

# Vehicle Reference Dynamics Estimation by Speed and Heading Information Sensed from a Distant Point

Jeonghyeon Yun<sup>1</sup>, Gyeongmin Kim<sup>1</sup>, Minhyoung Cho<sup>1</sup>, Byungwoon Park<sup>1†</sup>, Howon Seo<sup>2</sup>, Jinsung Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Aerospace Engineering and Department of Convergence Engineering for Intelligent Drone, Sejong University, Seoul 05006, Republic of Korea

<sup>2</sup>Research and Development Division, Hyundai Motor Company, Hwaseong, Gyeonggi-do 18280, Republic of Korea

## ABSTRACT

As intelligent autonomous driving vehicle development has become a big topic around the world, accurate reference dynamics estimation has been more important than before. Current systems generally use speed and heading information sensed from a distant point as a vehicle reference dynamic, however, the dynamics between different points are not same especially during rotating motions. In order to estimate properly estimate the reference dynamics from the information such as velocity and heading sensed at a point distant from the reference point such as center of gravity, this study proposes estimating reference dynamics from any location in the vehicle by combining the Bicycle and Ackermann models. A test system was constructed by implementing multiple GNSS/INS equipment on an Robot Operating System (ROS) and an actual car. Angle and speed errors of 10° and 0.2 m/s have been reduced to 0.2° and 0.06 m/s after applying the suggested method.

**Keywords:** Ackermann model, bicycle model, GNSS, INS, vehicle, dynamics

## 1. INTRODUCTION

자율주행의 시대가 도래함에 따라 차량의 정확한 위치 및 속도 추정이 매우 중요시되고 있다 (Xu et al. 2018). 자율주행을 위한 차량 제어 시스템은 크게 model-free 또는 model-based 알고리즘 기반으로 나눌 수 있으며, 최근에는 deep-learning이나 Model Predictive Control (MPC) 방법을 기반으로 하는 제어 시스템이 제안되고 있다 (Vu et al. 2021). 그러나 알고리즘의 종류와 상관없이 입력으로 사용되는 차량의 위치 및 속도에 따라 제어 시스템의 성능이 크게 좌우되기에 차량의 동특성을 반영한 위치 및 속도를 추정하는 것이 자율주행의 성능을 향상시키는 기반

이 된다.

현재 시장에 출시된 대부분의 차량의 경우, 속도를 추정하기 위해 차량의 바퀴에 장착된 휠 속도 센서에서 센싱된 정보를 이용한다 (Hewage & Premaratne 2016). 하지만 휠 속도 센서를 활용한 속도 추정 방법의 경우 장착된 타이어의 반경을 이용하여 차속을 연산하므로 타이어의 마모, 타이어의 교체 및 주행 중 타이어의 변형의 원인으로 정확한 차속 추정이 어렵다는 단점이 있다. 차량의 전자 제어 시스템에서 보통 2륜 구동차량의 경우 비구동륜의 차륜속도 중 가장 빠른 차륜속도를, 4륜 구동차량의 경우 4바퀴의 차륜속도 중 가장 빠른 차륜속도를 기준속도로 추정한다. 이는 단순히 휠 속도 센서에 설치된 encoder를 통해 관찰된 속도 값을 그대로 출력하므로 제동 및 가속의 상황에서 차량 슬립이 발생할 시 산출된 차량의 기준속도 추정치는 정확한 속도 값을 반영하지 못한다 (Nam et al. 2015).

이외에도 Global Navigation Satellite System (GNSS) 또는 Inertial Navigation System (INS) 센서 결합을 통해 기준속도 추정치 오차를 줄이고자 하는 연구가 많이 진행되었으나, 기 개발된 연구들은 지정된 위치에 다수의 센서를 장착하거나, 앞바퀴, 뒷바퀴, 쇼버 등의 기존 휠 속도 센싱 위치와 동일한 위치에 설치해야 된다는 단점이 있다. 특히 휠 속도 센서와 GNSS 모듈 결합의 경우 각기 다른 위치에 장착되어 같은 차량 내부일지라도 각

Received Apr 07, 2022 Revised Jun 08, 2022 Accepted Jul 15, 2022

†Corresponding Author

E-mail: byungwoon@sejong.ac.kr

Tel: +82-2-3408-4385 Fax: +82-10-4350-7321

Jeonghyeon Yun <https://orcid.org/0000-0002-6373-3741>

Gyeongmin Kim <https://orcid.org/0000-0002-6279-9394>

Minhyoung Cho <https://orcid.org/0000-0002-6846-9521>

Byungwoon Park <https://orcid.org/0000-0001-8635-1773>

Howon Seo <https://orcid.org/0000-0001-5476-8312>

Jinsung Kim <https://orcid.org/0000-0001-9787-641X>

지점별 차량의 동특성이 다르기 때문에 그대로 결합 시 오차가 발생한다 (Min et al. 2019).

