

4륜 조향이 가능한 자율 주행 이동체를 위한 주행 모드 변환 기반의 모션 제어 알고리즘

A Motion Control Method Based on the Drive Mode Changing for the Autonomous Mobility With 4-wheel-steering System

조용성¹, 박종우², 정현환^{1,*}

(Yongseong Cho¹, Jongwoo Park², and Hyunhwan Jeong^{1,*})

¹Department of Control and Instrumentation Engineering Korea University

Abstract: This study presents a practical motion control algorithm and its implementation for an autonomous four-wheel-steering (4WS) vehicle. The proposed motion control algorithm utilized the mode-changing characteristics of a vehicle capable of independently operating front- and rear-wheel steering. A motion control algorithm incorporating a driving mode-changing strategy was developed based on the kinematic modeling of a 4WS vehicle for each driving mode. For 4WS vehicles, the kinematic characteristics of rotational motion vary according to the steering mode. To address this, an error-based control system was designed to ensure accurate tracking of target positions, and a control strategy was implemented that dynamically adjusts the steering mode based on the ratio of linear to angular velocities, determined by both position and orientation errors. In order to verify the validity of the proposed motion control algorithm, it was implemented on a 4WS vehicle hardware platform equipped with multiple positioning sensors and an integrated sensor fusion system.

Keywords: 4-wheel steering, vehicle motion control, autonomous vehicle

1. 서론

자율 주행 시스템은 다양한 응용 분야에서 점점 더 중요한 역할을 하며, 제한된 공간에서의 기동성, 정밀한 경로 추종, 그리고 안정적인 내비게이션이 필수적으로 요구된다. 그러나 기존의 전륜 조향 및 차동 구동 시스템은 좁은 공간에서의 자유로운 기동과 측면 이동이 어려우며, 복잡한 환경이나 고속 주행 시 경로 추종 안정성 측면에서 한계를 보인다. 4륜 조향 시스템(Four-Wheel Steering, 4WS)은 좁은 공간에서도 뛰어난 기동성과 유연한 움직임을 제공하며, 작은 회전반경과 대각선 이동이 가능해 높은 기동성과 유연한 조향 능력을 제공하여 회전반경 축소 및 대각선 이동이 가능하며, 기존 방식의 한계를 극복할 수 있는 유망한 대안으로 주목받고 있으며, 자율 주행 및 이동 로봇 분야에서 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다.

4륜 조향 시스템의 기본 거동을 이해하기 위해 다양한 기구학 모델링 기법이 제안되어 왔으며, 특히 조향각과 주행 궤적 간의 관계를 정량적으로 분석하는 연구가 활발히 수행되었다. Calequela 등[3]과 Lee 등[10]은 각각 4WS 및 4WISD (Four Wheel Independent Steering/Driving) 시스템에 대한 기구학적 접근을 확장하여, 동역학 모델을 수학적으로 정립하였

다. 이와 함께, 전·후륜 조향 방향에 따라 다양한 조향 모드가 제안되었으며, 각 모드의 주행 특성에 대한 분석도 활발히 수행되었다. Spentzas 등[2]와 Arvind [14]는 전·후륜을 반대로 조향할 경우 회전반경이 줄어들어 기존 2WS보다 기동성이 우수함을 분석하였으며, Setiawan 등[13]과 Wang 등[25]은 전·후륜을 동일하게 조향하는 parallel 방식을 적용한 제어 전략을 제시하였다. 기구학 모델을 바탕으로, 실제 차량 또는 로봇 시스템에 적용할 수 있는 다양한 제어 전략이 제안되었다. 이길수 등(2010)은 Ackermann 기반 4WS 제어를 실차 실험으로 입증하였고[1], Grepl 등은 교육용 4WS/4WD 테스트베드를 개발하여 응용 연구 기반을 마련하였다[4]. 또한 Park와 Suh는 4WS를 두 개의 조향 구동기로 구현하는 전후대칭 조향 메커니즘을 제안하고, 제자리 회전 등 기본 성능을 시제품으로 검증하였으며[11], Chen 등은 하중 분포를 고려한 제어를 통해 조향 안정성을 향상시켰다[5]. 나아가, Kwon은 조향 모터의 LoE(Loss of Effectiveness) 고장을 고려한 고장 허용 제어 전략을 제시하고, 후륜 조향을 통해 전륜 조향 저하를 보완하였다[24]. 이러한 제어 기반 연구는 점차 다양한 이론적 기법으로 확장되었다. LQR [6], MPC [16], SMC [20,12], 퍼지 제어[8],

*Corresponding Author

Manuscript received August 26, 2025; revised September 22, 2025; accepted November 6, 2025

조용성: 고려대학교 제어계측공학과 연구원(yseong9999@gmail.com, ORCID[®] 0009-0009-4259-8112)

박종우: 한국기계연구원 첨단로봇연구센터 책임연구원(jekiel@kimm.re.kr, ORCID[®] 0000-0002-7197-0069)

정현환: 고려대학교 제어계측공학과 부교수(hyunhwanjeong@korea.ac.kr, ORCID[®] 0000-0001-7616-6531)

※ 본 연구는 정부의 재원으로 한국연구재단의 지역대학우수과학자지원사업(NRF-2022R111A3066094)과 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00443339, RS-2024-00443400).

모델 매칭 제어[17], 적응 제어[15], 관측기 없는 상태 피드백 제어[22] 등 다양한 제어 알고리즘이 4WS 시스템에 적용되어 정밀 조향과 주행 안정성 향상을 도모하고 있다.

한편, 보다 높은 정밀도와 실시간 대응성을 확보하기 위해, 센서 융합 기반의 제어 전략 또한 활발히 연구되고 있다. He Bo는 엔코더와 RTK-GPS를 활용한 이중 확장 칼만 필터(EKF) 기법과 Dead Reckoning 전환 구조를 통해 정밀한 위치 및 자세 추정 기법을 제안하였다[7]. Kim 등은 2D LiDAR와 IMU를 활용해 사람과 공유하는 실내 환경에서 시간 간격 기반 충돌 회피 전략으로 안전한 4WIS 로봇 주행을 실현하였다[9].

