

6-wheel 소형 모바일 로봇 플랫폼 개발과 슬립률 추정

Development of Six-wheeled Small Mobile Robot Platform and Slip Ratio Estimation

저자 (Authors)	오세웅, Hussein F. M. Ali, 김수진, 김영식 Sewoong Oh, Hussein F. M. Ali, Soojin Kim, Youngshik Kim
출처 (Source)	대한기계학회 논문집 A권 45(3) , 2021.3, 247-257 (11 pages) Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A 45(3) , 2021.3, 247-257 (11 pages)
발행처 (Publisher)	대한기계학회 The Korean Society of Mechanical Engineers
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10532995
APA Style	오세웅, Hussein F. M. Ali, 김수진, 김영식 (2021). 6-wheel 소형 모바일 로봇 플랫폼 개발과 슬립률 추정. 대한기계학회 논문집 A권, 45(3), 247-257.
이용정보 (Accessed)	한밭대학교 203.230.96.*** 2021/04/26 09:44 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독 계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2021.45.3.247>

ISSN 1226-4873(Print)

2288-5226(Online)

6-wheel 소형 모바일 로봇 플랫폼 개발과 슬립률 추정

오세웅* · Hussein F. M. Ali** · 김수진*** · 김영식†

* 한밭대학교 기계공학과, ** 이집트 반하대학교 기계공학과, *** 한밭대학교 창의융합학과

Development of Six-wheeled Small Mobile Robot Platform and Slip Ratio Estimation

Sewoong Oh*, Hussein F. M. Ali**, Soojin Kim*** and Youngshik Kim†

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat Nat'l Univ.,

** Dept. of Mechanical Engineering, Benha Univ., Benha, Egypt,

*** Dept. of Create Convergence Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

(Received October 5, 2020 ; Revised December 17, 2020 ; Accepted December 21, 2020)

Key Words: Mobile Robot(모바일 로봇), State Estimation(상태 추정), Kalman Filter(칼만 필터), Slip Ratio(슬립률)

초록: 본 연구에서는 험지 주행을 위한 6-wheel 소형 모바일 로봇 플랫폼을 개발하고 로봇의 속도와 가속도 및 슬립률을 추정한다. 실제 험지 주행에 사용되는 관절형 현수장치(RVAS: robot vehicle with articulated suspension)가 장착된 차량을 분석하고, 스케일을 줄여 소형 RVAS 모바일 로봇을 설계한다. 그리고 3D 프린팅 기술을 적용하여 모델링한 모바일 로봇을 제작한다. 소형 모바일 로봇의 물리적 제약과 적용 가능한 센서를 고려하여, 한 개의 마이크로 컨트롤러와 6개의 홀센서 엔코더, 한 개의 IMU 센서를 이용한다. 또한, 취득한 센서 데이터의 노이즈를 제거하고, 센서 추정을 개선하기 위해 칼만 필터(Kalman filter) 기반 추정기를 적용한다. 실험을 통하여 각 바퀴의 회전속도와 IMU 센서로부터 측정된 로봇 선형 속도를 사용하여 각 바퀴의 슬립률을 추정한다.

Abstract: In this study, a six-wheeled small mobile robot platform for rough terrain is developed. Speeds, accelerations, and slip ratios of the robot are estimated. We analyzed a vehicle with an articulated suspension (RVAS: robot vehicle with articulated suspension) for actual rough terrain. We then design a small RVAS mobile robot by reducing the scale. The mobile robot is modeled and fabricated by using 3D printing technique. Considering physical limitations of small mobile robots and available sensors, one microcontroller, six hall sensor encoders, and one IMU sensor are used. A Kalman filter-based estimator is also used to remove noise from the acquired data and improve estimation of the robot states. The slip rate of each wheel is experimentally estimated by using the angular velocity of each wheel and the linear velocity of the robot acquired from the IMU sensor.

1. 서론

모바일 로봇(mobile robot)은 접근하기 힘든 위험한 작업을 위해 다양한 형태로 개발되었다. 현재에도 모바일 로봇은 포장도로뿐만 아니라 험지와 같은 다양한 분야에서 활용 및 연구가 활발히 진행되고 있다. 군사 및 산업 목적⁽¹⁾ 또는 위험

지역,⁽²⁾ 외계 행성 탐사 등 다양한 목적을 수행하기 위한 무인 모바일 로봇의 필요성은 꾸준히 제기되고 있다.⁽³⁾ 특히 소형 모바일 로봇은 낮은 비용으로 인간이 물리적으로 진입하기 어려운 지역에서 작업을 수행할 수 있어 로봇의 다양한 산업에서 수요가 증가하고 있다.

본 연구에서는 험지 주행을 위한 6-wheel 모바일 로봇 플랫폼을 개발한다. 6개의 바퀴가 각각 독립적으로 구동하는 6-wheel 차량의 이점으로는

† Corresponding Author, youngshik@hanbat.ac.kr

© 2021 The Korean Society of Mechanical Engineers

탱크와 같은 궤도차량이 보유하는 제자리 선회 능력 및 험지 주행 능력을 갖춘다. 그리고 6-wheel 차량은 하중을 전·후륜뿐만 아니라 중륜에도 배분함으로써 급가속 시나 급제동 시의 피치각을 감소시키는 구조적 안정성을 지닌다. 또한, 다수의 휠을 구동시키므로 다양한 부하 조건과 험로를 극복하며, 험지 환경에서 신속한 회피 기동이 가능하다.⁽⁴⁾ 본 연구에서는 Fig. 1⁽⁵⁾처럼 실제 험지 주행에 사용하는 관절형 현수장치(RVAS: robot vehicle with articulated suspension)가 있는 차량을 분석하고, 스케일을 줄여 상사 모델을 설계 및 제어한다. 예시로 든 Fig. 1은 바퀴가 달린 관절형 현수장치가 개별적으로 움직이며 장애물을 극복한다. 이처럼 관절형 현수 장치를 이용한 6-wheel은 험지 및 험지 환경에서 효율적인 주행이 가능하다.

본 연구에서는 Kalman 필터를 적용하여 소형 6-wheel 모바일 로봇의 상태를 추정한다. 로봇의 상태는 제어기의 피드백 및 슬립률 추정에 활용된다. 소형 모바일 로봇의 제어에 관한 연구는 국내에서 많이 수행되어왔다. 하지만, 소형 모바일 로봇의 상태추정에 관한 연구는 상대적으로 많이 수행되지 않았다. 모바일 로봇과 유사한 차량의 상태 추정 연구에서는 차량용 레이더 센서,⁽⁶⁾ 위성 항법 시스템(GPS: global positioning system)^(7,8) 등 일반적으로 사용한다. 하지만, 이러한 센서들은 크기, 중량 등의 제약으로 소형 모바일 로봇에 적용하기 어렵다. 따라서 소형 모바일 로봇의 효율적인 제어를 위한 선행 연구로써 부피가 작고 최소한의 센서만으로 로봇의 상태 및 동적 특성 추정에 관한 연구를 진행할 필요가 있다.

