

과수원 환경 4WIS-4WID 자율주행 플랫폼을 위한 계층적 모션 제어기 설계

이요셉¹⁾ · 유승진²⁾ · 유승한^{*1,3)}

한국기술교육대학교 기계공학과 미래융합공학전공¹⁾ · 한국기계연구원 산업기계DX연구실²⁾ · 한국기술교육대학교 기계공학부³⁾

Design of a Hierarchical Motion Controller in Orchard Environments for a 4WIS-4WID Autonomous Driving Platform

Joseph Lee¹⁾ · Seungjin Yoo²⁾ · Seung-Han You^{*1,3)}

¹⁾Future Convergence Engineering, Korea University of Technology and Education, Chungnam 31253, Korea

²⁾Department of Industrial Machinery DX, Korea Institute of Machinery and Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

³⁾School of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education, Chungnam 31253, Korea

(Received 15 July 2025 / Revised 2 September 2025 / Accepted 2 September 2025)

Abstract : A hierarchical optimal motion controller is proposed for a four-wheel independent steering and drive (4WIS-4WID) autonomous vehicle that operates in confined orchard rows. Previous studies pre-defined steering modes (Ackermann, crab, zero-turn, etc.), and switched between them to enable special maneuvers, such as in-place rotation and pure lateral travel. In contrast, the proposed controller can achieve those high-maneuverability motions without any mode switching. The upper layer employs a model predictive control algorithm with a one-step prediction horizon to generate body-velocity commands that minimize path-tracking errors, while the lower layer converts these commands into individual wheel steering angles and speeds in real time. A soft-constraint penalty in the cost function can prevent actuator saturation without relying on hard limits. MATLAB/CarMaker simulations showed that the proposed controller substantially reduced tracking error, compared with a conventional linear model predictive control(MPC), and maintained stable attitude during zero-turn and lateral-shift scenarios, thus demonstrating broad maneuvering capability.

Key words : Orchard crop monitoring(과수원 작물 모니터링), Four-wheel independent drive(4륜 독립구동), Four-wheel independent steering(4륜 독립조향), Autonomous driving(자율주행), Optimal control(최적 제어), High maneuverability(높은 기동성)

1. 서론

농촌 인구의 고령화와 일손 부족으로 인해 과수원 자동 모니터링과 같은 과수원 작업의 자동화 필요성이 지속적으로 제기되고 있다.^{1,4)} 과수원과 같은 협소하고 복잡한 농업 환경에서 자율주행 농업기계의 높은 기동성과 정밀한 경로 추종 능력은 작업 효율성과 안전성을 보장하는 핵심 요소이다. 현대 농업에서 자율주행 농업기계(Autonomous Agricultural Vehicles, AAVs)는 노동력 부족 문제 해결과 작업 효율성 향상을 위한 필수적인 기술로 인식되고 있으며, 특히 과수원

환경은 제한된 작업 공간, 불규칙한 경계면, 정적 장애물 등으로 인해 전통적인 궤적 계획 방법들이 종종 실패할 수 있는 복잡한 환경을 제공한다.^{5,6)} 일반적인 앞 바퀴 2륜 조향(Two-Wheel Steering, 2WS) 차량은 제한된 조향 각도와 고정된 선회 기하구조로 인해 좁은 과수원 통로나 급격한 방향 전환이 요구되는 농업 환경에서 효율적인 기동이 매우 어렵다.⁷⁾ 이를 해결하기 위해 각 바퀴의 구동과 조향을 독립적으로 제어할 수 있는 4륜 독립구동(Four-Wheel Independent Drive, 4WID) 및 4륜 독립조향(Four-Wheel Independent Steer, 4WIS) 차량 구조가 적용

*Corresponding author, E-mail: shyoo@koreatech.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