최근에는 이러한 전통적인 제어 기법을 보완하고, 시스템의 복잡성과 불확실성에 효과적으로 대응하기 위해, 딥러닝 및 강화학습 기반 인공지능 제어기법이 적극적으로 적용되고 있다. Park 등은 DQN 기반 제어기로 조향 고장 상황에서도 안전한 주행이 가능한 달 탐사 로버를 제안하였고[19], Liu 등은 강화학습을 통해 최적화된 MPC 제어기로 4WISD 차량의 주행 안정성을 향상시켰다[23]. Zhang 등은 전이 학습 기반 정책을 통해 복잡한 환경에서도 높은 적응성과 안정성을 확보하였다[21]. 이처럼 다양한 연구가 축적되어 왔음에도 불구하고, 4륜 조향 시스템은 그 복잡한 제어 특성으로 인해 여전히 심층적인 탐구가 요구되는 분야이다. 특히, 조향 모드 간의 실시간 전환, 비정형 환경에서의 경로 추종, 그리고 고장 상황을 고려한 제어 전략에 대한 연구는 아직 초기 단계에 머무르고 있으며, 보다 심화된 이론 정립과 실증적 검증이 요구된다.

본 연구에서는 4륜 조향 차량의 전·후륜 독립 조향에 따른 주행모드 변환을 기반으로한 모션 제어 알고리즘을 제안하고, 실제 4륜조향 차량에 적용하여 그 성능을 검증한다. 제안된 모션 제어 알고리즘은 4WS 시스템의 기구학적 이점을 기반으로 설계되었으며, 위치 및 자세 오차 기반의 직관적인 제어 구조를 채택하였다. 이를 통해 전륜과 후륜의 조향각을 독립적으로 제어하여 전륜 조향, 평행 조향, 대칭 조향의 다양한 주행 모드를 구현하고, 주행 중에는 속도조건에 따라 조향 모드 전환 전략을 적용함으로써 목표위치 및 자세에 성공적으로 도달할 수 있도록 경로 제어를 실현한다. 제안된 4륜 조향 이동체의 주행 모드 변환기반 모션제어 알고리즘을 실제 4WS 차량 플랫폼에 적용하고, GNSS측위 센서 융합을 기반으로 다양한 주행 시나리오의 경로 추종 정확도를 평가한다.

II. 차량 기구학

제안한 4륜 조향 차량의 시스템의 제어를 위하여 차량의 기구학 분석을 수행하였다. 네 개의 바퀴로 구성된 본 기구학 모델은 그림 1과 같이 두 개의 바퀴를 포함하는 동등한 싱글 트랙(single-track) 모델로 치환하여 다룰 수 있다. 차량의 자세는 $[x \ y \ \psi]^T$ 와 같이 Cartesian 좌표계 상에서 3차원 변수로 나타낼 수 있으며 발생하는 운동은 평면상의 움직임으로 표현될 수 있다. x 와 y 는 2차원 좌표를 의미하며 ψ 는 전역 좌표계에 대한 차량 세시의 각도이다.

1. 정기구학 해석

모바일 로봇의 정기구학은 각 바퀴의 정보에 따라 로봇의 위치 및 자세 변화를 추정하는 과정으로 제안하는 모델에서는 각 바퀴의 선속도 $v_{f/r}$ 와 조향각 $\delta_{f/r}$ 으로부터 위치 및 자

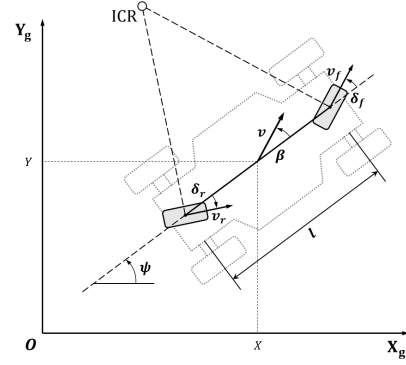


그림 1. 4륜 조향 차량의 기구학 다이어그램.

Fig. 1. Kinematic model of 4WS vehicle.

세의 속도 $[\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\psi}]^T$ 를 결정하여 미소 시간(dt) 동안의 위치와 자세의 변화를 계산한다. 그림 1에 표시된 파라미터를 사용하면 다음과 같이 정리할 수 있다[6].

$$\beta = \tan^{-1} \frac{\tan \delta_f + \tan \delta_r}{2} \quad (1)$$

$$v = \frac{v_f \cos \delta_f + v_r \cos \delta_r}{2 \cos \beta} \quad (2)$$

$$\omega = \frac{v_f \sin \delta_f - v_r \sin \delta_r}{l} \quad (3)$$

β 는 side-slip angle로, 전/후륜의 조향각 $\delta_{f/r}$ 에 의해 결정되며 차량의 진행 방향을 나타낸다. 또한 선속도 $v_{f/r}$ 을 통해 차량 전체의 선속도 v 와 각속도 ω 를 도출할 수 있다. 이때, r 은 바퀴의 반경, l 은 축거로 전/후륜 바퀴 사이의 거리이다. 상기 식을 통해 얻어지는 로봇의 위치 및 자세에 대한 속도는 다음과 같다.

$$\dot{x} = v \cos(\psi + \beta) \quad (4)$$

$$\dot{y} = v \sin(\psi + \beta) \quad (5)$$

$$\dot{\psi} = \frac{v \cos \beta (\tan \delta_f - \tan \delta_r)}{l} \quad (6)$$

2. 역기구학 해석

역기구학은 정기구학과 반대되는 개념으로, 주어진 목표 위치와 자세 $[x \ y \ \psi]^T_{desired}$ 에 대하여 이를 추종하기 위한 차량 각 바퀴의 $v_{f/r}$ 와 $\delta_{f/r}$ 를 도출한다. 차량의 조향 알고리즘은 애커만 기하학(ackermann geometry)을 따르므로 그림 2에 그려진 바와 같이 차량의 순간회전중심(instantaneous center of rotation)과 차량 세시 간의 기하학적 관계를 통해 전륜과 후륜의 조향각을 계산할 수 있다[13]. 즉, 전륜과 후륜으로부터 수직으로 연장한 직선은 한 점, ICR에서 교차한다는 점을 활용한다. 결정된 ICR의 위치를 바탕으로 ICR로부터 차량 세시에 내린 수선의 발과 후륜과의 거리 c_1 , ICR과 세시 간 수직 거리인 c_2 를 계산하면 이를 가지고 다음과 같이 조향각을 도출할 수 있다.

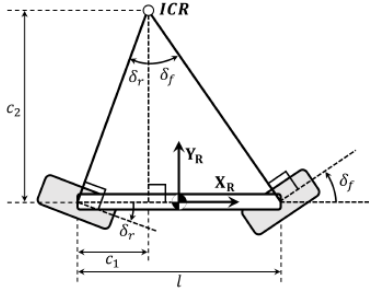


그림 2. 4WS차량의 ICR기반 조향 기하관계.