본 연구에서는 험지 및 미끄러짐이 발생하는 지형에서 효율적인 조향과 구동을 위해서 소형 모바일 로봇에 대한 슬립률(slip ratio)을 추정한다. TCS(traction control system)나 ABS(anti-lock brake system) 등 능동형 차량 안전 시스템에서 주요 input은 슬립률이며, 슬립은 조향과 가속에 있어 중요한 정보이다. 이 때문에 차량의 슬립률 기반 추측방법⁽⁹⁾이나 주행제어 알고리즘⁽¹⁰⁾ 개발 등 안정적인 주행 제어와 자율주행의 선행 연구로 슬립률을 이용한 연구가 많이 발표되었다. 이를 위해 차량의 운동 상태 추정 기법으로 Kalman 필터가 널리 사용되었다.^(6,10) 본 연구에서도 소형



Fig. 1 Six-wheeled robot vehicle with articulated suspension (RVAS)

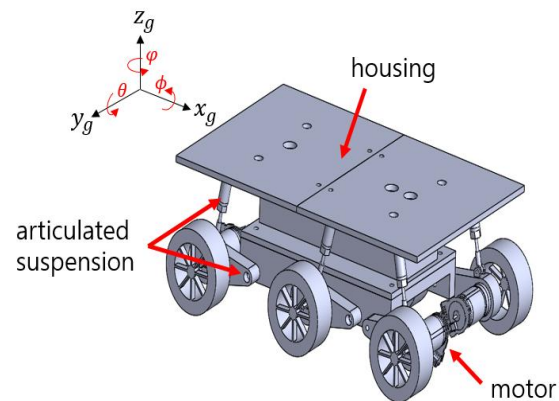


Fig. 2 Modeling of a small six-wheeled mobile robot

모바일 로봇을 위한 Kalman 필터 기반 추정기를 제작하여 각 바퀴의 회전량-각속도-각가속도와 로봇의 슬립률을 추정하는 알고리즘을 개발한다.

2. 모바일 로봇 설계 및 제어

2.1 모바일 로봇 설계 및 제작

Fig. 1과 같은 관절형 현수장치가 있는 차량과 유사하게 6-wheel 모바일 로봇 플랫폼을 설계 및 제작한다. 로봇의 구조는 크게 바퀴와 차체를 받쳐주는 하부시스템, 차체를 이루는 프레임과 커버, 바퀴형 가변 현수 장치를 위한 서스펜션과 암(arm), 구동하기 위한 모터와 바퀴로 구성된다.

Fig. 2는 실제 로봇의 주요 파트들을 CAD 툴을 이용하여 소형 모바일 로봇에게 맞게 모델링한 것이다. CAD 툴로 모델링한 소형 모바일 로봇의 파트는 FDM(fused deposition modeling) 방식 3D printer를 이용하여 출력한다.

모바일 로봇의 모터를 선정을 위해 바퀴의 최

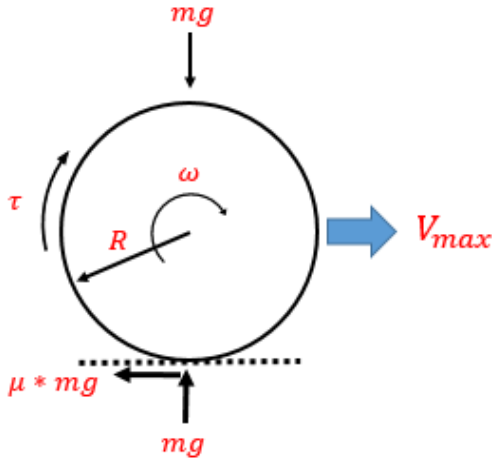


Fig. 3 Free body diagram of a wheel

대 속도 V_{max} 는 슬립이 없는 환경에서 일반 성인의 걷는 속도인 4 km/h로 고려한다. 이 때문에 V_{max} 의 목표치를 1.11 m/s로 선정하였고, 식 (1), (2)와 Fig. 3을 사용하여 바퀴의 분당 회전수 RPM과 정격 토크 τ 를 구한다.

$$RPM = \frac{V_{max} \times 60}{2 \times \pi \times R} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{\mu \times m \times g \times R}{N} \quad (2)$$

식 (2)에서 μ 는 지면과 바퀴 사이의 마찰계수이다. 일반적으로 건조한 포장도로는 마찰계수가 0.8~1이므로 원활한 구동을 하기 위해 μ 를 1로 선정한다. 또한, m 은 로봇 질량이고 계산된 로봇의 예상 질량은 3 kg이다. g 는 중력 가속도, N 은 바퀴의 개수, R 는 바퀴의 반지름이며 설계 치수는 0.032 m이다. 계산 결과, 필요한 정격 토크 τ 는 0.15696 N·m이고 4 km/h로 주행하기 위한 바퀴의 분당 회전수는 332 RPM이다. 설계한 모바일 로봇은 모터가 직접 바퀴에 동력을 전달하는 방식이다. 동력전달을 위한 추가적인 장치나 기어가 없기 때문에 기어비를 따로 고려하지 않는다. 이에 따라 선정한 모터의 사양은 Table 1과 같고, 설계한 소형 모바일 로봇의 사양은 Table 2와 같다. Fig. 4는 실제 제작한 소형 모바일 로봇이다.

2.2 컨트롤러 H/W 구성

소형 모바일 로봇은 크기가 작아 설치 공간의

Table 1 Specifications of the wheel motor

Category	Value
Rated voltage	12.0 V
Rated current	1.5 A
Rated torque	0.34335 N·m
Rated rpm	350 RPM
Speed reduction ratio	1:34.02
Encoder resolution	Hall sensor: 11 PPR; considering the speed reduction ratio, 374.22 PPR

Table 2 Specifications of mobile robot

Category	Value
Size	330×206×123 mm
Maximum speed	4 km/h
Motor	DC Motor 8 W 12 v
Weight	2,413 g
Tire diameter	64 mm
Micro-controller	Arduino due

