이 필요하다.

Fig. 1은 운용자가 모바일 로봇을 제어하는 다양한 접근법을 보여준다. Fig. 1(a)의 경우 운용자가 최종 목적지만을 결정하고 모바일 로봇이 환경의 지도와 자신의 위치, 글로벌 및 로컬 플래닝 알고리즘을 사용하여 직접 경로를 생성하고 이동하는 방식이다(Levinson et al., 2011; Siegwart et al., 2004). 이와 같은 접근 방식의 경우 운용자의 간섭이 최소화되도록 로봇을 운용할 수 있다는 장점이 있으나 운용자가 정밀하게 특정 경로를 이동하도록 로봇을 제어할 수 있는 제어권이 없으며, 따라서 운용자가 직관적인 로봇 제어를 하기 어렵다. 또한, 작업 환경의 정밀 지도 및 정밀 위치 인식 알고리즘을 필요로 한다. Fig. 1(b)의 경우 운용자가 Waypoints를 지정하고 이동로봇이 순차적으로 Waypoints를 방문하는 방식이다 (Davies and Jnifene, 2006). 이 방식의 경우 Fig. 1(a)의 방식에서 다수의 중간 목적지를 지정하는 방식이므로 Fig. 1(a)의 방식과 유사한 장단점을 가진다. Fig. 1(c)의 경우 운용자가 고정된 위치에서 시각을 통하여 로봇의 이동을 파악하고 로봇의 좌표계를 기준으로 속도 명령을 보내는 방식이다. 이 접근법의 경우 운용자가 로봇을 제어할 수 있는 자유도가 매우 높아서 운용자의 요구에 맞추어 정밀한 제어가 가능하다. 하지만 운용자가 로봇의 좌표계를 기준으로 속도 명령을 생성해야 하므로 직관적인 제어가 어렵다. 예를 들어 로봇의 정면이 운용자의 정면과 마주할 경

우 운용자가 로봇을 왼쪽으로 이동시키기 위하여 조종기를 오른쪽으로 움직여야 한다. 이와 같은 운용자의 좌표계와 로봇 좌표계의 각도 차이로 인해 운용자가 직관적으로 로봇을 제어하기에 어려움이 있다. Fig. 1(d)이 경우 운용자가 로봇의 본체에 장착된 FPV(First person view) 카메라를 사용하여 로봇의 좌표계 기준으로 제어를 하는 접근법이다(Scholtz et al., 2004). 이와 같은 방식의 경우 운용자가 로봇의 좌표계 관점에서 외부 환경을 인식하게 되므로 직관적인 조종이 가능하다. 하지만 운용자가 FPV 고글을 착용해야 하므로 운용자의 시야 범위가 제한된다. 그 외에 사용자의 손 제스처나 시선을 인식하여 제어하는 방식이 제안되었으나 로봇에 장착된 카메라의 시야 범위가 카메라의 렌즈와 해상도에 의해 제한되는 단점이 있다(Park et al., 2008; Kim et al., 2009).

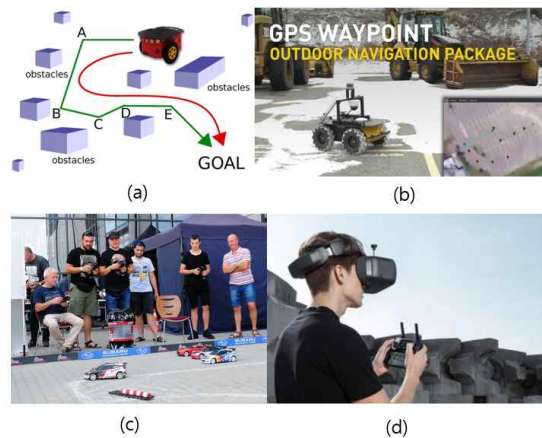


Fig. 1 Various Approaches for Mobile Robot Control.
 (a) Start-Goal Based Approach, (b) Waypoint Based Approach, (c) Vehicle-centric Approach, (d) FPV (First Person View) Based Approach

본 논문에서는 비홀로노믹 제약을 가지는 차동 바퀴형 로봇에 대한 직관적 제어를 하기 위한 알고리즘을 제안한다. 차동 바퀴형 모바일 로봇에서 비홀로노믹 제약은 로봇의 바퀴회전의 수직인 축으로 이동할 수 없는 제약을 의미한다. 이러한 제약은 운용자의 좌표계 기준에서 정의된 속도 명