Fig. 2. Schematic of 4WS steering geometry with ICR.

$$\delta_f = \tan^{-1} \left(\frac{l - c_1}{c_2} \right) \quad (7)$$

$$\delta_r = \tan^{-1} \left(\frac{c_1}{c_2} \right) \quad (8)$$

앞서 계산된 조향각과 더불어, 목표 추종을 위해 필요로 되는 차량 전체의 v 와 ω 에 대한 식 (2)와 식 (3)의 연립방정식 해를 구하면 v_f 와 v_r 을 유도 가능한데, 이에 대한 식은 다음과 같다.

$$v_f = \frac{4v \cos \beta \sin \delta_f + l \omega \cos \delta_r}{2 \sin (\delta_f + \delta_r)} \quad (9)$$

$$v_r = \frac{4v \cos \beta \sin \delta_f - l \omega \cos \delta_f}{2 \sin (\delta_f + \delta_r)} \quad (10)$$

III. 제어기법

제안하는 제어기법은 초기 위치 및 자세와 목표 위치 및 자세가 주어졌을 때, 위치 및 자세 오차 피드백에 기반하여 오차를 추종하는 페루프 제어 방식이다. 본 방식에서 사용되는 위치 및 자세 오차는 다음과 같다[17].

$$\rho = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (11)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \right) \quad (12)$$

$$\beta = \psi_{desired} - \alpha \quad (13)$$

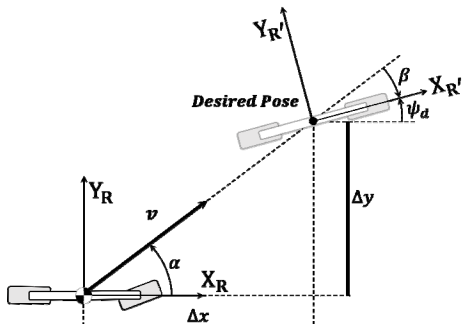


그림 3. 위치/자세 추종을 위한 제어 법칙 파라미터.

Fig. 3. Schematic of the control law

각 오차는 차량의 현재 위치와 자세를 기준으로 하는 지역 좌표계 상에서 정의되었다. 거리 오차 ρ 는 평면 상의 직선 거리의 크기를 의미하며 제어하는 차량의 속도에 주된 영향을 끼친다. heading 오차 α 는 현재 위치에서 목표 위치를 추종하기 위해 필요한 방향으로의 각도차를 의미한다. 또 다른 각도 오차인 β 는 목표 자세 오차로 현재 자세 각과 목표 자세 각 간 각도 차이이다. 정의된 세 가지 오차에 대하여 각각 피드백 제어를 위한 비례 이득값 K_ρ , K_α 그리고 K_β 를 정의할 수 있다. 이득값을 포함하여 목표 위치 및 자세 추종을 위해 요구되는 차량의 선속도와 각속도를 정의할 수 있다.

$$v = K_\rho \rho \cdot \frac{\vec{v}}{\|\vec{v}\|} \quad (14)$$

$$\omega = (K_\alpha \alpha + K_\beta \beta) \hat{z} \quad (15)$$

선속도 v 는 거리 오차와 그의 이득값이 곱해진 형태로 주행에 필요한 차량의 속도를 제어하는 데 관여한다. 각속도 ω 는 목표 위치를 향하는 각도 오차와 목표 자세 추종을 위한 각도 오차 두 가지가 각 이득값과 곱해져 합산된 값으로 $K_\alpha \alpha$ 와 $K_\beta \beta$ 의 합으로 구성된다.

선속도 v 와 각속도 ω 가 결정되면, 이를 바탕으로 각속도 공식 $\omega \times r = v$ 를 사용하여 r 에 대한 식으로 정리함으로써 벡터 r 를 계산할 수 있다. 결과적으로 그림 4와 같이 차량의 조향각을 결정하는 ICR의 위치($r = (r_x, r_y)$)를 얻을 수 있게 된다. 정리 과정은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v &= [\omega] \times r \\ [\omega]^\dagger v &= [\omega]^\dagger [\omega] \times r \\ r &= [\omega]^\dagger v \end{aligned} \quad (16)$$

수식 상의 $[\omega]$ 는 반대칭행렬(skew-symmetric matrix)로 각속도 벡터 ω 의 역행렬을 구하기 위해 사용한다. 또한 각속도 식에서 양 변의 ω 를 소거하기 위해 역행렬이 계산되어야 하며, 이때 ω 의 최대계수는 3보다 작으므로 역행렬이 존재하지 않기 때문에 의사역행렬(pseudoinverse)을 사용하도록 한다. 앞선 과정들에 기반하여 최종적으로 ICR까지의 위치 벡터인 r 을 도출해낸다(그림4 참조).

기본적인 주행 제어와 더불어, 본 논문에서는 차량의 조향 모드를 조절하는 새로운 제어 전략을 제안한다. 제안하는 제어 전략은 추종하려는 목표 위치 및 자세에 대하여 이를 위해 필요한 선속도와 각속도의 크기를 비교, 상황에 따라 알맞은 조향 모드를 전환시켜 적절한 주행자세를 생성하도록 한다. 사용 가능한 모드는 그림 5에 도시된 바와 같이 총 세 가지로 구성되는데, 각각 전륜 조향, 대칭 조향, 평행 이동이다.

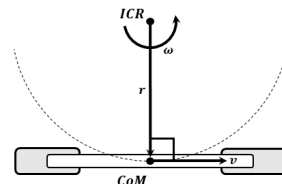
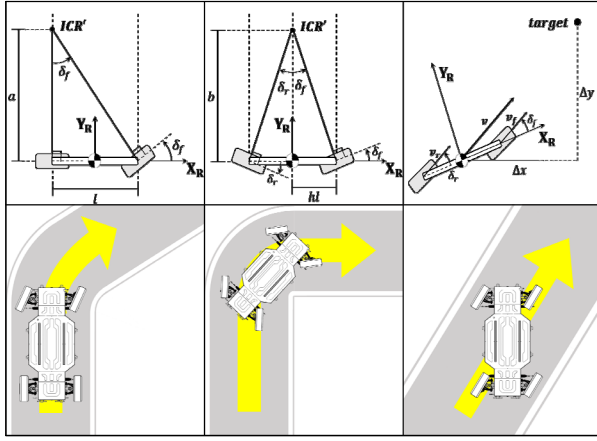


그림 4. 회전반경 계산을 위한 ICR.