되었다.⁸⁻¹⁰⁾ 4WIS 시스템은 기존 조향 시스템 대비 요 운동뿐만 아니라 측면 이동(Side-move) 운동을 제어할 수 있어 차량 제어에 더 효과적인 궤적 추종 능력을 제공한다.¹¹⁾ 이 시스템은 모든 바퀴를 개별적으로 조향하여 애커만 조향(Ackermann steering), 능동 전후륜 조향(Active Front and Rear Steering, AFRS), 크랩 조향(Crab steering), 제자리 회전(Spinning) 등 다양한 조향 모드를 구현함으로써 과수원 환경에서 기동성을 최대화할 수 있다.¹²⁻¹⁴⁾ 예를 들어, 과수원 환경의 자율 운반 로봇에 Ackermann 조향, 전후륜 동시 조향(AFRS), 크랩 조향, 제자리 회전 등 4가지 모드를 활용한 조향 전략을 설계하여, 좁은 공간에서 특수 기동을 위한 효율적인 모션을 구현하였다.¹²⁾ 이러한 조향 모드를 활용하면 차량이 좁은 공간에서 측면 이동이나 제자리 회전과 같은 특수 기동을 수행할 수 있어, 과수원 작업의 효율이 크게 향상된다.¹⁵⁻¹⁷⁾

기존 다수의 연구에서 4WIS-4WID 차량에서 주행 상황에 따라 조향 모드를 전환하며 경로를 추종하는 모드 기반 제어 전략이 적용되었다.^{7,9)} Nguyen 등⁷⁾은 혼합정수 모델 예측 제어(MIQP-MPC)를 통해 조향 모드 선택을 최적화하여, 매 제어 주기마다 동위상 병진(Parallel Positive Steering, PPS) 모드와 역위상 선회(Symmetric Negative Steering, SNS) 모드 간 자동 전환하는 알고리즘을 제안하였다. 비상 구조용 차량을 대상으로 Xu 등⁸⁾은 전륜 조향, 후륜 조향, 4륜 조향 모드 간의 동적 전환을 차량 정지 없이 실현하기 위해, 모드 전환 시 구동륜 조향각 궤적을 B-스플라인 곡선으로 설계하고 다목적 유전 알고리즘으로 최적화하는 방법을 선보였다. 이러한 모드 기반 조향은 협소한 공간에서 향상된 기동성과 경로 추종 성능을 보여주었지만, 그 이면에는 몇 가지 기술적 문제점도 보고되었다. 첫째, 모드 전환이 잦을 경우 조향 각도 지령의 급격한 변경으로 불연속적인 차량 거동이나 방향각(Heading angle)의 누적 오차가 발생할 우려가 있다.^{7,8)} 둘째, 모드 전환 순간에 발생하는 충격이나 진동을 완화하기 위한 추가적인 설계가 필요하다. 예를 들어 Xu 등⁸⁾은 전환 과정에서 차량 동특성이 급변하지 않도록 조향각 변화를 부드럽게 만드는 최적화 기법을 도입하였고, Hang 등⁹⁾은 고속 주행 시 전륜조향과 4륜조향 모드 사이를 전환할 때 요각 및 횡슬립각의 급변을 억제하는 강인 제어기를 설계하였다. 셋째, 모드 결정을 위한 제어기 설계상 계산 복잡도도 증가한다. 혼합정수 변수 도입으로 MPC의 연산 부담이 늘어나거나,⁷⁾ 다목적 최적화를 적용함에 따른 알고리즘 복잡도가 높아지는 등의 문제도 지적된다.⁸⁾ 이처럼 4WIS-4WID 차량의 모드 기반 조향 제어는 기동성 향상에 기여하면서도, 빈번한 모드 전환에 따른 거동 불연속성, 전환 충격 및 제어 복잡도 증가 등

의 현실적인 한계에 대한 고려가 필요하다.

기존 연구들은 제어 모드를 사전 정의하여 특수 기동을 재현했지만, 모드 전환 시 불연속적인 차량 거동이 발생하는 문제가 있었다. 따라서 본 연구는 조향 모드를 사전 정의하지 않고도 특수 기동을 구현함으로써 모드 전환에 따른 불연속성을 해소하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 4WIS-4WID 운동학 모델을 활용한 계층적 경로 추종 제어기를 제안한다. 제안 프레임워크는 상/하위 두 계층으로 구성된다. 상위 계층은 이산화된 운동학 모델을 이용해 종방향 속도(v_x), 횡방향 속도(v_y), 요레이트(ω)를 동시에 최적화하여 차체 레퍼런스 벡터 $v^{ref} = [v_x^{ref}, v_y^{ref}, \omega^{ref}]$ 을 생성한다. 하위 계층은 이 참조 속도를 기하학적 변환식에 대입해 각 바퀴의 조향각과 바퀴 구동속도를 계산하고, 이를 액추에이터로 전달해 실시간으로 차체 레퍼런스 벡터를 추종한다. 이를 통해 제자리 회전, 평행 이동, 곡선 주행 등 복합 기동을 별도의 모드 전환 없이 구현할 수 있다.