이를 보완하기 위한 방법인 kinematic vehicle model을 사용한 차량의 휠 속도 센서와 GNSS 센서 결합에 대한 연구의 경우 이론적으로 간단한 수식 전개를 통해 각기 다른 위치의 차량 동특성이 반영된 센서 결합이 가능하다 (Melendez-Pastor et al. 2017). 하지만 해당 방식의 경우 encoder에서 관찰된 휠 속도 값을 그대로 사용하기 때문에 scale factor와 delay 등을 고려하지 않고 단순히 모델링 수식만 적용하게 되면 실제 차량의 기준 속도를 제대로 추정할 수 없다.

본 논문에서는 자율주행에서 임의 위치의 다수 센서 결합을 통한 정확한 차량 기준 속도 추정이 가능하도록 하는 것에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 이를 위해 차량 내부의 기준 위치 및 임의 위치에 GNSS/INS 장비를 설치하고, kinematic vehicle model을 적용하여 차량의 동특성 반영 및 기준속도가 제대로 추정되었는지 실험적으로 검증하였다.

## 2. KINEMATIC VEHICLE MODEL

### 2.1 Bicycle Model

Bicycle model은 차량의 종 방향 움직임을 모델링 시, 간소화된 모델 적용을 위해 주로 사용되는 모델로서, 차량의 앞뒤 차축의 양 옆의 두 바퀴를 한데로 모아 각각 1개의 바퀴로 간주하는 모델로 자전거의 거동과 비슷하다 하여 붙여진 이름이다 (Polack et al. 2017). Fig. 1은 각각 bicycle model과 Ackermann model을 나타낸 그림으로, bicycle model은 해당 절에서 Ackermann model은 2.2절에서 설명한다. Fig. 1에서의 포인트 (point 1 to 9)는 차량의 각 지점별 동특성 파악을 위해 각 바퀴 및 무게중심을 고려하여 설정하였다. 일반적인 공차상태의 승용차 무게중심은 Fig. 1에서 W에 해당되는 윤거의 1/2에서 -3% 지점 (왼쪽)과 L에 해당되는 축거의 43% 지점 (앞)에 위치한다고 알려져 있다 (Lee & Kim 2010). 이에 근거하여 본 논문에서는 공차상태의 차량 무게중심과 가장 가까이 위치하는 point5를 무게중심으로 간주하였다. 설정한 포인트들을 기준으로 센서를 이동해가며 각 위치에서의 측정값을 비교할 수 있도록 알고리즘을 구성하였다. 예를 들어 차량의 무게중심인 point 5에 위치한 센서의 측정치를 활용하여 차량의 조향 센서가 위치한 point 2에서의 측정치를 구하기 위해서는 식 (1)부터 (7)의 과정을 통해 계산할 수 있다.

Point 5에 설치된 GNSS/INS 센서에서 측정된 속도 값 ( $V_5$ )과 각속도 변화 값 ( $\psi_5$ )을 사용하면 차량의 선회 중심 (O)로부터 point 5까지의 거리 ( $R_5$ )를 계산할 수 있다.

$$R_5 = \frac{V_5}{\psi_5} \tag{1}$$

계산된  $R_5$  값을 사용하여  $\triangle P_5 OP_8$ 에서 삼각함수 및 역삼각함수 공식을 적용하면 선회 중심으로부터 point 5까지의 각도 ( $A_5$ )와 point 8까지의 거리 ( $R_8$ )를 계산할 수 있다.