Fig. 4. ICR for turning-radius calculation.



(a) Front mode. (b) Symmetrical mode. (c) Crab mode.

그림 5. 조향 모드 별 작동 알고리즘과 실구동 예시.

Fig. 5. Illustration of steering modes.

그림 5(a)는 전륜 조향으로 전통적인 차량의 조향 방식으로 널리 알려져 있다. 이는 오직 전륜만을 가지고 조향 동작을 수행하는 방식이다. 이는 비교적 적당한 속도와 회전이 필요시 될 때 적용된다. 또한, 본 알고리즘에서는 상황에 따라 적절한 조향 모드로의 전환을 수행하므로 이를 위하여 전환된 조향 모드에 따라 ICR 의 위치를 재조정하는 과정이 필요하다. 전륜 조향의 경우, 해당 모드를 만족하기 위해서 회전 반경 중심 ICR' 의 위치는 차량의 지역 좌표계 기준 후륜 축에 수직인 연장선 위에 위치하게 되며, 차량의 이동 속도 및 회전 속도를 기반으로 그림 5(a)의 위쪽 그림과 같이 표현된다. 이에 따라 x 좌표의 값은 $-b$ 방향으로 축거의 절반 크기만큼 위치한 $-hl$ 이다. y 좌표를 결정하는 요인은 각속도 공식을 다시 만족하는 벡터 r' 을 도출하는 것이다. 이는 벡터의 투영 및 평행 이동 특성을 사용하면 그림 6의 좌측과 같이 새롭게 조정된 ICR' 이 계산될 수 있다. 이 과정을 통해 선속도와 각속도의 크기는 ICR 의 위치를 조정하기 전과 동일하게 유지된다. 임의의 벡터 $a = (0, a_y)$ 와 회전반경을 나타내는 벡터 $r = (r_x, r_y)$ 를 정의하여 다음과 같이 식을 도출할 수 있다.

$$ICR' = (-hl, l_a \tan \theta) \quad (17)$$

여기서 $l_a = r \cos \theta / (\tan \theta) - l_b$ 이고 $l_b = hl - r \sin \theta$ 이다.

그림 5(b)는 대칭 조향 모드로 전/후륜을 모두 조작하며 이 때, 전륜과 후륜의 조향각 크기는 동일하고 방향은 반대인 상태가 된다. ICR' 의 위치는 그림 6의 우측과 같이 차량 세시에

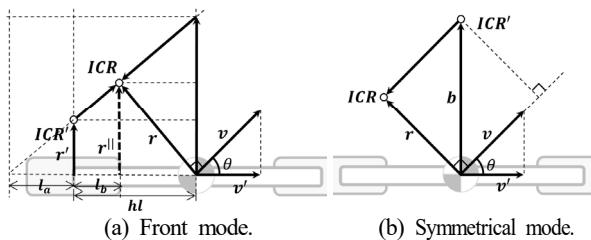


그림 6. 조향 모드에 따른 ICR의 위치 조정.

Fig. 6. ICR position adjustment based on steering modes.

수직이며 중심점을 지나는 직선상에 위치한다. 따라서 x 좌표는 0이 된다. $v \cos \theta = v'$ 이고, $b \cos \theta = r$ 이므로, y 축 좌표는 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$ICR' = \left(0, \frac{\|r\|}{\cos \theta} \right) \quad (18)$$

평행 조향 모드는 그림 5(c)에 해당하며, 목표 위치에 대한 직선 방향으로 이동하는 모드로 적은 회전과 높은 속도가 필요할 때 적용되며 이 경우에는 조향각과 바퀴 속도는 따로 구분되어 계산되므로 ICR 과 관련된 계산 과정을 필요로 하지 않는다. 앞서 재조정된 ICR 의 위치를 고려하여 다시금 차량의 지리학적 관계를 통해 정의한 모드 별 조향각은 표 1과 같다.

전륜 조향과 대칭 조향 모드에서는 조정된 ICR 과 새시의 위치를 바탕으로 전/후륜 조향각이 결정되었고 평행 이동의 경우 차량이 목표 지점을 향해 직선 운동이 가능하도록 차량의 현재 위치를 기준으로 목표 지점에 직선 방향이 되도록 조향각이 결정된다. 다시 말하면 그림 5(c)에 그려진 바와 같이, $v_{f/r}$ 의 방향, 즉 단위 벡터는 v 의 그것과 동일하다.

그림 7은 각 모드 간 전환되는 기준을 나타낸다. 현재 상태에서 추종할 목표 위치와 자세에 따라 결정된 v 와 ω 의 크기를 기준으로 영역을 구분하였다. 먼저, v 가 설정된 임계값 이하인 경우는 비교적 단거리 내에서 높은 정확도의 자세 추종이 요구되는 상황으로 간주되며, 이에 따라 대칭 조향 모드가 선택된다. 반면, ω 가 임계값을 초과하고 v 가 상대적으로 작은 경우에는 각도 오차보다 직선 거리 오차의 추종을 우선시하기 위해 평행 이동 모드가 적용된다. 이 두 조건에 해당하지 않는 경우에는 일반적인 주행 조건으로 간주하여 전륜 조향 모드가 선택된다. 각 모드의 임계값은 이동체의 성능에 따라 실험적으로 선택할 수 있다.

제안된 모션 제어 알고리즘은 목표 위치 및 자세와 현재 위치 및 자세 간의 오차를 계산하여 비례 제어를 통해 선속도 및 각속도를 산출한다. 동시에 제안된 알고리즘에 따라 최적의 조향 모드를 선정하고, 이를 기반으로 역기구학 계산을 수

표 1. 조향 모드 별 조향각 결정 수식.

Table 1. Steering-angle equations by steering mode.

Steer \ Mode	Front	Symmetrical	Crab
δ_f	$\tan^{-1} \frac{l}{a}$	$\tan^{-1} \frac{hl}{b}$	$\tan^{-1} \frac{\Delta y}{\Delta x} - \psi_{current}$
δ_r	0	$-\tan^{-1} \frac{hl}{b}$	$\tan^{-1} \frac{\Delta y}{\Delta x} - \psi_{current}$

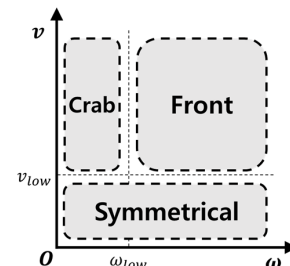


그림 7. 조향 모드 결정 기준.