본 논문의 구조는 다음과 같다. 2장에서는 먼저 4WIS-4WID 차량의 운동학적 모델과 경로 추종 오차 정의를 다루고, 3장에서는 제안하는 상위/하위 계층 제어기의 설계 방법을 제시한다. 이후 4장은 MATLAB/Simulink와 CarMaker 시뮬레이션을 통해 제어 성능을 평가하고 결과를 고찰하며, 마지막으로 5장에서는 연구 내용을 요약하고 향후 연구 방향을 논의한다.

2. 시스템 모델링

본 연구에서 고려하는 4WIS-4WID 자율주행 차량은 각 바퀴에 조향 및 구동 액추에이터가 장착되었으며, 차량의 실제 모습과 제어 설계에 사용된 좌표계 정의를 Fig. 1에 나타내었다.

글로벌 좌표계 OXY 에서 차량의 위치와 자세를 기술하며, 차량 무게 중심에 고정된 로컬 좌표계 oxy 의 x 축은 차량 전방 방향, y 축은 차량 좌측 방향으로 정의된다. 차량의 순간 자세는 글로벌 좌표계에 대한 차량 종축의 방향각 φ 로 표현된다. 경로 상 목표점과 차량 위치 간의 종방향 거리를 종방향 오차 e_x 로 정의하고, 차량 무게 중심과 경로의 최근접점 사이의 직교 거리를 횡방향 오차 e_y 로 정의한다. 또한 차량 주행 방향과 목표 경로 접선 방향의 차이는 방향각 오차 e_φ 로 나타낸다. 4WIS 차량 주행 특성상 차량의 주행 방향은 임의로 설정이 가능하며, 본 제어기는 임의의 목표 주행각을 경로의 기울기로 설정하고 이를 추종하도록 설계하였다.

아래 Fig. 2는 차체 참조 벡터 v^{ref} 에 대응하는 각 휠의 조향각 및 구동 속도의 관계이다.

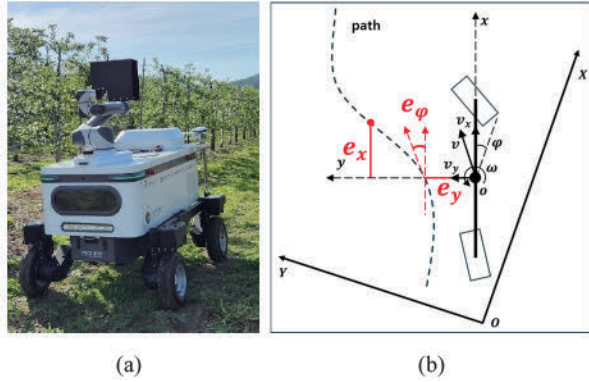


Fig. 1 (a) Prototype of the 4WIS-4WID autonomous vehicle, (b) Vehicle coordinate frames and path-error definition

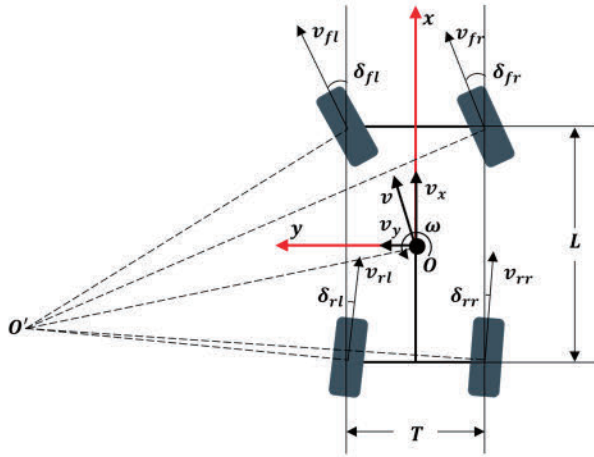


Fig. 2 Mapping between chassis velocities and wheel commands

각 바퀴의 조향각과 속도는 차량 중심에서의 속도 v_x, v_y 와 ω 에 의해 결정된다. 차량의 요레이트 ω 와 평면 속도 v_x, v_y 가 부여될 경우, 바퀴의 조향각과 속도는 다음과 같이 산출된다.