령을 로봇의 좌표계의 속도 명령으로 변환하는 과정에서 로봇의 옆 방향의 속도가 생성되더라도 모바일 로봇이 옆 방향으로 이동할 수 없는 상황을 야기한다. 본 연구에서는 운전자 좌표계에서 정의된 속도 명령을 차동 바퀴형 모바일 로봇이 추종할 수 있도록 변환하는 알고리즘을 제안하며, 이를 통해 사용자가 직관적으로 차동 바퀴형 모바일 로봇을 용이하게 제어할 수 있도록 한다.

2. 로봇 속도 변환 알고리즘

논홀로노믹 모바일 로봇의 경우 2개의 바퀴가 하나의 축으로 연결되어 있으며, 바퀴의 반지름이 r_w , 각 바퀴와 로봇 중심 간의 거리를 b , 오른쪽, 왼쪽 바퀴의 회전속도를 각각 ϕ_r, ϕ_l 이라고 할 때, 로봇 좌표계 (=로컬 좌표계)에서의 로봇의 속도는 식(1)과 같이 정의된다.

$$\dot{X}_R = r_w \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{2b} & \frac{-1}{2b} \end{bmatrix} \dot{\Phi} \quad (1)$$

식(1)에서 $\dot{X}_R = [\dot{x}_R \ \dot{y}_R \ \dot{\theta}]^T$ 이고 $\dot{\Phi} = [\dot{\phi}_r \ \dot{\phi}_l]^T$ 이다. \dot{x}_R, \dot{y}_R 은 로봇 좌표계 기준으로 한 로봇의 로컬 속도이다. $\dot{\theta}$ 는 로봇의 회전속도이며, 이는 글로벌 좌표계(=운전자 좌표계)와 로봇 좌표계에서 동일하다. 차동 바퀴형 모바일 로봇의 경우 로봇 좌표계에서 y축에 대한 속도는 항상 0이어야 한다. 글로벌 좌표계를 기준으로 로봇 좌표계와의 각도를 θ 로 정의하고 회전 변환 행렬을 $R(\theta)$ 정의할 경우 글로벌 좌표계와 로봇 좌표계 간의 속도는 식(2)를 만족한다.

$$\dot{X}_R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dot{X}_G \quad (2)$$

식(2)를 정리하면 로봇 좌표계의 y축에 대한 속도는 식(3)-(4)와 같다.

$$\dot{x}_R = \dot{x}_G \cos(\theta) + \dot{y}_G \sin(\theta) \quad (3)$$

$$\dot{y}_R = -\dot{x}_G \sin(\theta) + \dot{y}_G \cos(\theta) \quad (4)$$

하지만 차동 바퀴형 모바일 로봇의 경우 식(1)에서와 같이 $\dot{y}_R = 0$ 의 비홀로노믹 제약으로 인해 임의의 글로벌 좌표계 기준의 속도를 입력으로 사용할 경우 식(4)로 생성된 로봇 좌표계의 속도를 직접 사용할 수 없다. 따라서 차동 바퀴형 모바일 로봇의 비홀로노믹 제약조건을 만족하게 하면서 동시에 글로벌 좌표계의 속도를 만족시킬 수 있는 변환과정이 필요하다. 이를 위하여 식(4)와 $\dot{y}_R = 0$ 을 결합하여 식(5)의 목표각도, θ_T 를 정의한다.

$$\theta_T = \text{atan2}(\dot{y}_G, \dot{x}_G) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{\dot{y}_G}{\dot{x}_G}\right) & \text{if } \dot{x}_G > 0, \\ \arctan\left(\frac{\dot{y}_G}{\dot{x}_G}\right) + \pi & \text{if } \dot{x}_G < 0 \text{ and } \dot{y}_G \geq 0, \\ \arctan\left(\frac{\dot{y}_G}{\dot{x}_G}\right) - \pi & \text{if } \dot{x}_G < 0 \text{ and } \dot{y}_G < 0, \\ +\frac{\pi}{2} & \text{if } \dot{x}_G = 0 \text{ and } \dot{y}_G > 0, \\ -\frac{\pi}{2} & \text{if } \dot{x}_G = 0 \text{ and } \dot{y}_G < 0, \\ \theta & \text{if } \dot{x}_G = 0 \text{ and } \dot{y}_G = 0 \end{cases} \quad (5)$$