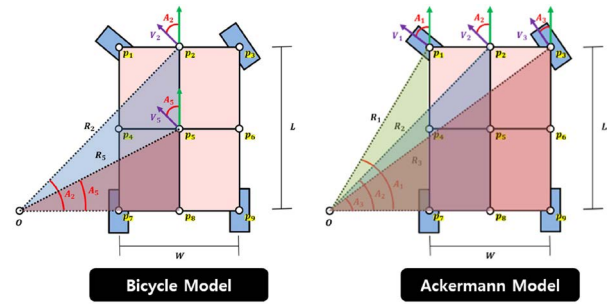


Fig. 1. Bicycle and Ackermann model.

$$\sin(A_5) = \frac{L}{2 \times R_5} = \frac{L \times \psi_5}{2 \times V_5} \tag{2}$$

$$A_5 = \sin^{-1} \left( \frac{L \times \psi_5}{2 \times V_5} \right) \tag{3}$$

$$R_8 = R_5 \times \cos(A_5) \tag{4}$$

위와 마찬가지로  $\triangle P_2 OP_8$ 에서 삼각함수 및 역삼각함수 공식을 적용하면 선회 중심으로부터 point 2까지의 각도 ( $A_2$ )와 거리 ( $R_2$ )를 계산할 수 있다.

$$A_2 = \tan^{-1} \left( \frac{L}{R_8} \right) \tag{5}$$

$$R_2 = \frac{L}{\sin(A_2)} \tag{6}$$

최종적으로 point 5에서 측정된 속도 값 ( $V_5$ )과 각 지점별 선회 중심으로부터 거리의 비례식을 통해 point 2에서의 속도 값 ( $V_2$ )을 계산할 수 있다.

$$V_2 = V_5 \times \frac{R_2}{R_5} \tag{7}$$

### 2.2 Ackermann Model

Ackermann model은 차량의 횡 방향 움직임을 모델링할 때 주로 사용되는 모델로서, 차량의 저속 선회 시 조향각을 활용한 기하학적 관계에 주로 사용된다 (Arvind 2013). Fig. 1에서 차량의 조향 센서가 탑재되어 있는 point 2로부터 각 앞 바퀴의 선회 각도를 구하기 위해서는 식 (8)부터 (15)의 과정을 통해 계산할 수 있다.

먼저 2.1절에서 구한 선회 중심과 point 8까지의 거리 ( $R_8$ )에서 차량 모델의 폭의 절반 값 ( $W/2$ ) 값을 빼 주면 차량의 선회 중심으로부터 point 7까지의 거리 ( $R_7$ )를 계산할 수 있다.

$$R_7 = R_8 - \frac{W}{2} \tag{8}$$

계산된  $R_7$  값을 사용하여  $\triangle P_1 OP_7$ 에서 삼각함수 및 역삼각함수 공식을 적용하면 선회 중심으로부터 point 1까지의 각도 ( $A_1$ )와 거리 ( $R_1$ )를 계산할 수 있으며, 최종적으로 비례식을 통해

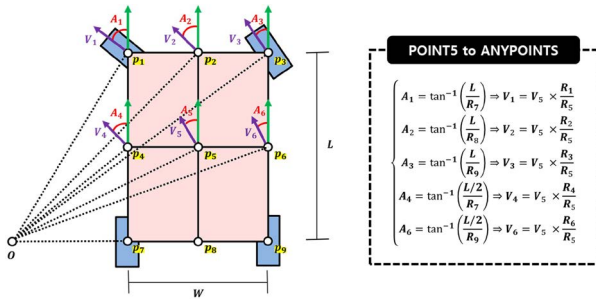


Fig. 2. Combined kinematic vehicle model.

속도 ( $V_i$ )를 계산할 수 있다.

$$A_1 = \tan^{-1}\left(\frac{L}{R_7}\right) \tag{9}$$

$$R_1 = \frac{L}{\sin(A_1)} \tag{10}$$

$$V_1 = V_2 \times \frac{R_1}{R_2} \tag{11}$$

위와 동일하게 선회 중심과 point 8까지의 거리 ( $R_8$ )에서 차량 모델의 폭의 절반 값 ( $W/2$ )을 더해주면 차량의 선회 중심으로부터 point 9까지의 거리 ( $R_9$ )를 계산할 수 있다.

$$R_9 = R_8 + \frac{W}{2} \tag{12}$$

계산된  $R_9$  값을 사용하여  $\Delta P_3 OP_9$ 에서 삼각함수 및 역삼각 함수 공식을 적용하면 선회 중심으로부터 point 3까지의 각도 ( $A_3$ )와 거리 ( $R_3$ )를 계산할 수 있으며, 최종적으로 비례식을 통해 속도 ( $V_3$ )를 계산할 수 있다.