바퀴 구분을 위해 인덱스 $i \in \{f, r\}, j \in \{l, r\}$ 를 사용하며, 부호를 의미하는 s_i, t_j 에 대한 정의는 다음과 같다.

$$s_f = +1(\text{앞축}), s_r = -1(\text{뒷축})$$

$$t_l = -1(\text{왼쪽}), t_r = +1(\text{오른쪽})$$

이때 각 바퀴의 조향각 δ_{ij} 와 속도 v_{ij} 는 다음과 같이 기하학적으로 계산된다.

$$\delta_{ij} = \tan^{-1} \left(\frac{v_y + s_i \omega \frac{L}{2}}{v_x + t_j \omega \frac{T}{2}} \right) \quad (1a)$$

$$v_{ij} = v_x \cos \delta_{ij} + v_y \sin \delta_{ij} + s_i \omega \frac{L}{2} \sin \delta_{ij} + t_j \omega \frac{T}{2} \cos \delta_{ij} \quad (1b)$$

위 식 (1)은 차량의 바퀴가 미끄럼 없이 주행한다고 가정할 때 유도되며, 각 바퀴의 속도 방향이 해당 바퀴의 조향각 방향과 일치함을 의미한다. 예를 들어 요레이트 $\omega = 0$ 인 경우 바퀴의 조향각과 속도는 모든 바퀴에서 동일하며, v_x, v_y 성분이 존재하면 모든 바퀴가 동일한 각도로 조향하여 평행이동을 수행하게 된다. 한편 $v_x = 0, v_y = 0$ 이고, ω 성분이 존재할 경우, 제자리 회전을 하게 된다. 이처럼 식 (1)을 통해 차량은 임의의 병진 및 회전 운동 조합을 구현할 수 있다. 한편 차량의 휠베이스(L)는 2.669 m이고 좌/우 트랙 폭(T)는 1.586 m이다.

3. 제어기 설계

3.1 계층적 최적 제어구조

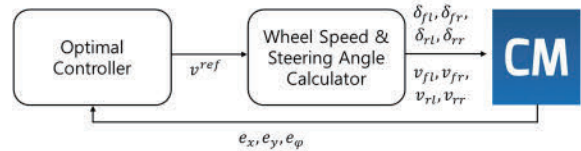


Fig. 3 Two-layer control architecture

제안하는 제어 시스템은 상위 경로 추종 제어기와 하위 휠 제어기의 2개의 계층 구조로 구성된다. 상위 제어기는 차량의 기준 경로 및 위치상태를 입력으로 받아, 차량이 경로 추종을 위해 필요한 종/횡방향 속도 v_x^{ref}, v_y^{ref} 와 요레이트 ω^{ref} 를 생성한다. 여기서 상위 제어기는 비선형 목적함수를 간단하게 구현할 수 있는 모델 예측 제어가 적용된 최적 제어기로 구현되며, 최적화 솔버의 계산 속도를 고려하여 단일 시간 스텝 동안의 차량 거동을 예측하여 경로 추종 오차가 최소화되도록 매 시각 최적화 문제를 푼다. 반면 하위 휠 제어기는 상위 제어기로부터 전달된 $v^{ref} = [v_x^{ref}, v_y^{ref}, \omega^{ref}]$ 명령 신호를 달성하도록 각 바퀴의 조향각 및 구동 속도를 제어한다. 이 계층적 구조를 통해 복잡한 차량 동역학 제어 문제를 단순화하여, 상위 계층에서는 차량 경로 추종 오차에 집중하고, 하위 계층에서는 그에 맞는 운동을 수행하도록 분리하였다.

상위 경로 추종 MPC 제어기는 앞서 정의한 종방향/횡방향/각도 오차를 상태로 포함하는 예측 모델을 사용한다. 특히 4WIS-4WID 차량의 경우 횡방향 이동이 가능하므로, 기존의 2WS 차량과 달리 횡방향 속도 v_y 가 추가 제어 입력으로 고려된다. 예측 모델은 식 (2)와 같은 이산화

된 상태 공간 방정식으로 구성되며, 상태 벡터 $x(k) = [e_x, e_y, e_\phi]^T$, 입력 벡터 $u(k) = [v_x^{ref}, v_y^{ref}, \omega^{ref}]^T$ 으로 설정한다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k),$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t \end{bmatrix}, \Delta t : \text{time step} \quad (2)$$