따라서 식(4)의 결과로 $\dot{y}_R \neq 0$ 인 경우 로봇 좌표계와 글로벌 좌표계 간의 각도를 θ_T 로 변환함과 동시에 로봇 좌표계에서의 x축 속도를 생성해야 한다. 로봇에 전달되는 최종 명령 속도인 $\dot{X}_R^{CMD} = [\dot{x}_R^{CMD} \ 0 \ \dot{\theta}^{CMD}]^T$ 는 식(6)-(7)과 같다.

$$\dot{x}_R^{CMD} = \begin{cases} \dot{x}_R & \text{if } \dot{x}_G \cos(\theta) + \dot{y}_G \sin(\theta) > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$\dot{\theta}^{CMD} = \alpha \Delta \theta \quad (7)$$

식(6)은 로봇의 이동 방향이 항상 로봇 좌표계에서 +x축으로 향하게 하기 위함이며, 식(7)

에서 $\Delta\theta = \theta_T - \theta$ 이며, 로봇이 현재 각도인 θ 에서 목표 각도인 θ_T 에 도달하기 위하여 생성하는 각속도이다. 식(7)에서 α 는 비례상수로 로봇의 성능과 작업 환경에 따라 실험적으로 결정된다. α 의 값이 클수록 로봇이 회전 시 빠르게 회전하여 회전반경이 작아지므로 로봇의 작업 환경이 복잡할 경우 유리하고 α 가 작을수록 목표 각도에 도달하기 위한 각속도가 작아져서 회전반경이 커지게 되므로 로봇의 작업 환경에 장애물이 적을 경우 유리하다. Fig. 2에 글로벌 속도 좌표계와 로봇 속도 좌표계에 따른 \dot{X}_G , \dot{X}_R , θ_T 및 θ 의 관계를 나타내었다.

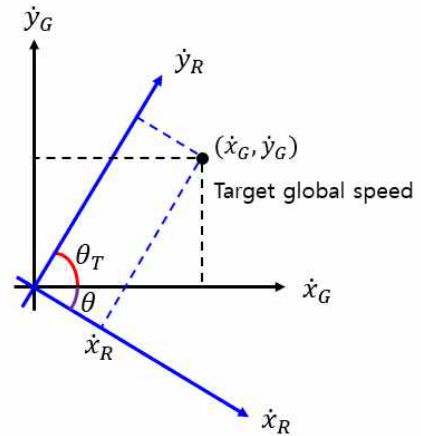


Fig. 2 Goal Velocity in the Global Frame and the Local(robot) Frame

3. 실험

3.1 ROS 기반 로봇 플랫폼

제안한 알고리즘의 실험을 위하여 ROS (Robot Operating System) 기반의 로봇 플랫폼인 Turtlebot3 Burger를 사용하였다. ROS는 로봇의 운용을 위한 메타 운영체제이며, Node 기반의 분산 프레임워크 이다(Quigley et al., 2009). Fig. 3의 Turtlebot 3 Burger는 가로 \times 세로 \times 높이 = 138mm \times 178mm \times 192mm의 소형 교육용 플랫폼으로 라즈베리 파이3를 Single Board Computer로 사용하며, ROS 기반으로 운용이 가능하다. 해당 로봇의 최대 선속도는 0.22m/s, 최대 각속도는 2.84rad/s이며 바퀴 반지름은 33mm, 바퀴 간 거리는 160mm이다.