Fig. 7. Diagram of mode transition law.

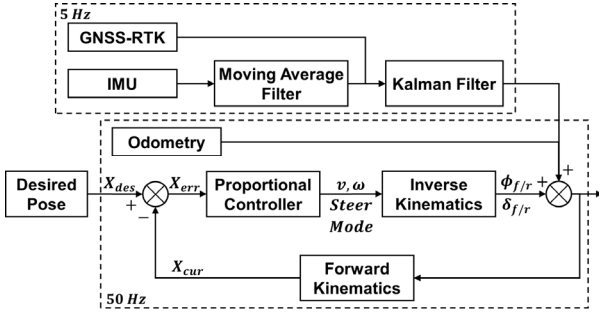


그림 8. 시스템 제어기 다이어그램.

Fig. 8. Block diagram of the proposed control system.

행하여 이동체의 제어 입력을 결정한다. 이후, 순기구학을 통해 현재 위치 및 자세를 추정하고 이를 이용해 피드백 루프를 구성하며, 해당 피드백 시스템은 50Hz의 주기로 동작한다. 이와 함께, 실제 차량에 기반한 실험 시에는 외부 센서로부터 얻은 융합 데이터를 위치와 자세를 보정하는데 활용한다. 그림 8에 제시된 제어 다이어그램에서 상단 블록은 피드포워드 경로에 해당하며, IMU와 Odometry 데이터를 칼만 필터로 융합하여 차량의 헤딩각을 추정한다. 또한, GNSS-RTK를 통해 취득한 위·경도 데이터를 이용해 차량의 초기 자세를 기준으로 변위값을 계산할 수 있으며, 이 두 데이터를 활용하여 5Hz 주기로 모빌리티의 위치와 자세를 보정한다.

IV. 실험 및 결과

1. 실험 환경

기구학적 분석을 바탕으로 새롭게 제안된 제어 기법을 실증하기 위하여 주행 알고리즘을 실제 4륜 조향 모빌리티 플랫폼인 PIXKIT 2.0(Pixmoving, San Francisco, CA, USA)에 장착된 산업용 컴퓨터(IPC-i9(9900))에 구현하였다. 실험 차량에는 0.1도 및 RTK상에서 1cm 내외의 오차를 가진 INS 통합 GNSS-RTK 모듈(CGI-410)이 장착되어 있으며, 전체 시스템 구성은 그림 9에 제시되어 있다. 알고리즘 검증에 위한 제어 알고리즘은 Linux 18.04 기반의 ROS Melodic 상에서 C++ 언어로 구현되었으며, 제어 노드를 포함한 전체 시스템 구성도는 그림 10에 도시되어 있다. 그림에 주어진 제어시스템에서 위치 및 자세 추정은 주로 Odometry 데이터를 기반으로 수행되며, 주기적으로 IMU 및 GNSS-RTK 데이터를 융합하여 보정한다. 보정 과정에서는 GNSS-RTK로부터 계산한 x, y 변위와

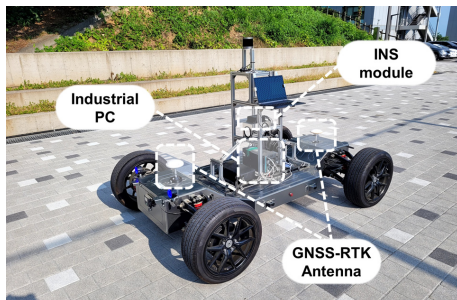


그림 9. 실험용 하드웨어(PIXKIT).

Fig. 9. Experimental vehicle hardware (PIXKIT).

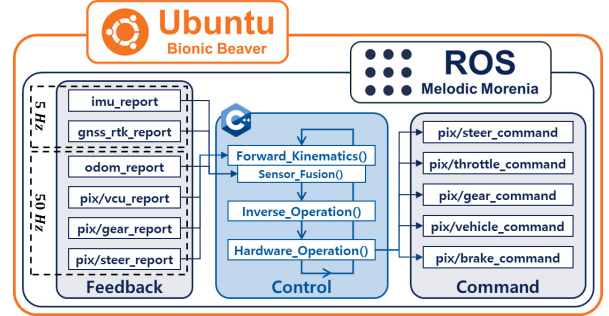


그림 10. 하드웨어 플랫폼 제어 소프트웨어 구성도.

Fig. 10. Software architecture for hardware platform control.

IMU로부터 측정된 yaw 값을 Kalman filter등의 센서융합 알고리즘(그림 10의 sensor fusion 노드)을 통해 현재 위치와 자세를 초기화한다. 이후 목표 자세와의 오차를 기반으로 Inverse Kinematics에서 조향각 및 속도를 계산하고, 계산된 파라미터를 각 액추에이터로 전달하여 차량을 구동한다. 이러한 과정을 반복하여 목표 오차 범위 내에 도달할 때까지 위치와 자세의 추종을 수행한다. 본 실험에서는 위치 오차 허용 범위를 기존 4륜조향 이동체의 알고리즘에서[7][16] 경로추종오차가 10cm 내외로 정의되었음을 참고하여, 각 좌표축(x, y) 기준으로 0.1 m, 자세 오차를 0.087 rad($\approx 5^\circ$) 이하로 설정하였다. 바퀴별 조향각과 속도 제한은 시뮬레이션과 동일하게 $\pm 25^\circ$ 로 제한되되, 속도의 최대값은 안전성을 고려하여 0.7 m/s로 제한하였다.

표 2. 사분면별 추종 실험 조건.

Table 2. Tracking experiment conditions for each quadrant.

Quadrants	X_{des} [m]	ψ_0 [rad]	ψ_d [rad]
1/4	[15, 15]	0	0
2/4	[-13, 6]	0	0.7854
3/4	[-10, -10]	0.5236	3.1416
4/4	[7, 6]	0	0

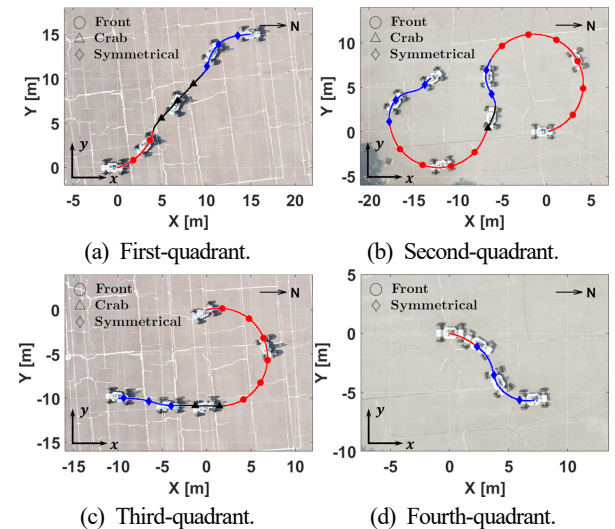


그림 11. 실차기반 단일 위치 및 자세 추종 실험.