$$A_3 = \tan^{-1}\left(\frac{L}{R_9}\right) \tag{13}$$

$$R_3 = \frac{L}{\sin(A_3)} \tag{14}$$

$$V_3 = V_2 \times \frac{R_3}{R_2} \tag{15}$$

### 2.3 Combined Kinematic Vehicle Model

2.1절과 2.2절에서 설명한 bicycle model과 Ackermann model을 결합한 kinematic vehicle model을 활용하면 차량의 무게중심 뿐만 아니라 임의의 위치에 설치된 하나의 센서 값만으로도 차량 전체의 동특성을 추정할 수 있다. Bicycle model은 센서 위치로부터 종방향에 위치한 지점에서만 속도 추정이 가능하며 일반적으로 무게중심을 기준으로 사용된다. 반면 Ackermann model은 센서 위치로부터 횡방향에 위치한 지점에서의 속도만 추정이 가능하기에 대부분 조향 센서 부착 위치인 전축의 중심을 기준으로 사용된다. Kinematic vehicle model은 설치된 센서를 기준으로 bicycle model을 적용하여 1차적으로 종방향으로 이동한 지점에

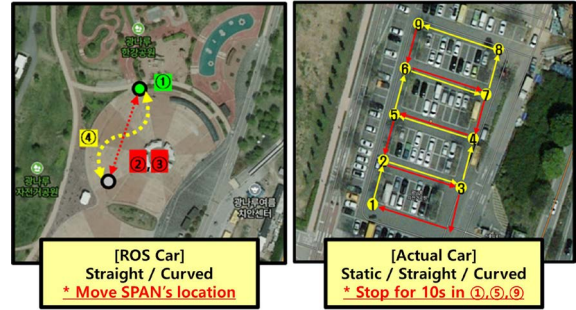


Fig. 3. Dynamic test environment of ROS and actual car.

서의 속도를 계산한 후, 해당 지점을 기준으로 Ackermann model을 적용하여 최종 위치에서의 속도를 계산한다. 이를 활용하면 임의의 위치에 설치된 센서로 차량 기준속도의 참값을 계산할 수 있다.

Fig. 2는 차량의 무게중심인 point 5 위치에 센서를 설치하고 제한한 kinematic vehicle model을 적용하여 임의의 위치의 angle 및 speed를 추정하는 예를 나타낸 그림이다. 기존의 방식인 bicycle model이나 Ackermann model을 적용하여 각 포인트별 동특성을 파악하기 위해서는 최소 3개의 센서를 탑재해야 하지만, 본 알고리즘 적용 시 point 5 위치의 센서 측정치만으로 각 위치 angle 및 speed의 참값을 계산할 수 있다. 이는 차량의 무게중심 뿐만 아니라 임의의 위치의 센서 값으로 무게중심의 센서 값을 역으로 추산할 수도 있으므로, 서로 다른 동특성을 가진 임의의 위치에 설치된 센서 측정치를 결합하는데 용이하게 사용될 수 있다.

## 3. TEST AND RESULTS

### 3.1 Test Configuration

모델링 수식 적용을 통한 차량의 기준속도 참값 추정 알고리즘 검증을 위해 Fig. 3과 같이 각각 Robot Operating System (ROS) 차량 (AGILE-X HUNTER 2.0)과 실제 차량을 이용한 동적 실험을 구성하였다. 각 차량의 지점별 angle과 speed 값을 측정하기 위해 cm-level의 고정밀 GNSS-RTK/INS 통합 장비인 Novatel 사의 SPAN와 SBG 사의 Ellipse-D를 설치하였다. Gyroscope, accelerometer, magnetometer로 구성된 Dual Antenna 장비인 Ellipse-D는 Single Antenna보다 정확한 heading 값을 측정할 수 있으므로 최종적인 데이터 분석 지점인 point5에 설치하여 높은 정확도의 측정치를 획득하였고, Single Antenna 장비인 SPAN은 이동이 용이하고 안테나 설치 공간의 제약이 없으므로 다양한 포인트에 설치하여 각 지점에서의 측정치를 획득하였다. Fig. 4의 경우 ROS 차량의 실험 구성을 나타낸다. ROS 차량의 각 지점별 측정치 획득을 위해 SPAN을 각각 point 1부터 3까지 이동하며 데이터를 획득하였으며, 해당 데이터를 kinematic vehicle model에 적용하여 계산한 point5에서의 예측값을 point 5에 설치된 Ellipse-D로부터 얻은 실제 측정치와 비교하였다. 또