제안하는 알고리즘의 경우 식(2)와 같이 글로벌 프레임 기준으로 제공된 사용자의 속도 명령을 로봇 프레임으로 변환해야 하므로 글로벌 프레임과 로봇 프레임 간의 각도가 필요하다. 이를 위하여 ROS에서 제공하는 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 알고리즘인 Gmapping package를 사용하여 Fig. 4의 실험환경에서 지도를 생성하였다(Grisetti et al., 2007). 이와 같이 생성된 지도 상에서 로봇의 위치를 추정하기 위해 ROS의 Navigation Stack에 포함된 AMCL(Adaptive Monte Carlo

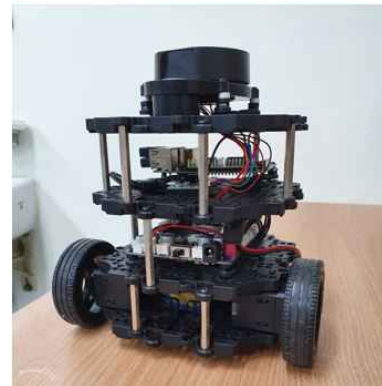


Fig. 3 Turtlebot 3 Platform

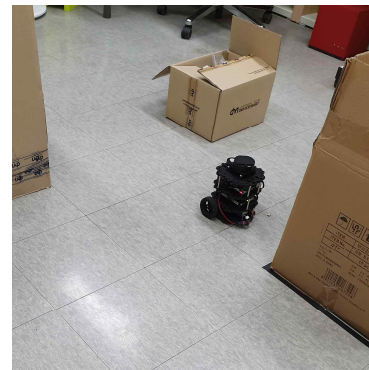


Fig. 4 Experiment Setup for Robot Control Test

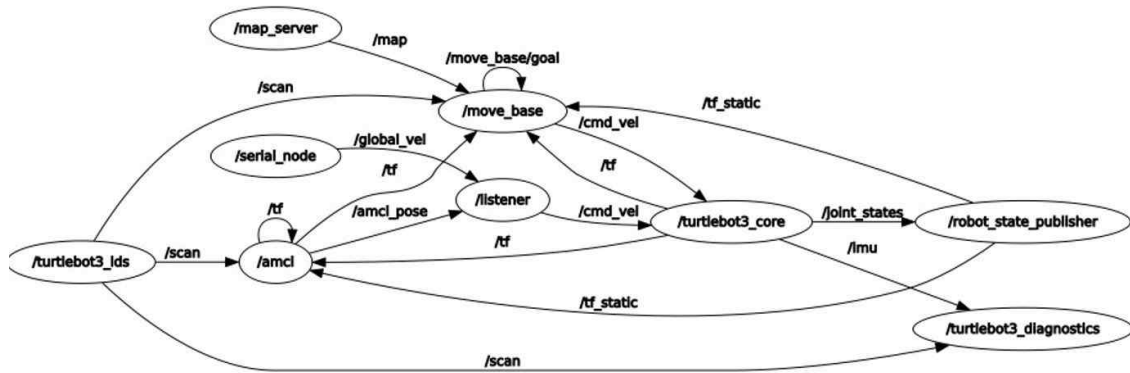


Fig. 5 ROS Node Graphs

* Proposed algorithm is implemented in the “/listener” node.

localization) 알고리즘을 사용하였다(Fox, 2002).

Fig. 5는 실험에서 사용된 ROS 노드들의 연결 관계를 보여준다. Map_server 노드는 SLAM으로 미리 생성한 환경의 지도를 제공하는 노드이며 amcl 노드는 지도를 바탕으로 로봇의 위치를 추정하는 노드이다. Serial_node 노드는 사용자가 조이스틱을 사용하여 자신의 좌표계인 글로벌 좌표계 기준으로 x축, y축에 대

한 속도를 입력하면 이를 수신하여 global_vel의 ROS topic으로 publish 하는 노드이며, Listener 노드는 사용자가 전송한 글로벌 좌표계에서의 속도인 global_vel 값을 subscribe하여 로봇 좌표계의 속도로 변환한 후 cmd_vel의 ROS topic으로 publish하는 노드이다.

실험에서는 운용자의 시야 범위 내에서 로봇의 위치를 확인하고 운용자 좌표계 기준으로 속도 명령을 로봇에게 보내어 로봇이 장애물을 한 바퀴 회전하도록 조종하였으며 식(6)의 α 는 1.0으로 설정하였다. 실험결과는 Fig. 6과 같이 지도 상에서 로봇이 이동한 궤적을 ROS의 visualization tool인 Rviz를 이용하여 나타내었다. Fig. 6의 실험결과와 같이 운용자가 글로벌 좌표계 기준으로 생성한 속도로 로봇이 이동하여 지도상의 사각형 장애물을 한 바퀴 회전함을 확인하였다.