Fig. 11. Experimental results of single position & pose tracking.

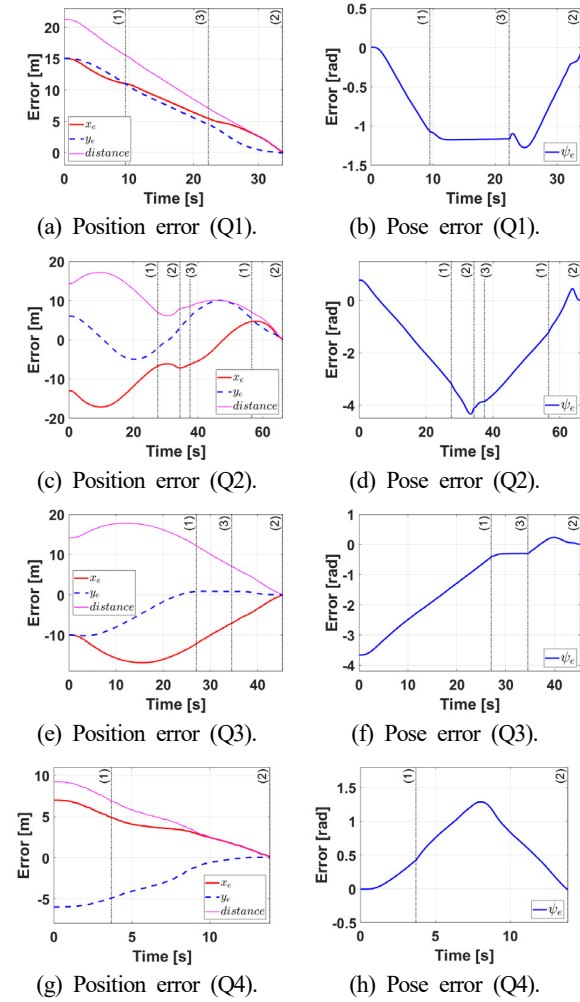
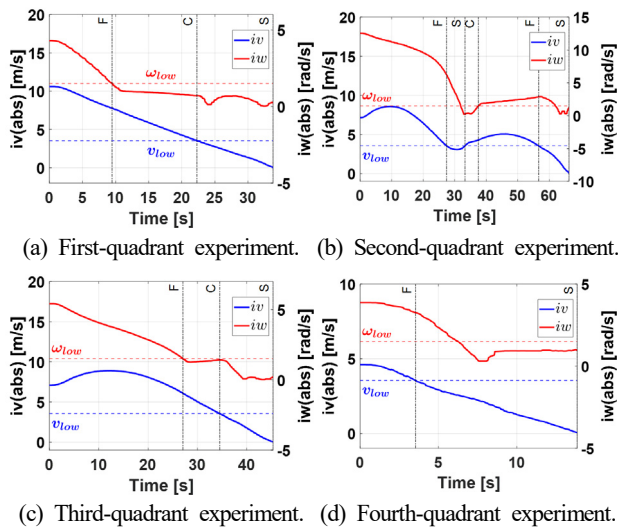


그림 12. 사분면 실험 별 위치 및 자세 오차.

Fig. 12. Position and pose errors for each quadrant experiment.

그림 13. 목표 추종 속도(v , ω)에 따른 조향 모드 변화.Fig. 13. Steering mode transitions by reference velocities(v , ω).

2. 실험 및 결과

표 2에 정리된 바와 같이, 차량의 초기 위치를 원점으로 설

정한 후, 각 사분면에서 다양한 목표 위치와 자세를 추종하도록 실험을 수행하였다. 그림 11은 실제 차량의 주행 모습과 함께, 전체 궤적 및 조향 모드의 전환 과정을 시각적으로 나타낸다. 주행 중 적용된 조향 모드는 각각 전륜 조향은 원, 대칭 조향은 마름모, 평행 이동은 삼각형 기호로 표시하였다. 각 조향 모드는 알고리즘 설계 시 정의된 적용 조건에 따라 적절하게 전환됨이 확인되었다. 예를 들어, 제1사분면에서의 주행 궤적을 살펴보면, 초기에는 필요한 회전량과 이동 거리가 모두 크므로 전륜 조향이 적용되었고, 이후 회전량이 감소함에 따라 평행 조향으로 전환되었다. 주행 후반 목표 지점에 근접함에 따라 이동 거리가 짧아지면서, 대칭 조향 모드가 선택되는 양상이 관찰되었다.

각 사분면에 대한 주행 실험 결과는 그림 12에 정리되어 있다. 주행 중 적용된 조향 모드는 (1), (2), (3)으로 표기되었으며 각각 전륜조향, 대칭조향, 평행조향이다. 또한 각 사분면 실험에서의 조향 모드의 변화와 제어 속도 입력에 대한 관계는 그림 13에서 보여주고 있다. 결과적으로, 위치 및 자세 오차에 대하여 점진적으로 0으로 수렴하였으며, 표 3에 표시한 바와 같이 주행에 따른 최대 오차는 유클리디언 거리 기준 0.0979 m, 각도 0.0818 rad 이하로 측정되어 성공적으로 목표 위치와 자세를 추종하였음을 보여준다.

단일 위치 및 자세 추종 실험 외에도 복잡한 주행 환경에서의 성능을 평가하기 위해 다수의 웨이포인트를 순차적으로 주행하는 실험을 추가로 수행하였다. 웨이포인트 기반 주행을 실제 운용 시 정적 및 동적 장애물을 회피하기 위한 지역 경로 계획(Local Path Planning) 단계에서 활용될 수 있다. 각 웨이포인트의 목표 위치 및 자세 정보는 표 4에 정리되어 있다. 한편, 중간 웨이포인트(wp1~wp6)에 대해서는 자세각에 대한 허용 오차를 0.1745 rad($\approx 10^\circ$)로 설정하였다.