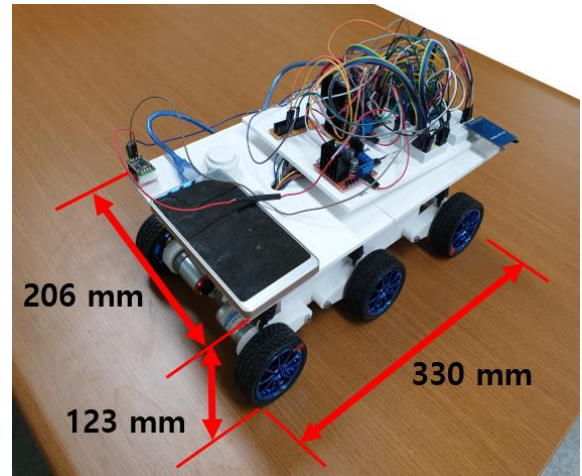


Fig. 4 Six-wheeled mobile robot prototype

물리적 제약이 있다. 이 때문에 제어기 및 센서의 부피와 무게를 고려하여야 한다. 소형 6-wheel 로봇에서 최소한의 컨트롤러와 센서를 이용하여 로봇의 상태를 추정하기 위해 본 연구에서는 한 개의 마이크로 컨트롤러와 바퀴별 한 개의 홀센서 엔코더, 한 개의 IMU(inertial measurement unit) 센서를 이용한다. 추가로 모터 구동을 위한 세 개의 2ch 모터 드라이버와 데이터 유실 및 지연 현상을 줄이기 위한 저장장치, 실시간 데이터 분

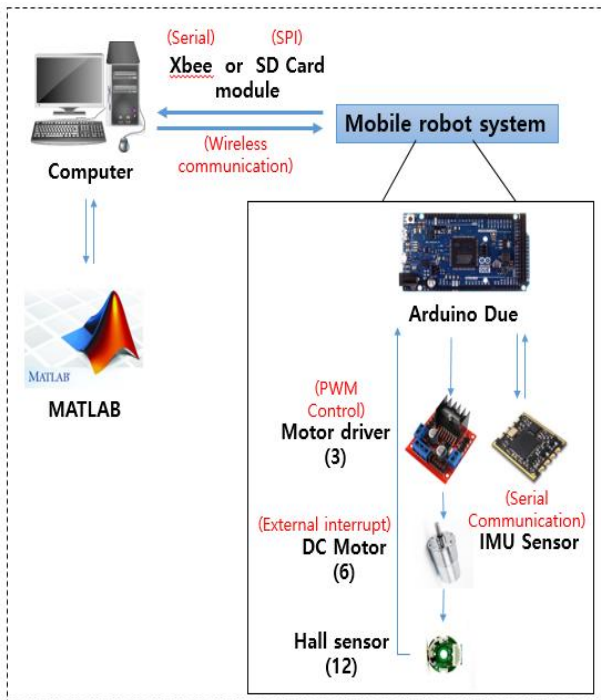


Fig. 5 Control hardware structure

석을 위한 무선 송수신장치를 부착한다. Fig. 5의 하드웨어 구성에서 확인할 수 있듯이, 본 연구의 모바일 로봇은 PWM(pulse width modulation) 제어를 통하여 6개의 DC 모터를 구동한다. 또한, 각 모터에 홀센서 두 개가 장착된 엔코더를 연결함으로써 총 12개의 홀센서를 제어한다. 이때 제어 보드는 외부 신호 인터럽트를 사용하여 홀센서의 위상값을 측정한다. 또한, 제어기는 시리얼 통신을 이용하여 IMU 센서에서 감지한 데이터값을 받는다. 그리고 취득한 데이터를 분석하기 위하여 MATLAB을 사용한다. 또한, Fig. 5는 모바일 로봇의 컨트롤 시스템을 나타낸다. 최종적으로 센서 응답의 측정 및 통신을 통해 측정한 각 바퀴의 엔코더 펄스와 모바일 로봇 무게중심의 x , y , z 축 방향에 대한 직선 가속도, 자이로, 지자기 데이터값을 저장한다. 한 개의 컨트롤러에 총 13개의 인터럽트와 15개의 데이터를 취득하기 때문에 정밀한 데이터 취득을 위해 통신 속도를 115,200 bps로 설정하였다.

3. Kalman 필터 기반 상태 추정

3.1 시스템 모델

일반적으로 센서에서 취득한 데이터에는 노이즈가 포함되어 있다. 또한, 복잡한 계산이나 처리

해야 할 데이터양이 늘어날수록 노이즈의 영향이 커진다. 이를 해결하기 위해서 일반적으로 필터를 사용하여 노이즈를 제거한다. 본 연구에선 취득한 데이터의 노이즈를 제거하고 모바일 로봇 바퀴의 회전각도, 각속도, 각가속도를 추정하기 위해 Kalman 필터 기반 추정기를 제작한다.

바퀴의 회전각도, 각속도, 각가속도는 로봇의 상태를 나타내는 가장 중요하고 기본적인 정보이다. 이 때문에 본 연구에선 엔코더 펄스를 입력으로, 회전각도-각속도-각가속도의 관계를 수학적으로 모델링하여 Kalman 필터에 적용한다.^(6,10) 이때 시스템 모델의 시스템 방정식은 식 (3)과 같고, 관측 방정식은 식 (4)와 같다.

$$x(k) = Ax(k-1) + Bw(k-1) \tag{3}$$

$$z(k) = Hx(k) + v(k) \tag{4}$$

$$x = [\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}]^T, w(k) = [w_1, w_2, w_3]^T \tag{5}$$

$x(k)$ 는 추정하고자 하는 상태변수를 의미하고 식 (5)와 같다. 본 연구의 상태변수는 바퀴의 회전각도, 각속도, 각가속도이다. 변수 $w(k)$ 는 외란 및 정규분포를 따르는 시스템 노이즈이고, 변수 $z(k)$ 는 측정값을 의미하며 $v(k)$ 는 측정 노이즈이다. 여기서 A 와 H 는 상태변수의 변환계수로서, 본 연구에선 A 는 시스템 행렬, H 는 출력 행렬이라 정의한다. 측정값은 홀센서에서 감지한 펄스값을 근거로 위치 정보를 입력하며, Δt 는 홀센서의 sampling time을 나타낸다. 상태변수 $x(k)$ 의 시스템 모델을 수학적으로 모델링하여 표현하면 식 (6)과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \theta_i(t + \Delta t) &= \theta_i(t) + \Delta t \dot{\theta}_i(t) + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{\theta}_i(t) + w_1(t) \\ \dot{\theta}_i(t + \Delta t) &= \dot{\theta}_i(t) + \Delta t \ddot{\theta}_i(t) + w_2(t) \\ \ddot{\theta}_i(t + \Delta t) &= \ddot{\theta}_i(t) + w_3(t) \end{aligned} \tag{6}$$

식 (6)을 이용하여 시스템 모델의 시스템 방정식과 관측 방정식을 나타내면 식 (7)과 같다. 최종적으로, 바퀴의 회전각도-각속도-각가속도를 추정하는 Kalman 필터를 기반 추정기는 선정한 시스템 모델을 이용하여 식 (8)과 같이 제작한다. 또한, $K(k)$ 는 오차 공분산을 이용한 Kalman gain, $\hat{x}(k)$ 는 추정기를 통한 추정값을 나타낸다.