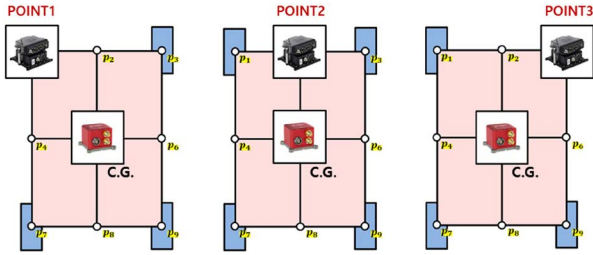


Fig. 4. ROS car test configurations.

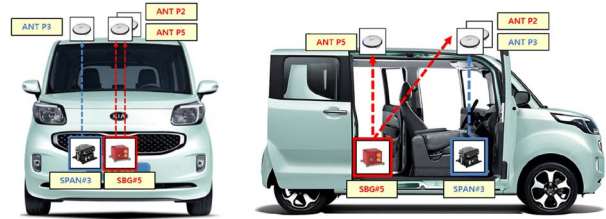


Fig. 5. ROS car test configurations.

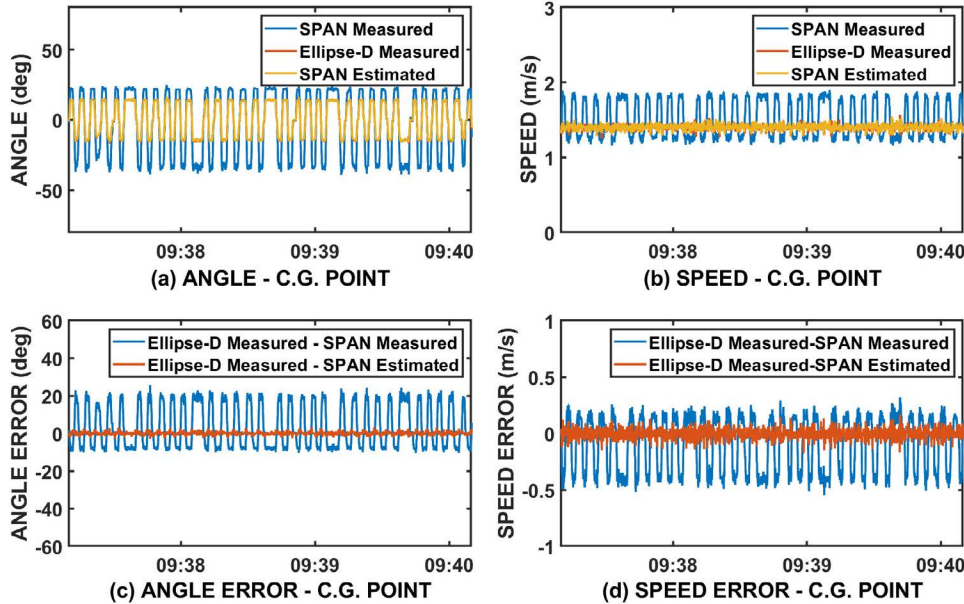


Fig. 6. ROS car test results (2021-10-28).

한, 차량 동역학 모델의 다양한 시나리오별 검증을 위해 정지/등속/가속 등의 speed 변화와 직선/곡선 주행의 angle 변화를 조합하여 다양한 케이스의 결과를 비교하였다.

ROS 차량의 참값 추정 알고리즘 검증 이후, 이를 실제 차량에 적용하기 위해 Fig. 5와 같이 실험을 구성하였다. ROS 실험과 동일한 환경 구성을 위해 각각 Ellipse-D의 경우 point 5 (무게중심 부근), SPAN의 경우 point 3 (조수석 부근)에 설치하였으며, GNSS 측정치 획득을 위해 각 센서의 연직 방향 위 차량 천장 위치에 GNSS 안테나를 설치하였다. 실제 차량의 정지/직진/회전 주행 상태 변화에 따른 기준속도가 어떻게 변하는지에 대한 검증을 위해 반복 실험을 진행하였다.