주행 궤적은 그림 14에 제시되어 있으며, 총 7개의 웨이포인트가 함께 표시되어 있다. 그림 13(a)는 드론을 활용하여 실제 주행 환경을 상공에서 촬영한 영상에 주행 궤적과 조향 모

표 3. 사분면 주행 실험 최종 추정 오차.

Table 3. Final estimation errors by quadrant.

Quadrants	e_x [m]	e_y [m]	e_ψ [rad]
1/4	0.0712	-0.0009	-0.0818
2/4	0.0930	0.0060	0.0289
3/4	-0.0977	0.0070	0.0187
4/4	0.0948	0.0056	0.0133

표 4. 웨이포인트 추종 실험 조건.

Table 4. Experimental conditions for waypoint tracking.

Waypoint	latitude	longitude	pose angle [rad]
start	36.611530	127.286217	4.813793
wp1	36.611391	127.286270	4.818682
wp2	36.611350	127.286328	0.083872
wp3	36.611412	127.286384	1.622880
wp4	36.611503	127.286451	0.273010
wp5	36.611584	127.287291	0.129876
wp6	36.611531	127.287381	4.927554
wp7	36.611252	127.287426	4.777464

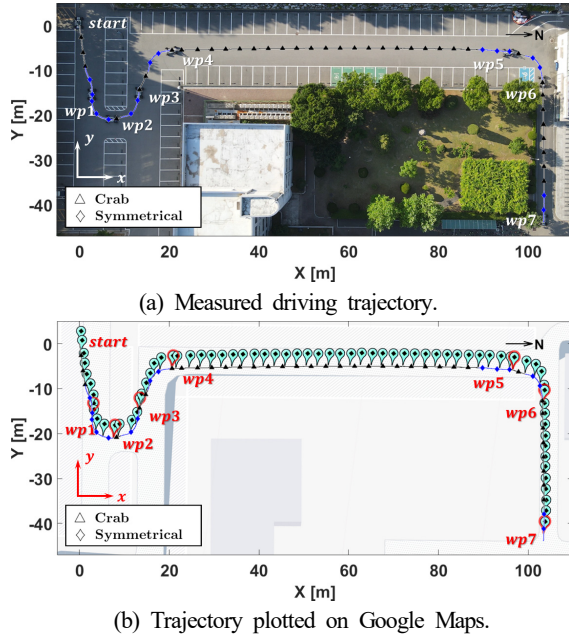


그림 14. 웨이포인트 기반 주행 실험 결과.

Fig. 14. Experimental results of waypoint tracking.

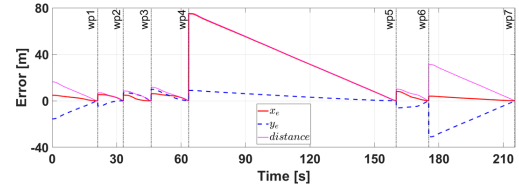
드를 중첩한 결과이며, 실험 현장의 실제 지형과 차량 이동 경로를 직관적으로 확인할 수 있다. 그림 13(b)는 동일한 위치 데이터를 기반으로 구글 지도 상에 주행 경로와 조향 모드를 시각화한 것으로, 궤적 형상 및 조향 모드 전환 시점을 보다 명확히 분석할 수 있다. 주행 중 조향 모드는 그림 11에 나타난 단일 위치 및 자세 추종 실험 결과와 동일한 방식으로 시각화하였다. 전체 주행 거리는 약 130 m이며, 표 5에는 각 웨이포인트에 대한 추종 오차가 정리되어 있다. 최종 웨이포인트 도달 시점에서의 위치 오차는, 유클리디언 거리 기준으로 0.0987 m, 자세 오차는 0.0213 rad로 측정되었다. 이는 제한한 제어기가 복잡한 주행 환경에서도 안정적으로 위치와 자세 추종을 수행함을 보여준다.

상세한 주행 결과(오차변화)는 그림 14에 제시하였다. 전체 주행 과정에서 각 웨이포인트를 수직 점선을 통해 구분하였으며, 그림 14(b)에는 각도 오차와 함께 주행 중 적용된 조향 모드도 시각화하였다. 각 웨이포인트 간의 추종 오차는 단일 위치 및 자세 추종 실험과 마찬가지로 점진적으로 0으로 수렴하는 양상을 보였으며, 이러한 경향은 최종 웨이포인트까지 일관되게 반복되었다.

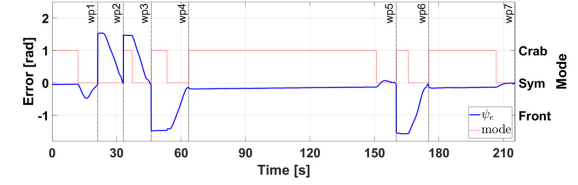
표 5. 웨이포인트 주행 실험 최종 추정 오차.

Table 5. Final estimation errors by waypoint.

Waypoint	e_x [m]	e_y [m]	e_ψ [rad]
wp1	0.0326	-0.0966	-0.0459
wp2	0.0628	-0.0776	-0.0250
wp3	0.0520	0.0953	-0.0516
wp4	0.0695	0.0208	-0.1183
wp5	0.0946	-0.0231	-0.0290
wp6	0.0506	-0.0978	-0.0427
wp7	0.0448	-0.0878	0.0213



(a) Position errors.



(b) Pose errors.

그림 15. 웨이포인트 기반 주행 실험 결과.

Fig. 15. Position and pose errors for waypoint experiment.

V. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 전후륜 독립 조향이 가능한 4륜 조향 이동체의 차량의 조향 특성에 따른 주행모드 변환 전략을 기반으로 한 모션 제어 기법을 제안하였다. 이를 위하여 4륜조향 이동체의 기구학 해석을 바탕으로한 모션 제어기를 설계하였고, 제안된 제어 알고리즘을 실제 4륜 조향 이동체 하드웨어에 적용하고 다양한 시나리오의 실험을 통해 그 유효성이 검증되었다. 제안한 모션 제어 알고리즘은 4륜 조향 이동체의 거동 특성을 반영하여 목표 위치에 도달하기 위한 동작을 생성함으로써 기존의 이동체 동작을 위하여 경로생성 및 경로를 추종하는 제어 없이 목표 위치를 제공함에 따라 목표에 도달하기 위한 적절한 동작이 생성됨을 확인할 수 있었다. 따라서 제안한 알고리즘에 장애물 회피 알고리즘을 결합하면 복잡한 경로계획 알고리즘을 사용하지 않고도 주행 동작을 생성할 수 있을 것이다. 향후, 제안한 모션 알고리즘을 개선하고 동적/정적 장애물 회피 알고리즘을 결합하여 통합 자율주행을 구현할 수 있을 것이다.