$$x(k) = \begin{bmatrix} A \\ 1 & \Delta t & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x(k-1) + \begin{bmatrix} B \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} w(k)$$

$$z(k) = \begin{bmatrix} H \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(k) + v(k) \quad (7)$$

$$\hat{x}(k) = A\hat{x}(k-1) + K(k)[z(k) - H\hat{x}(k-1)] \quad (8)$$

3.2 시스템 행렬 분석 및 시뮬레이션

제작한 추정기를 검증하기 위해 시뮬레이션을 진행한다. 위치를 측정값으로 사용하는 모델의 위치, 속도 추정 시뮬레이션을 진행한다. 이때 시뮬레이션 모델의 기준 속도는 80 cm/s이며, 난수 변수를 이용하여 시스템 노이즈와 측정 노이즈를 적용한다. Fig. 6에서 측정 노이즈를 포함한 위치 측정값은 빨간색 실선이고, 추정기를 통해 노이즈가 제거된 위치 추정값은 파란색 실선이다. 위 시뮬레이션을 기반으로 초기값을 정의하지 않고 모두 0으로 설정한 후 속도값을 추정한다. 시스템 노이즈를 포함한 속도 참값은 Fig. 7의 빨간색 실선이며, 제작한 추정기를 통해 나타난 상태변수는 파란색 실선이다.

큰 초기 오차 및 시스템 노이즈, 측정 노이즈를 포함하고 있는 데이터를 제작한 추정기를 통해 노이즈를 제거하고 속도 변화의 추이를 추정

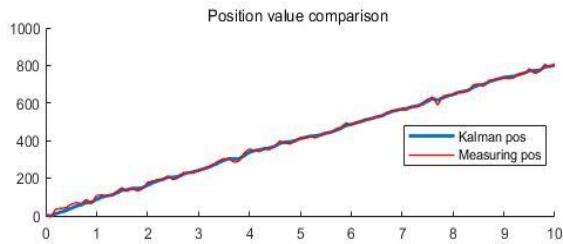


Fig. 6 Comparison of measured and estimated positions

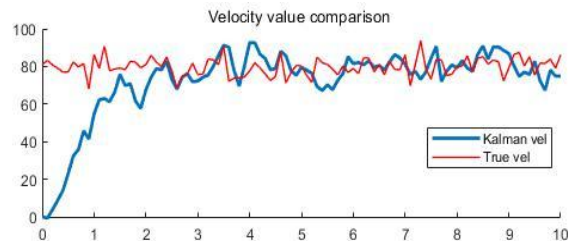
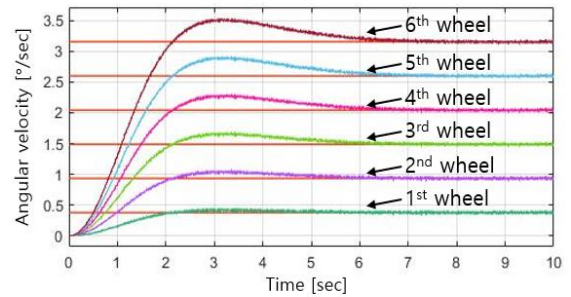


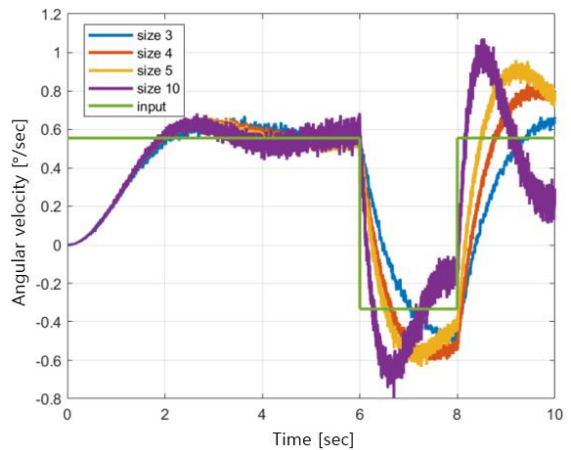
Fig. 7 Comparison of true and estimated velocities

하였다. 이후 실험에서 공분산 행렬을 선정하여 정확성을 향상시킨다.

본 연구의 상태변수 $x(k)$ 의 수학적 모델은 Taylor formula로 나타낼 수 있으므로,^(11,12) A행렬의 크기를 증가시켜 시뮬레이션을 진행한다. A행렬의 크기가 $n \times n$ 인 행렬 A_n 는 Taylor formula를 이용하여 식 (9)로 나타낸다. 또한, 시뮬레이션에 선 급격한 인풋 변화의 추정 정확성을 확인한다. Fig. 8(a)에서는 6개의 바퀴에 각각 다른 가상의 속도 인풋을 가한다. 따라서 바퀴는 일정한 간격의 초기 속도 오차를 가지고 있으며, 노이즈가 포함되어 있지 않은 가상의 속도 인풋에 대한 추정 시뮬레이션을 진행한다. 그 결과 Kalman 필터는 초기 오차가 증가하더라도 rise time은 크게 증가하지 않지만, overshoot은 소폭 증가함을 보였다. 그리고 A행렬의 크기에 따른 초기 과도응답은 큰 차이가 없었다. 하지만 Fig. 8(b)에서 6~8초 구간에서 스텝 인풋(step input)을 가하여 급격한 속도의 변화를 주었을 때, A행렬의 크기에 따른 추정 성능이 다름을 볼 수 있다. 6~8초 구간



(a) Comparison by initial error



(b) Comparison by size A

Fig. 8 Estimation of the velocities using system matrix sizes of 3, 4, 5, and 10

에서 가해진 스텝 인풋에 대한 A행렬의 크기별 rise time은 3×3에서 1초, 4×4에서 0.7초, 5×5에서 0.4초, 10×10에서 0.25초이다. 시뮬레이션을 통해 A행렬의 크기가 커질수록 rise time은 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 10×10 크기의 A행렬에선 40% 이상의 overshoot이 나타나며, 크기에 비례하여 노이즈 및 over shoot도 증가하는 것을 확인하였다. 이후 실험에서도 크기에 따른 시스템 행렬 A의 비교를 통해 적절한 사이즈를 선택한다.

$$A_n = \begin{bmatrix} 1 & dt & \frac{dt^2}{2} & \dots & \frac{dt^{n-1}}{(n-1)!} \\ 0 & 1 & dt & \dots & \frac{dt^{n-2}}{(n-2)!} \\ \vdots & 0 & 1 & \dots & \frac{dt^{n-3}}{(n-3)!} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