Fig. 6 Rviz Visualization of Robot Trajectory.

4. 결 론

본 논문에서는 운용자가 비홀로노믹 제약을 가지는 차동 바퀴형 모바일 로봇을 운용자 관점에서 직관적으로 제어할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 이를 위하여 글로벌 좌표계에서의 로봇의 현재 각도와 목표 속도에 대한 각도 차이를 기반으로 목표 회전 각도를 생성하고, 이를 최소화하는 과정에서 로봇의 비홀로노믹 제약을

고려하여 글로벌 좌표계에서 생성된 속도 명령을 로봇 좌표계로 변환할 수 있도록 하였다. 제안하는 알고리즘은 모바일 ROS와 Turtlebot3 로봇 플랫폼을 활용하여 실제 실험을 수행함으로써 운용자가 직관적으로 로봇을 운용할 수 있음을 확인하였다.

추후 연구로는 제안하는 알고리즘을 다양한 형태의 바퀴형 로봇으로 확장하고 운용자의 동적인 움직임을 감지하여 운용자와 로봇 간의 좌표변환을 실시간으로 고려하여 로봇의 속도를 실시간으로 생성할 수 있는 제어 알고리즘을 개발하고자 한다.

References

- Choset, H. M., Hutchinson, S., Lynch, K. M., Kantor, G., Burgard, W., Kavraki, L. E. and Thrun, S. (2005). *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementation*, Massachusetts, MIT press.
- Davies, T. and Jnifene, A. (2006) Multiple Waypoint Path Planning for a Mobile Robot using Genetic Algorithms, *IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications*, July. 12-14, La Coruña, Spain, pp. 21 - 26.
- Durrant-Whyte, H. and Bailey, T. (2006). Simultaneous Localization and Mapping: Part I, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(2), 99-110.
- Fox, D. (2002). KLD-sampling: Adaptive Particle Filters, *Advances in Neural Information Processing Systems*, December. 9-14, Vancouver, British Columbia, Canada, pp. 713 - 720.
- Grisetti, G., Stachniss, C. and Burgard, W. (2007). Improved Techniques for Grid Mapping with Rao-Blackwellized Particle Filters, *IEEE Transactions on Robotics*, 23(1), 34-46.
- Kim, T.-U., Lee, S.-Y., Kwon, K.-S. and Park, S.-H. (2009). Autonomous Wheelchair System using Gaze Recognition, *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 14(4), 91-100.
- Levinson, J., Askeland, J., Becker, J., Dolson, J., Held, D., Kammel, S. and Sokolsky, M. (2011). Towards Fully Autonomous Driving: Systems and Algorithms, *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV)*, June. 6 - 8, Baden-Baden, Germany, pp. 163-168.
- Park, S.-H., Kim, T.-U. and Kwon, K.-S. (2008). Hand Gesture Based a Pet Robot Control, *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 13(4), 145-154.
- Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R. and Scaramuzza, D. (2004). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, Massachusetts, MIT Press.
- Scholtz, J., Young, J., Drury, J. L. and Yanco, H. A. (2004). Evaluation of Human-robot Interaction Awareness in Search and Rescue, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April. 26-May. 1, New Orleans, LA, USA. pp. 2327-2332.
- Tack, H. H. and Kwon, S. G. (2014). Driving Control of Automated Guided Vehicle using Centroid of Gravity Method, *Korea Industrial Information Systems Research*, 19(2), 59-66.
- Thrun, S., Burgard, W. and Fox, D. (2005). *Probabilistic Robotics*, Massachusetts, MIT Press.
- Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J. and Ng, A. Y. (2009). ROS: an Open-source Robot Operating System, *ICRA Workshop on Open Source Software*, May. 17, Kobe, Japan.



김 동 환 (Dong-Hwan Kim)

- 금오공과대학교 전자공학부
학사 과정
- 관심분야 : 로봇틱스, 사물인
터넷, 임베디드 시스템



이 동 현 (Dong-Hyun Lee)

- 정회원
- 한국과학기술원 전기및전자공학부
박사
- 금오공과대학교 전자공학부, IT
융복합공학과 조교수
- 관심분야 : 로봇틱스, 사물인
터넷, 임베디드 시스템