REFERENCES

- [1] K. Lee, Y. J. Lee, Y. Koh, H. G. Park, and M. H. Lee, "Steering control of independent 4 wheels vehicle applied ackerman geometry," *Proc. of 2010 25th ICROS Annual Conference (ICROS 2010)*, pp. 639-644, 2010.
- [2] K. N. Spentzas, I. Alkhazali, and M. Demic, "Kinematics of four-wheel-steering vehicles," *Forschung im Ingenieurwesen*, vol. 66, no. 5, pp. 211-216, 2001.
- [3] J. T. M. Calequela, M. M. D. Santos, and A. M. Tusset, "Mathematical modeling attributed to kinematics and dynamics of a vehicle with 4-wheels," *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 230, no. 18, pp. 3663-3672, 2021.
- [4] R. Grepl, J. Vejlupek, V. Lambersky, M. Jasansky, F. Vadlejš, and P. Coupek, "Development of 4WS/4WD experimental vehicle: platform for research and education in mechatronics," *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics*, pp. 893-898, 2011.

- [5] H. Chen, S. Chen, R. Zhou, X. Huang, and S. Zhu, "Research on four-wheel independent steering intelligent control strategy based on minimum load," *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, vol. 33, no. 9, p. e6145, 2021.
- [6] H. Tourajizadeh, M. Sarvari, and S. Ordoo, "Modeling and optimal control of 4-wheel steering vehicle using LQR and its comparison with 2-wheel steering vehicle," *2018 6th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, pp. 106-113, 2018.
- [7] B. He, "Precise navigation for a 4WS mobile robot," *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, vol. 7, no. 2, p. 185, 2006.
- [8] C. Zhang, G. Gao, C. Zhao, L. Li, C. Li, and X. Chen, "Research on 4WS agricultural machine path tracking algorithm based on fuzzy control pure tracking model," *Machines*, vol. 10, no. 7, p. 597, 2022.
- [9] S. Kim, H. Lee, D. Kim, and B. Lee, "Time-interval-based collision detection for 4WIS mobile robots in human-shared indoor environments," *Sensors*, vol. 25, no. 3, p. 890, 2025.
- [10] M. H. Lee and T. H. S. Li, "Kinematics, dynamics and control design of 4WIS4WID mobile robots," *The Journal of Engineering*, vol. 2015, no. 1, pp. 6-16, 2015.
- [11] S. Park and J. Suh, "Design of front-back symmetric four-wheel-steering mobile robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 29, no. 9, pp. 748-754, 2023.
- [12] Q. Zhou, F. Wang, and L. Li, "Robust sliding mode control of 4WS vehicles for automatic path tracking," *Proceedings. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2005*, pp. 371-376, 2005.
- [13] Y. D. Setiawan, T. H. Nguyen, P. S. Pratama, H. K. Kim, and S. B. Kim, "Path tracking controller design of four wheel independent steering automatic guided vehicle," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 14, pp. 1550-1560, 2016.
- [14] V. Arvind, "Optimizing the turning radius of a vehicle using symmetric four wheel steering system," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 4, no. 12, pp. 2177-2184, 2013.
- [15] B. Bae and D. H. Lee, "Design of a four-wheel steering mobile robot platform and adaptive steering control for manual operation," *Electronics*, vol. 12, no. 16, p. 3511, 2023.
- [16] X. Tan, D. Liu, and H. Xiong, "Optimal control method of path tracking for four-wheel steering vehicles," *Actuators*, vol. 11, p. 61, 2022.
- [17] N. Asara, Y. Osa, S. Uchikado, and K. Kanai, "D* model matching control system for four wheel steering," *Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pp. 670-674, 2005.
- [18] Y. Cho, K. Noh, E. Lee, and H. Jeong, "Introduction to a motion control algorithm for the autonomous 4-wheel steering vehicle," *2025 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 1090-1094, 2025.
- [19] B. J. Park and H. J. Chung, "Deep reinforcement learning-based failure-safe motion planning for a 4-wheeled 2-steering lunar rover," *Aerospace*, vol. 10, no. 3, p. 219, 2023.
- [20] D. P. Dai and J. Katupitiya, "Force control for path following of a 4WS4WD vehicle by the integration of PSO and SMC," *Vehicle System Dynamics*, vol. 56, no. 11, pp. 1682-1716, 2018.
- [21] Q. Zhang, C. Wu, H. Tian, Y. Gao, W. Yao, and L. Wu, "Safety reinforcement learning control via transfer learning," *Automatica*, vol. 166, p. 111714, 2024.
- [22] J. Song and Y. Yoon, "Feedback control for four wheel steering vehicles using time derivatives of state vector," *Proc. of 1994 Korea Automatic Control Conference (KACC 1994)*, pp. 1320-1325, 1994.
- [23] G. Liu, W. Xiao, X. Han, K. Song, and H. Xie, "Reinforcement learning optimized MPC for vehicle stability with independent four-wheel drive and steering," *2024 8th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI)*, Chongqing, China, 2024.
- [24] B. Kwon, "Fault-tolerant control strategy for steer-by-wire vehicles using rear-wheel steering," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 29, no. 4, pp. 289-293, 2023.
- [25] D. Wang and F. Qi, "Trajectory planning for a four-wheelsteering vehicle," *Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3320- 3325, 2001.



조 용 성

2022년 고려대 제어계측공학과 졸업.
2025년 동 대학원 석사. 관심분야는 로보
틱스, 지능형 로봇 제어, 자율주행 시스
템, 센서 융합.



박 종 우

2009년 고려대 제어계측공학과 메카트
로닉스 석사, 2016년 동 대학원 박사.
2016-2019년 한국기계연구원 로봇메카
트로닉스 연구실 post-doc. 2019년~현재
한국기계연구원 첨단로봇연구센터 책임
연구원.



정 현 환

2007년 고려대 제어계측공학과 졸업.
2014년 동 대학 박사. 2015년~현재 고려
대학교 제어계측공학과 부교수. 관심분
야는 로봇 매니퓰레이션 및 로봇 핸드,
로봇 시스템 설계 및 제어, 자율주행시스
템 등.