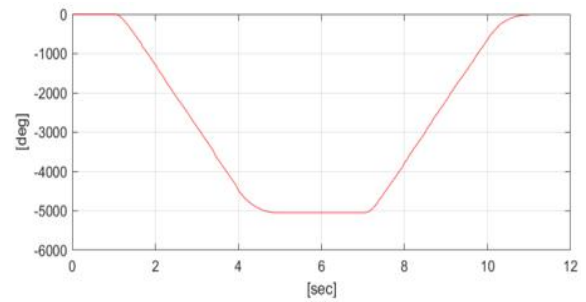
4. 실험 결과

4.1 추정기의 상태변수 추정

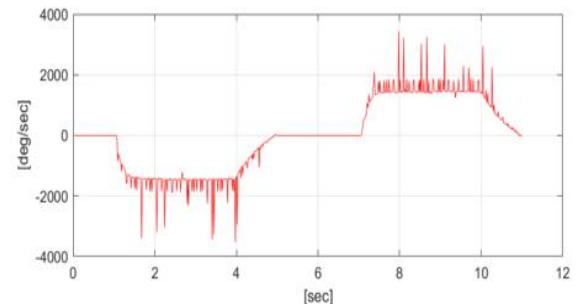
로봇 바퀴의 홀센서 엔코더로 측정된 raw 데이터에서 수치 미분으로 회전각도, 각속도, 각가속도를 구할 수 있다. 하지만 홀센서의 raw 데이터를 이용하여 계산한 속도, 가속도는 시스템 노이즈, 측정 노이즈 등으로 인하여 큰 노이즈가 발생한다. 또한, 본 연구의 모바일 로봇에서는 하나의 컨트롤러에 12개의 홀센서와 한 개의 모바일 로봇 작동 스위치를 외부 인터럽트로 제어하며, 총 13개 외부 인터럽트 구문과 15개의 상태값(6개의 엔코더 및 9축 IMU 센서)을 출력하고 있다. 이처럼 많은 외부 인터럽트의 사용으로 인해 데이터 측정 누락이 발생하여 오차가 발생할 수도 있다.

홀센서 및 IMU 센서의 측정 데이터를 얻기 위해 평지에서 (3초) 후진, (3초) 정지, (3초) 전진의 주행 시나리오를 실험한다. 이때 Fig. 9는 모바일 로봇의 6개 바퀴 중 첫 번째 바퀴가 주행 실험에서 취득한 데이터를 보여준다. 또한, 이후 실험에서도 동일한 바퀴의 데이터를 사용한다. 로봇 바퀴의 엔코더에서 측정된 raw 데이터는 수치 미분을 이용하여 Fig. 9와 같이 상태변수로 나타낸다. Fig. 9는 순서대로 (a)는 회전각도, (b)는 각속도, (c)는 각가속도 그래프이다. 초고속 카메라로 관

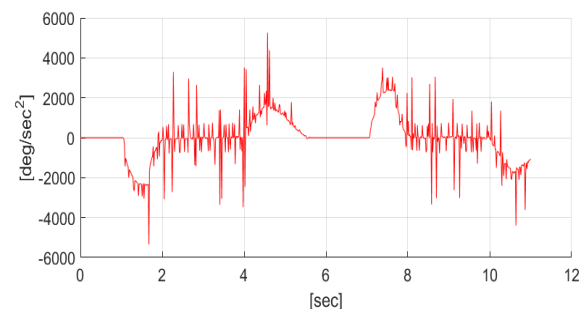
측 결과 모바일 로봇의 1번 바퀴는 후진하는 동안 약 14번 회전하였고, 이는 바퀴가 약 5,040° 회전한 것이다. 바퀴는 약 3초 동안 가속 운동하였고, 각속도를 계산하면 약 1,680 [°/sec]가 나온다. 홀센서로 측정된 상태변수는 Fig. 9에서 확인할 수 있듯이, 첫 번째 그래프에서 회전각도 5,013.468°를 측정하였다. 이는 초고속 카메라 관측과 비슷한 측정값이며 홀센서로 측정된 데이터가 신뢰할 수 있는 데이터임을 알 수 있다. 하지만, 엔코더의 raw 데이터로 수치미분을 이용하여 각속도와 각가속도를 구할 때 큰 오차가 있다. 각속도에서는 최대 3,528.86 [°/sec]가 관측되며 210.05%의 오차율을 확인하였다. 로봇 바퀴의 엔코더 raw 데이터는 매우 큰 노이즈를 포함하고 있어 보정이 필요하고, 이를 Kalman 필터 기법을 이용하여 해결한다.



(a) Raw data - angular position



(b) Raw data - angular velocity



(c) Raw data - angular acceleration

Fig. 9 Measured state variable of the first wheel

Fig 10에서 비교적 간단히 적용할 수 있는 이동 평균 필터(moving average filter)와 Kalman 필터 기법을 비교한다. 빨간색 실선은 비교 대조를 위한 이동 평균 필터를 적용한 추정선이고, 파란색 굵은 실선은 Kalman 필터 기반 추정기를 적용한 추정선이다. Fig. 10에선 앞 절에서 언급했듯이, 시스템 행렬 A의 크기별 추정 성능이 다르기 때문에 성능 향상을 위해 비교한다. 선정한 상태변수 $x(k)$ 를 수학적으로 모델링하면 식 (6)과 같고, A행렬의 최소 크기 3×3 은 Fig. 10(a)로 나타낸다. A의 크기는 순서대로 Fig. 10(b)에서 4×4 , (c)에서 5×5 , (d)에서 10×10 이다. 이때 첫 가속이 일어나는 1~5초 구간에서 속도의 비교분석 결과는 Table 3과 같다. 시스템 행렬이 커질수록 rise time과 overshoot 또한 증가하는 경향을 보이는 것을 확인하였다. 4×4 행렬은 3×3 행렬보다 0.2초 빠른 rise time과 peak time을 가지고 있었지만, overshoot

이 23.25% 가량 급격하게 커지므로, 본 연구에는 3×3 크기의 시스템 행렬을 이용한다.

또한, 추정기를 제작할 때 시스템 노이즈 $w(k)$ 와 측정 노이즈 $v(k)$ 의 공분산은 실험을 통해 선정한다. 본 연구에서 사용한 공분산 행렬 Q와 R은 식 (10)이다. 공분산 행렬을 적용한 Kalman 필터 기법은 상태변수를 Fig. 11과 같이 추정한다. 이전 실험 데이터와 마찬가지로 빨간색 실선은 이동 평균 필터를 적용한 데이터이고, 파란색 굵

Table 3 Properties of transient responses

Size	Rise time	Overshoot	Peak time
3×3	0.66 sec	38.27 %	1.32 sec
4×4	0.64 sec	61.52 %	1.29 sec
5×5	0.70 sec	67.81 %	1.33 sec
10×10	0.77 sec	59.54 %	1.49 sec