### 3.2 ROS Car Test Results

ROS 실험은 주변 환경의 방해 없이 정확한 속도 값 비교를 위해 고층 건물이 없고 위성 가시성이 좋은 한강 광나루 자전거 공원에서 실시되었다. 실험은 2021/10/28 날짜에 총 세차례 진행되었으며, 실험시간은 SPAN의 위치에 따라 UTC 기준 각각 point #1 (09:12:50 ~ 09:15:40), point #2 (08:46:20 ~ 08:48:50), point #3 (09:37:10 ~ 09:40:10)에 실시 하였다.

Fig. 6은 ROS 차량의 point 5에 설치된 Ellipse-D와 point 3에 설치된 SPAN에서 측정된 angle 및 speed를 비교한 그래프이다. Fig. 4와 같이 Point 3에 설치된 SPAN 장비는 차량의 무게중심보다 오른쪽 위에 치우쳐진 위치에 설치되었다. 따라서 Figs. 6a,c에서 SPAN의 측정값 (blue line)의 경우, 차량 회전에 따른 angle의 변화가 무게중심 point 5에 설치된 Ellipse-D의 측정값 (red line)보다 크게 나타나며, 12.10 deg (RMS), 20.31 deg (95%) 정도의 오차 수준을 나타낸다. 또한, Figs. 6b,d에서 Speed의 경우에도 일정한 등속 주행을 실시했음에도 회전에 따른 가감속 경향이 그대로 반영되며, 0.26 m/s (RMS), 0.44 m/s (95%) 정도의 오차 수준을 나타낸다.

이에 반해 point 3의 SPAN 측정값 (blue line)에 kinematic vehicle model 수식을 적용하여 point 5의 위치로 이동시킨 SPAN 예측값 (yellow line)의 경우, 차량의 무게중심에서의 동특성을 반영한 속도 추정이 가능하다. 실제 해당 지점에서의 Ellipse-D 측정값 (red line)과 비교 시, angle의 경우 0.70 deg (RMS), 1.47 deg (95%)로 나타났으며, speed의 경우 0.05 m/s (RMS), 0.09 m/s (95%) 정도의 오차 수준이 나타났다. SPAN의 위치 변화에 따른 무게중심에서의 angle 및 speed 오차의 측정값은 Table 1에, 예측값은 Table 2에 각각 정리하였다.



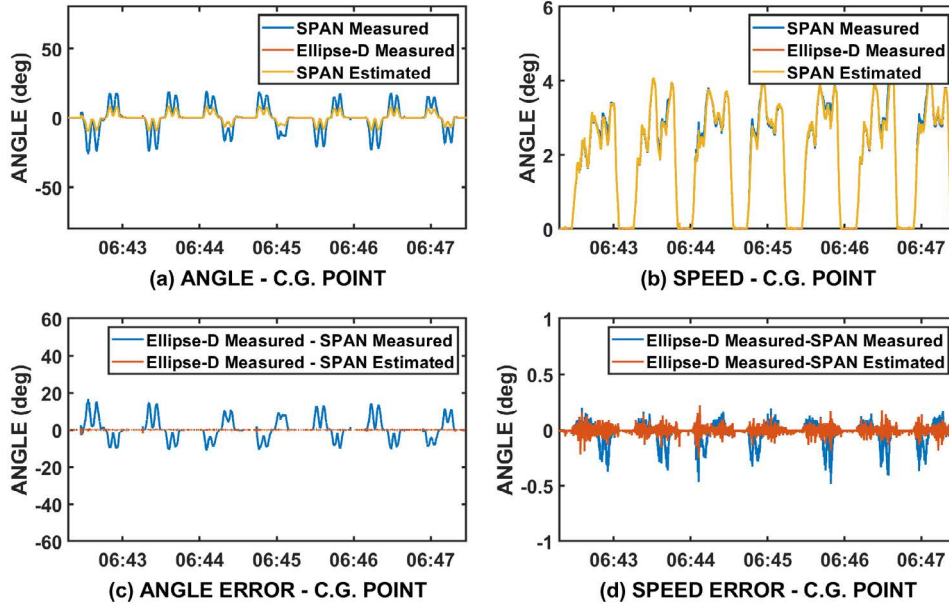


Fig. 7. Actual car test results (2022-01-13).

Table 1. ROS car test results – SPAN measured.