3.2 비용 함수 및 제약 조건

경로 추종을 위한 제어기는 차량의 상태 오차를 최소화하면서 휠의 조향 각도와 회전 속도가 기계적인 액추에이터 한계를 초과하지 않도록 설계되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 상태 오차 및 제어 입력의 크기를 줄이는 동시에 제약 위반에 대한 페널티 항을 포함한 최적 비용함수를 구성하였다. 특히, 경성(Hard) 제약만 적용하면 제약 충돌 시 최적화 문제의 해가 존재하지 않아 제어가 중단이 일어날 수 있으므로,¹⁸⁾ 본 연구에서는 연성(Soft) 제약을 도입하여 항상 최적해를 도출할 수 있도록 하였다. 이때 비용함수 J 는 다음과 같이 정의된다.

$$J = x(k+1)^T Q x(k+1) + u(k)^T R u(k) + c(k)^T W c(k) \quad (3)$$

식 (3)에서 $x = [e_x, e_y, e_\phi]^T$ 는 차량의 상태오차 벡터로서 각각 종방향오차, 횡방향오차 및 주행 방향각 오차를 나타낸다. $u = [v_x^{ref}, v_y^{ref}, \omega^{ref}]^T$ 는 제어 입력 벡터로서 차체 기준 종방향 속도, 횡방향 속도, 요레이트로 구성된다. Q 와 R 은 각각 상태 오차와 제어 입력에 대한 가중치 행렬로서 제어 성능과 입력 크기 제한에 대한 트레이드 오프를 조율한다. 마지막으로 c 는 각 휠의 조향 및 구동 속도 제약 위반 정도를 나타내는 페널티 벡터이며, W 는 해당 페널티 항의 가중치 행렬이다. 페널티 벡터 c 의 구체적인 정의는 식 (4)와 같다.

$$c(k) = \begin{bmatrix} \max(0, |\delta_{ij}(k)| - \delta_{th}) \\ \max(0, |v_{ij}(k)| - v_{th}) \end{bmatrix},$$

$$i \in \{f, r\}, j \in \{l, r\} \quad (4)$$

식 (4)에서 δ_{ij} 와 v_{ij} 는 제어 입력 벡터에 따른 각각 해당 휠의 조향각과 구동 속도이다. 해당 조향각과 구동 속도는 식 (1)을 통해 얻을 수 있다. δ_{th} 와 v_{th} 는 허용되는 최대 조향각 및 최대 속도 한계값이다. 식 (4)와 같이, 각 휠의 조향각 $|\delta_{ij}|$ 이 임계값 δ_{th} 이내이면 해당 항은 0이

되어 페널티가 부과되지 않으며, 조향각이 한계를 초과하는 경우에만 그 초과분 $(|\delta_{ij}(k)| - \delta_{th})$ 이 양의 값으로 페널티 벡터에 포함된다. 마찬가지로 휠 속도 $|v_{ij}|$ 가 허용 범위 v_{th} 를 넘는 경우에 한해 그 초과분 $(|v_{ij}(k)| - v_{th})$ 을 페널티로 계산하며, 속도가 한계 이내이면 해당 항은 0이 된다. 즉, 정상적인 범위 내에서 각 휠이 동작할 때는 c 의 모든 원소가 0으로 유지되어 추가 비용을 유발하지 않고, 한계를 넘어서면 초과분에 비례하는 비용만 발생하도록 설계하였다.

이와 같이 페널티 벡터를 도입하여 $c^T W c$ 항을 비용함수에 포함함으로써, 조향각 및 구동 속도에 대한 제약을 직접적인 경성 제약으로 강제하지 않고 연성 제약 형태로 처리하였다. 다시 말해, 제어기 설계 시 목적함수 내에 페널티 항을 추가함으로써 제약 위반 시 큰 비용이 부여되도록 설계하였다. 페널티 가중치 행렬 W 를 적절히 책정하여, 최적화 과정에서 제약을 위반하는 해는 비용 증가로 인해 자동적으로 배제되도록 조율한다. 연성 제약 접근법을 통해 복잡한 제약 조건의 직접 적용 없이도 제어 입력이 차량의 기계적 한계를 벗어나지 않도록 유지할 수 있으며, 최적화 문제를 보다 간결하게 해결할 수 있다는 장점이 있다. 그 결과, 본 제어기는 궤적 추종 오차를 효과적으로 최소화하면서도 모든 휠의 조향 및 구동 명령이 시스템의 물리적 한계를 벗어나지 않도록 하여, 높은 추종 성능과 안정성을 동시에 확보하였다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1 일반 곡선 경로 추종 시나리오