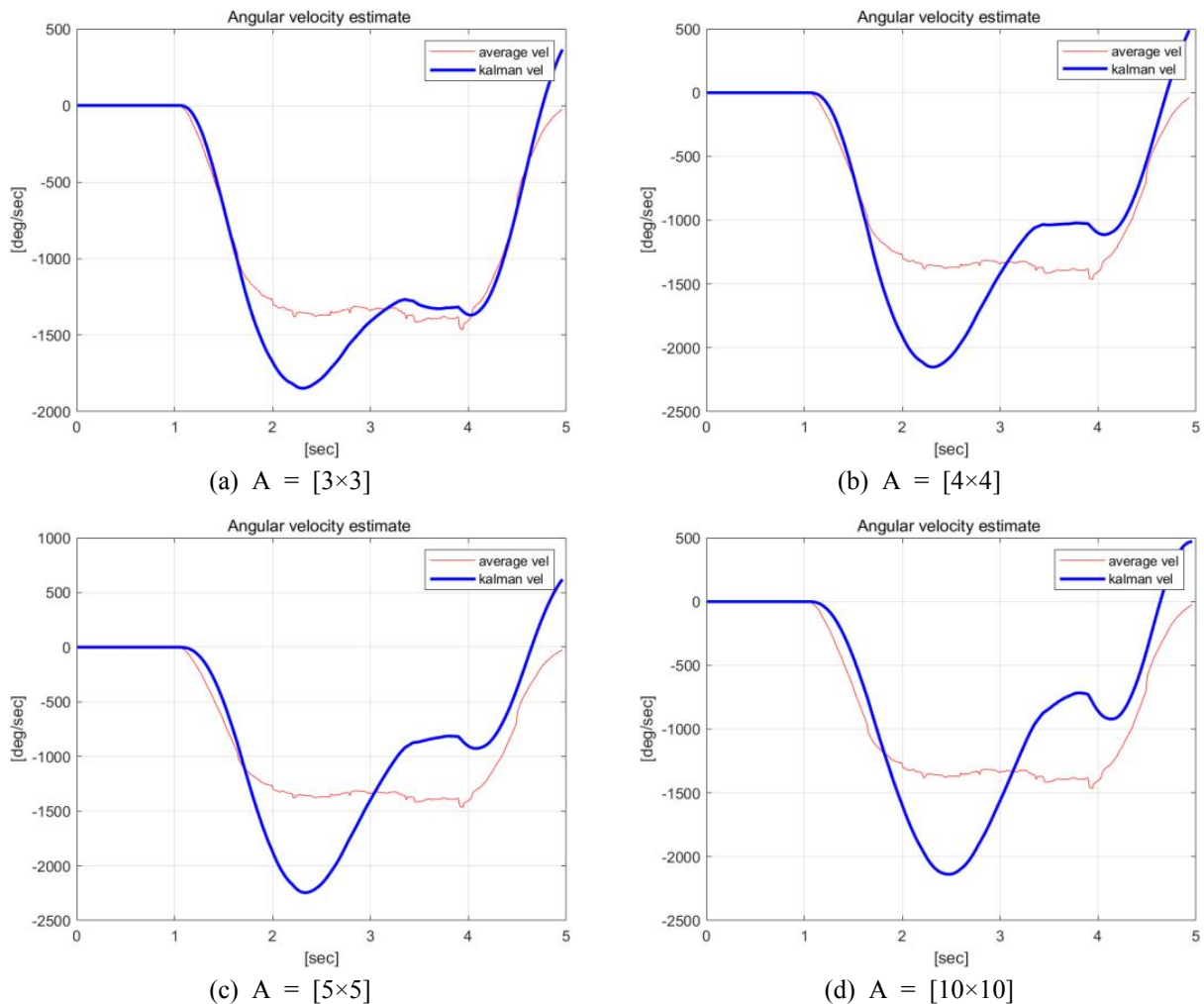


Fig. 10 Comparison according to the size of A

은 실선은 Kalman 필터 기법을 이용한 데이터, 초록색 실선은 raw 데이터이다. 오버랩 결과, Kalman 필터를 적용한 추정기와 이동 평균 필터는 모두 raw 데이터의 노이즈를 제거하였다. 하지만 Kalman 필터 추정기의 추정 속도는 moving average 필터보다 빠르고, raw 데이터 속도 및 가속도와 유사한 추정 결과를 보여준다.

$$Q = \begin{bmatrix} 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-1} \end{bmatrix}, R = 10^{-3} \quad (10)$$

4.2 모바일 로봇의 slip ratio 추정

모바일 로봇이 주행할 때 바퀴에서 측정된 속

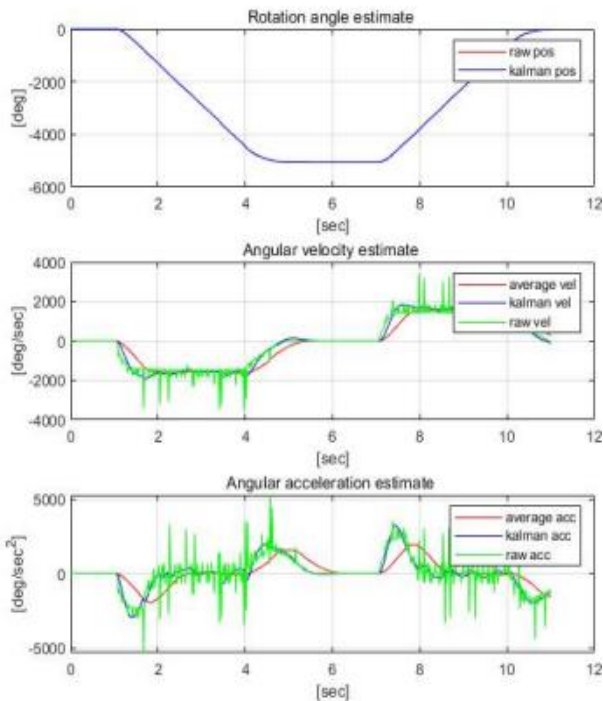


Fig. 11 Overlap for comparing estimates

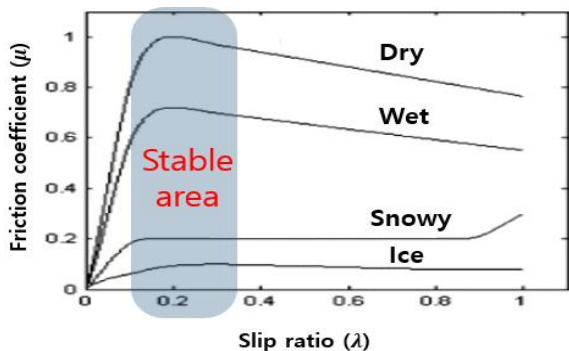


Fig. 12 Friction coefficient as a function of the longitudinal slip ratio

도와 로봇의 무게중심에서 측정된 속도는 차이가 있다. 이는 바퀴의 슬립과 관련이 있다. 바퀴는 탄성체이기 때문에 바퀴는 노면과 맞닿는 접지부에서 구동력 또는 제동력 등에 의한 변형이 발생하게 되며, 바퀴 잠김(lock) 현상 이전에도 부분적으로 미끄럼운동을 하게 된다. 슬립률이 낮은 상태에서는 마찰계수가 최댓값까지 급격히 증가하였다가, 이후엔 슬립률이 증가할수록 마찰계수가 감소한다. 이때 마찰계수는 모바일 로봇의 구동력 및 제동력에 큰 영향을 준다. 이 때문에 최적의 구동력 및 제동력, 또는 주행 안정성 확보 및 모션 컨트롤에서 슬립률은 중요한 변수이다. ABS, TCS 등 널리 쓰이고 있는 능동형 차량안전 시스템에선 추정된 슬립률을 기반으로 차량 및 모바일 로봇의 제어를 설계한다. 일반적으로 Fig. 12와 같이, 최대의 마찰계수는 슬립률 8%~35% 범위에 존재한다. 또한, 마찰계수가 비교적 높은 35%까지의 상승곡선을 안정영역, 이후 하강 곡선을 불안정 영역이라고 한다. 안정영역에서 바퀴는 구동력 또는 제동력을 가장 잘 전달할 수 있으므로 안정적인 주행 및 조향이 가능하다.