	SPAN measured	Angle [deg]	Speed [m/s]
POINT #1	RMS	11.9788	0.2623
	95%	19.4897	0.4616
POINT #2	RMS	10.0557	0.1170
	95%	13.1385	0.1923
POINT #3	RMS	12.0956	0.2635
	95%	20.3122	0.4402

Table 3. Actual car test results – SPAN measured.

	SPAN estimated	Angle [deg]	Speed [m/s]
Test #1	RMS	4.7131	0.0813
	95%	10.7464	0.2220
Test #2	RMS	4.3174	0.0739
	95%	9.8715	0.1980

Table 2. ROS car test results – SPAN estimated.

	SPAN estimated	Angle [deg]	Speed [m/s]
POINT #1	RMS	0.6285	0.0574
	95%	1.1994	0.0979
POINT #2	RMS	0.5353	0.0445
	95%	0.1177	0.0879
POINT #3	RMS	0.6972	0.0452
	95%	1.4707	0.0888

Table 4. Actual car test results – SPAN estimated.

	SPAN estimated	Angle [deg]	Speed [m/s]
Test #1	RMS	0.0945	0.0314
	95%	0.1867	0.0666
Test #2	RMS	0.1001	0.0272
	95%	0.1698	0.0574

### 3.3 Actual Car Test Results

실제 차량 실험 역시 3.2와 동일한 조건과 환경에서 실시되었다. 실험은 2022/01/13 날짜에 총 두차례 진행되었으며, 실험 시간은 UTC 기준 각각 test #1 (06:30:00 ~ 06:40:00), test #2 (06:40:00 ~ 06:50:00)에 실시되었다.

Fig. 7은 test #2에 대한 실제 차량의 무게중심 부근에 설치된 Ellipse-D와 조수석 부근에 설치된 SPAN에서 측정된 angle 및 speed를 비교한 그래프이다. Figs. 7a,c에서 Angle의 경우 조수석 부근에 설치된 SPAN의 측정값 (blue line)이 무게중심에 설치된 Ellipse-D의 측정값 (red line) 보다 차량 회전에 따른 동특성의 변화가 더 크며, 4.32 deg (RMS), 9.87 deg (95%) 정도의 오차 수준을 나타낸다. 또한, Figs. 7b,d에서 Speed의 경우에도 회전 구간에서 가감속 동특성이 반영되어 실제 무게중심의 값과 차이가 발생하며, 0.07 m/s (RMS), 0.20 m/s (95%) 정도의 오차 수준을 나타낸다.

이에 반해 SPAN 측정값 (blue line)에 kinematic vehicle model 수식을 적용하여 차량의 무게중심 위치로 이동시킨 SPAN의 예측값 (yellow line)은 angle의 경우 0.10 deg (RMS), 0.17 deg (95%)로 나타났으며, speed의 경우 0.03 m/s (RMS), 0.06 m/s (95%) 정도의 오차 수준으로 나타났다. 실제 차량 테스트별 무게중심에서의 angle 및 speed 오차의 측정값은 Table 3에, 예측값은 Table 4에 각각 정리하였다.

### 4. CONCLUSIONS

본 논문에서는 자율주행에서 임의 위치의 다수 센서 결합을 통한 정확한 차량 기준 속도 추정이 가능하도록 하기 위해 차량 내부의 기준 위치 및 임의 위치에 GNSS/INS 장비를 설치하고, kinematic vehicle model 적용을 통해 차량의 동특성 및 기준속도가 제대로 추정되었는지 실험적으로 검증하였다. 알고리즘 검증

을 위한 실제 차량 실험 결과를 살펴보면 알고리즘 수식 적용 이후 예측값은 알고리즘 수식을 적용하기 이전의 측정값 대비 95% 오차 기준 angle은 98.28%, speed는 71.01% 감소하였다.

## ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Hyundai Motor Company.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

All the authors have contributed to the presented work. The first author, J.Y. conducted dynamic experiments and data processing. G.K. conducted overall real car experiments. M.C. conducted overall ROS car experiments. B.P. suggested the original concept of this research and supervised the direction of the research. H.S. and J.K. supported the experimental equipment.

## CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

## REFERENCES

- Arvind, V. 2013, Optimizing the turning radius of a vehicle using symmetric four wheel steering system, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4, 2177-2184
- Hewage, D. C. & Premaratne, I. A. 2016, Wheel Speed Control Algorithm for Rear Wheel Motor Driven Vehicle, *Journal of Engineering and Technology of the Open University of Sri Lanka (JET-OUSL)*, 4, 12-26.
- Lee, M. & Kim, S. 2010, A Experimental Study on the Measurement and Estimation of Vehicle Center of Gravity, *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, 18, 91-99.
- Melendez-Pastor, C., Ruiz-Gonzalez, R., & Gomez-Gil, J. 2017, A data fusion system of GNSS data and on-vehicle sensors data for improving car positioning precision in urban environments, *Expert Systems with Applications*, 80, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.03.018>
- Min, H., Wu, X., Cheng, C., & Zhao, X. 2019, Kinematic and Dynamic Vehicle Model-Assisted Global Positioning Method for Autonomous Vehicles with Low-Cost GPS/Camera/In-Vehicle Sensors, *Sensors*, 19, 5430. <https://doi.org/10.3390/s19245430>
- Nam, K., Hori, Y., & Lee, C. 2015, Wheel Slip Control for Improving Traction-Ability and Energy Efficiency of a Personal Electric Vehicle, *Energies*, 8, 6820-6840. <https://doi.org/10.3390/en8076820>
- Polack, P., Altché, F., d'Andréa-Novel, B., & de La Fortelle, A. 2017, The kinematic bicycle model: A consistent model for planning feasible trajectories for autonomous vehicles?, *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Los Angeles, CA, USA, 11-14 June 2017, pp.812-818. <https://doi.org/10.1109/IVS.2017.7995816>
- Vu, T. M., Moezzi, R., Cyrus, J., & Hlava, J. 2021, Model Predictive Control for Autonomous Driving Vehicles, *Electronics*, 10, 2593. <https://doi.org/10.3390/electronics10212593>
- Xu, S., Peng, H., Song, Z., Chen, K., & Tang, Y. 2018, Accurate and Smooth Speed Control for an Autonomous Vehicle, *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Changshu, China, 26-30 June 2018, pp.1976-1982. <https://doi.org/10.1109/IVS.2018.8500519>



**Jeonghyeon Yun** is a Ph.D. student at the Department of Aerospace Engineering and Department of Convergence Engineering for Intelligent Drone in Sejong University in Republic of Korea. He received the B.S. and M.S. degrees from Sejong University. His research interests include GNSS, INS, and Android Smartphone.



**Gyeongmin Kim** is M.S. student at Department of Aerospace Engineering and Department of Convergence Engineering for Intelligent Drone in Sejong University in Republic of Korea. She received the B.S. degree from Sejong University. Her research interests include GNSS, INS and RTK.



**Minhyoung Cho** is B.S. student at Department of Aerospace Engineering in Sejong University in Republic of Korea. His research interests include GNSS, INS and Vision.



**Byungwoon Park** is an associate professor of Department of Aerospace Engineering and Department of Convergence Engineering for Intelligent Drone at Sejong university. He received the B.S., M.S., and Ph.D. degree from Seoul National University. He worked as a principal researcher at Spatial Information Research Institute in Korea Land and Geospatial Informatix Corporation and a visiting scholar of Aerospace Engineering Sciences Department at the University of Colorado (CU), Boulder. His research interests include GNSS-based safety-critical applications, Compact RTK/ Network RTK, PPP, GNSS augmentation message generation and scheduling algorithms, and ionospheric irregularity detection.



**Howon Seo** received the B.S. degree in mechanical and aerospace engineering from Seoul National University, Seoul, South Korea, in 2008, and Ph.D. degrees in mechanical engineering from the Seoul National University, Seoul, South Korea, in 2015. In 2015, he joined the Division of Research and Development, Hyundai Motor Company, Hwaseong, South Korea, where he is currently a Senior Research Engineer, working on the control software development of electrified vehicle propulsion systems.



**Jinsung Kim** received the B.S. degree in mechanical and automotive engineering from Kookmin University, Seoul, South Korea, in 2007, and the M.S. and Ph.D. degrees in mechanical engineering from the Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, South Korea, in 2009 and 2013, respectively. In 2013, he joined the Division of Research and Development, Hyundai Motor Company, Hwaseong, South Korea, where he is currently a Senior Research Engineer, working on the control software development of electrified vehicle propulsion systems. From 2019 to 2020, he was a Visiting Scholar with the University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, USA. His current research interests include observer design, data-driven control, and optimal control of electric vehicles.