MATLAB/Simulink와 CarMaker로 구성된 시뮬레이션 환경에서 4WIS-4WID 자율주행 차량의 일반 곡선 경로 추종 시나리오를 통해 단일 시간 스텝(One step)만 예측하는 제안된 제어기와 유사한 연산 시간을 갖는 복수 시간 스텝(N-step)을 예측하는 선형 모델 예측 제어기(MPC)의 성능을 비교하였다. 제안된 제어기는 식 (3)의 목적함수를 통해 최적화되었고, 선형 MPC는 다음과 같은 목적함수를 통해 최적화하였다.

$$J = \min_{\{u_k\}_{k=0}^{N-1}} \sum_{k=0}^{N-1} (x(k)^T Q x(k) + u(k)^T R u(k)) + x(N)^T Q_N x(N) \quad (5)$$

시뮬레이션에서 목표 주행 속도는 실제 과수원 환경에서 정의된 주행 속도인 10 km/h로 설정되었으며, 비교 대상 MPC는 연산시간이 유사한 Prediction horizon $N = 10$ 을 갖는 선형 MPC로 구성하였다. 이때, 예측 구간 N 과 오차 가중치, 입력 가중치 등 모든 제어 파라미터는 그리드

탐색을 통해 시스템 성능이 최적으로 나타나는 조합으로 선정하였다. 비교 대상 MPC는 하드 제약을 명시적으로 포함하지 않고 제어 입력에 대해 포화 함수를 적용하여 물리적 한계를 반영하였다. 한편, 제안 제어기는 단일 타임 스텝 구조에서 연성 제약을 비용함수에 포함하여 제약을 처리하였다. 이는 제약을 초과한 경우에만 패널티 비용을 부과함으로써, 최적화 과정에서 자연스럽게 제한 조건을 유도하도록 설계하였다.

Table 1은 이러한 조건에서 두 제어기의 경로 추종 오차($\max(|\text{error}|)$, $\text{mean}(\text{error})$)와 알고리즘 평균 연산 시간을 정리한 결과이다. 제안 제어기의 모든 오차 지표는 비교 대상 MPC 대비 개선되었으며, 평균적으로 약 50% 이상의 오차 감소를 보였다. 또한 연산 시간이 선형 MPC 대

비 30% 정도 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 해당 연산 시간은 12세대 인텔 코어 i9-12900 CPU의 PC에서 측정된 값이다.

Figs. 4와 5는 해당 경로 추종 실험의 궤적 및 오차 추이를 각각 보여준다. 정의된 주행 궤적은 과수원 환경에서 대표성을 갖는 궤적이며 최대 곡률이 0.3 m^{-1} , 총 이동거리 64 m로 설정하였다. Fig. 4에서 제안 제어기의 차량 궤적이 일반적인 선형 MPC의 궤적 대비 곡선 구간에서 이탈 정도가 낮은 것을 확인할 수 있다. 한편, Fig. 5의 시간 대비 오차 그래프에서는 제안 제어기가 전 구간에서 횡방향 및 주행각 오차를 효과적으로 억제하고 있음을 보여준다. 전체적인 성능은 물리적 한계에 대해서 포화 함수를 적용한 선형 MPC 대비 제안 제어기가 더 나은 성능을 보이는 것을 볼 수 있다.

한편, 다른 주행 속도에서의 제어 성능을 검증하기 위해 주행 속도 5 km/h에서도 해석을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 다소, 속도가 느리기 때문에 전체적인 경로 오차가 10 km/h 주행 대비 줄어들었으며 제안 제어기의 기존 제어기 대비 성능 개선율은 유사한 경향성을 나타내었다.

Table 1 Tracking-error and computation-time comparison

	State errors (absolute values)		Time [ms] (Mean)
	e_y [cm] (Mean-Max)	e_φ [deg] (Mean-Max)	
Proposed controller	1.08-4.74	0.46-3.59	0.6112
Conventional MPC	2.58-11.27	0.84-4.39	0.9163