본 연구에선 슬립률 추정을 위해 모바일 로봇의 무게중심 속도 v_{cg} 는 IMU 센서 측정값을 사용하고, i 번째 바퀴 속도 w_i 는 제작한 추정기로 추정된 상태변수 값을 사용한다. Fig. 13은 측정값과 추정값을 선형 속도로 나타낸 것이고 검은색 실선은 모바일 로봇의 무게중심 속도, 파란색 굵은 실선은 바퀴의 속도이며 $R=64$ mm이다. 모바일 로봇의 i 번째 바퀴 슬립률은 IMU 센서 측

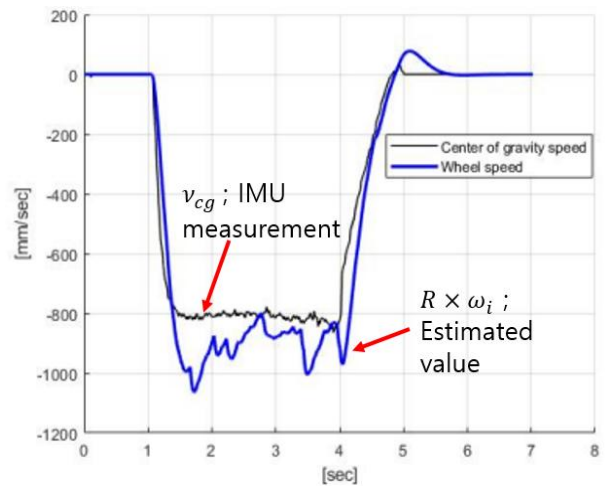


Fig. 13 Comparison of IMU sensor measurements and Kalman filter estimates on the 1st wheel

정값 v_{cg} 와 추정기를 통한 추정값 $R \times \hat{w}_i$ 을 이용하여 식 (11)과 같이^(9,13) 정의한다.

$$\hat{\lambda}_i = \begin{cases} \frac{R \times \hat{w}_i - v_{cg}}{R \times \hat{w}_i} & \text{if } (R \times \hat{w}_i > v_{cg}) \\ \frac{R \times \hat{w}_i - v_{cg}}{v_{cg}} & \text{if } (R \times \hat{w}_i \leq v_{cg}) \end{cases} \quad (11)$$

경사가 없는 건조한 노면인 정형 지형과 비정형 지역에서 각각 실험을 진행한다. 두 실험 공통적으로 가감속 시 Kalman 필터의 추정 속도와 실제 속도의 차로 인한 오차가 존재한다. 하지만 정형지역에서 첫 번째 바퀴의 슬립률은 Fig. 14와 같이 안정영역 안의 슬립률로 구동함을 확인하였다. 동일한 조건으로 20번의 실험을 통해 계산된 평균 슬립률은 8.96%이다. 실제 이동 거리와 홀센서로 측정된 평균 이동 거리는 각각 2,590 mm와 2,817.51 mm이며 슬립량에 대한 비율도 8.075%로 추정된 슬립률과 슬립된 거리가 유사함을 확인하였다.

비정형 지형에서 실험은 비정형의 정도나 환경에 따라 슬립률의 변화가 크다. 비정형 정도가 클수록 주행 중인 모바일 로봇에서 오일러 각도 롤(roll), 피치(pitch)가 발생한다. 평평한 정형 지형에서는 오일러 각도가 최소로 발생하기 때문에 큰 문제가 없었지만, 비정형 지형에선 오일러 각도에 따라 바퀴와 지면 사이의 접지상태가 달라지며 슬립의 요인이 된다. 또한, 모래와 자갈 등 비교적 가볍고 작은 물체 위를 주행할 시, 바퀴와 지면 사이에 마찰이 제대로 일어나지 않으면서 모바일 로봇을 추력을 얻지 못하고 슬립이 일어난다. 지면의 상태도 슬립의 중요한 요소 중

하나이다. Fig. 12에서 보듯이, 지면의 환경에 따라 최대 정지마찰계수 및 운동마찰계수가 달라지고, 이에 따른 슬립 현상도 다르다. 본 연구는 험지에서 주행을 확인하기 위해 살짝 젖은 흙, 풀, 자갈 등의 복합적인 환경을 가진 비정형 지형에서 슬립률을 확인하였다. Fig. 15는 비정형 지형의 실험에서 일정 간격으로 모바일 로봇의 이동을 오버랩하여 나타낸 것이다.

20번의 실험을 통해 계산된 실제 이동 거리와 첫 번째 바퀴의 홀센서로 측정된 이동 거리의 평균은 각각 1,972 mm와 2,297.2 mm이다. 슬립량에 대한 비율은 14.19%로 계산된다. 슬립률 추정결과 평평한 정형 지형보다 큰 노이즈를 가지고 있음에도 불구하고, Fig. 16과 같이 평균 슬립률 17.28%를 보인다. 위 실험에서도 슬립률과 슬립량의 비율과 유사한 데이터를 보인다. 즉, Kalman 필터를 이용한 슬립률 추정은 비정형 지형에서도 슬립량과 선형적인 관계를 가지고 있음을 실험적으로 확인하였다.

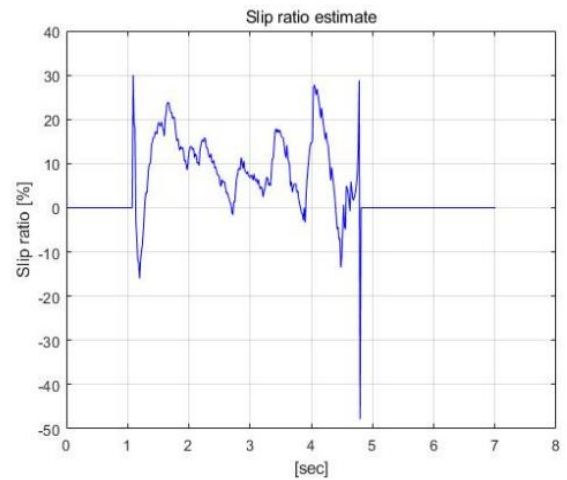


Fig. 14 Estimating the slip ratio of the 1st wheel on flat road ($-100\% < \lambda < 100\%$)

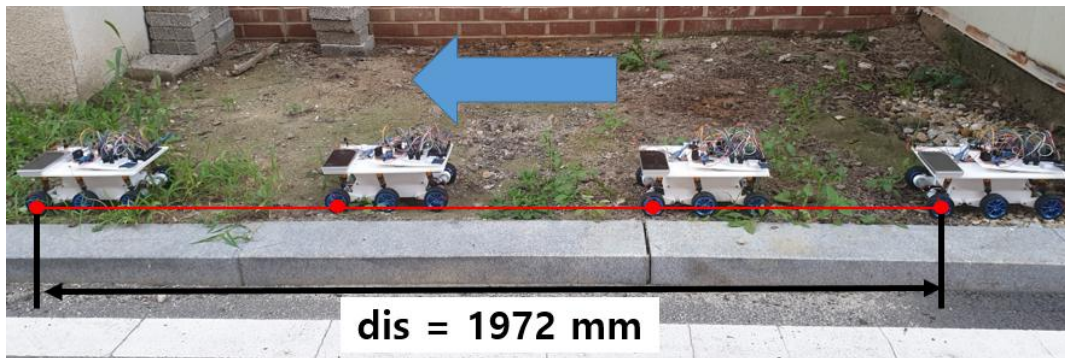


Fig. 15 Mobile robot off-road driving (over lap)

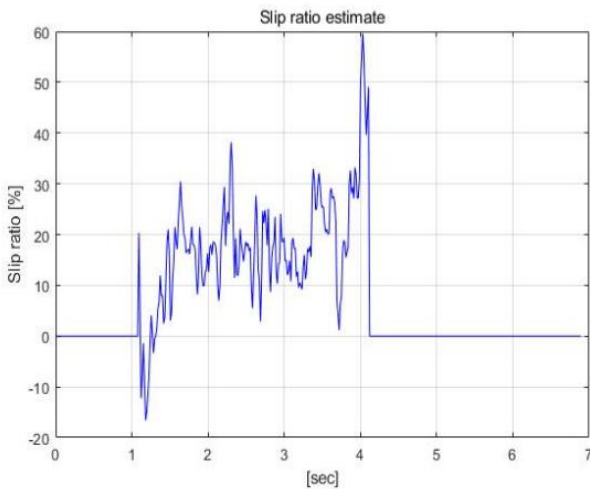


Fig. 16 Estimating the slip ratio of the 1st wheel on off-road ($-100\% < \lambda < 100\%$)

5. 결론

본 연구에서는 험지 주행을 위한 6-wheel 소형 모바일 로봇을 모델링하고 제작하였다. 제한된 소형 모바일 로봇의 하드웨어를 고려하여 바퀴의 회전각도, 각속도, 각가속도를 추정하였다. Kalman 필터 기법을 이용하여 모바일 로봇의 상태를 추정하였다. Kalman 필터 기법을 이용한 로봇의 상태 추정은 취득한 raw 데이터의 노이즈를 제거하고, 이동 평균 필터보다 빠르고 정확한 추정 성능을 갖고 있음을 확인하였다. 또한, 추정한 모바일 로봇의 상태변수와 IMU 센서의 측정값을 이용하여 슬립률 추정을 하였다. 실험을 통하여 정형 지형과 비정형 모두에서 추정한 슬립률과 측정된 슬립률이 선형적인 관계를 갖고 있음을 확인하였다.

향후 추정된 슬립률과 바퀴 및 모바일 로봇의 상태추정 기술을 기반으로 마찰을 고려한 주행 연구를 수행할 계획이다.

후 기

본 연구는 UD180045RD 위탁연구의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음.

참고문헌 (References)

(1) Fish, S., 2004, "UGV's in Future Combat Systems," *Proc. of the SPIE - Unmanned Ground Vehicle Technology VI*, Vol. 5422, pp. 288~291.

- (2) Meghdari, A., Pishkenari, H. N., Gaskarimahalle, A. L., Mahboobi, S. H. and Karimi, R., 2005, "A Novel Approach for Optimal Design of a Rover Mechanism," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 44, No. 4, pp. 291~312.
- (3) Volpe, R., Balaram, J., Ohm, T. and Ivlev, R., 1997, "Rocky7: A Next Generation Mars Rover Prototype," *Advanced Robotics*, Vol. 11, No. 4, pp. 341~358.
- (4) Kim, D. H., Kim, C. J., Kim, Y. R. and Han, C. S., 2010, "A Study on an Independent 6WD/6WS of Electric Vehicle Using Optimum Tire Force Distribution," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 16, No. 7, pp. 632~638.
- (5) Park, Y. and Lee, H., 2013, *Development of Multi-Purpose Dog-Horse Robot based on the Network*, TPKO201400003178, Agency for Defense Development, Republic of Korea.
- (6) Yoo, J. and Kang, Y., 2010, "Performance Analysis on the IMM-PDAF Method for Longitudinal and Lateral Maneuver Detection Using Automotive Radar Measurements," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 21, No. 3, pp. 224~232.
- (7) Han, J. H., Seo, Y. S. and Lee, J. M., 2010, "An Ubiquitous Mobile Robot Using Position-Sensing Method," *Proc. of KIIS Spring Conference*, Vol. 20, No. 1, pp. 267~370.
- (8) Lee, D., Lee, J. and Park, J., 2005, "The Measurement of Dynamic Radius and Slip Ratio on Real Time at the Vehicle," *Proc. of the KSAE 2005 Annual Spring Conference*, pp. 1368~1373.
- (9) Kwon, J., Kim, C. H. and Lee, H. H., 2014, "Development of Dead Reckoning Algorithm Considering Wheel Slip Ratio for Autonomous Vehicle," *Journal of the Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 13, No. 1, pp. 99~108.
- (10) Kang, J., Kim, W., Lee, J. and Yi, K., 2010, "Skid Steering-based Control of a Robotic Vehicle with Six In-wheel Drives," *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 224, No. 11, pp.

- 1369~1391.
- (11) Zhang, Q., Liu, G., Wang, Y. and Zhou, T., 2004, "A Study of Calculation Method of Wheel Angular Acceleration in ABS System," *Proc. of the 2004 International Conference on Information Acquisition*, IEEE, pp. 147~150.
- (12) Cho, W., Yoon, J., Yim, S., Koo, B. and Yi, K., 2009, "Estimation of Tire Forces for Application to Vehicle Stability Control," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 59, No. 2, pp. 638~649.
- (13) Lee, J. Y., Suh, S. W., Shon, W. H., Kim, C. J. and Han, C. S., 2011, "System Modeling and Simulation for an In-wheel Drive Type 6×6 Vehicle," *Trans. Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 19, No. 2, pp. 1~11.