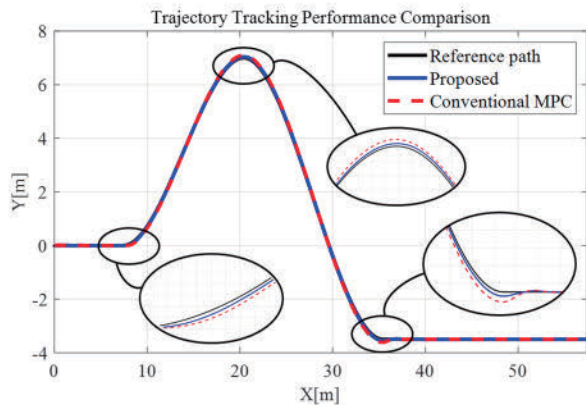


Fig. 4 Curved-path trajectories (reference vs. controllers)

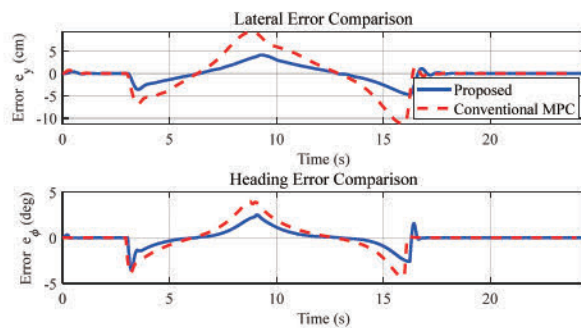


Fig. 5 Time histories of lateral and heading errors

4.2 고기동 주행 시나리오

고기동 평가 시나리오에서는 제안 제어기의 성능을 극한 조건에서 정성적으로 검증하였다. 두 가지 극단적 초기 오차 조건에 대해 제안 제어기의 휠 조향 및 구동 제어가 차량 거동을 독립 조향/구동 자유도를 활용하여 어떻게 안정적으로 이끄는지 분석하였다. Figs. 6과 7은 시뮬레이션 결과로부터 얻어진 실제 차량의 휠 조향각, 위치, 자세 데이터를 기반으로 시각화한 것으로, 제어기의 출력이 차량의 움직임에 어떻게 반영되는지를 직관적으로 보여준다. 빨간색 화살표는 차량의 기준 요방향을 나타낸다.

차량이 경로를 등진 채 반대 방향을 향해 초기 정렬된 상황으로, 제자리에서 180° 회전하여 경로 방향으로 재정렬해야 하는 시나리오이다. 제안 제어기는 각 바퀴의 조향각을 회전 중심에 맞추어 차량의 제자리 회전을 구현하였다. 그 결과 차량은 Fig. 7과 같이 거의 횡방향 이동 없이 제자리에서 목표 회전 방향으로 정확하게 방향을 전환할 수 있었다.

Fig. 8 시나리오는 차량이 목표 경로와 나란하지만 4 m 옆으로 치우친 초기 위치에서 시작되며, 차량의 진행 방향은 경로와 평행한 상황이다. 이 경우 차량은 조향 제어를 통해 측면으로 접근하는 평행 이동이 요구된다. 제안된 제어기는 모든 휠의 조향각을 측면 이동이 가능하도록 설정하고 네 바퀴의 구동력을 균일하게 분배함으로써

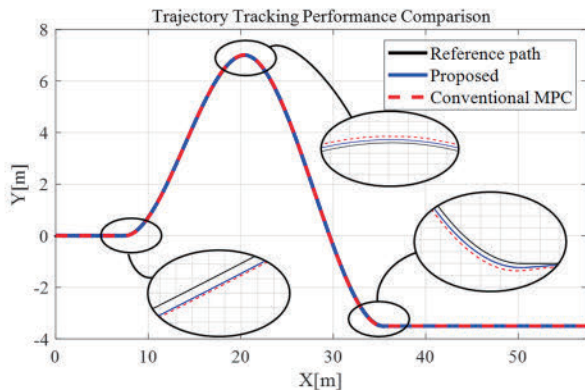


Fig. 6 Curved-path trajectories (reference vs. controllers) at 5 km/h

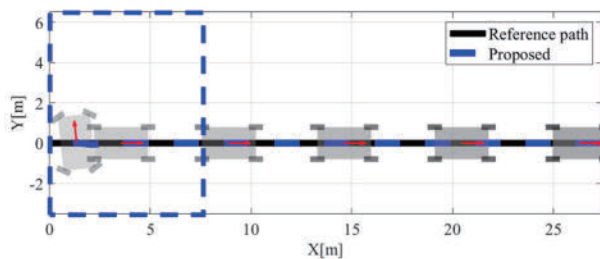


Fig. 7 Zero-turn rotation maneuver

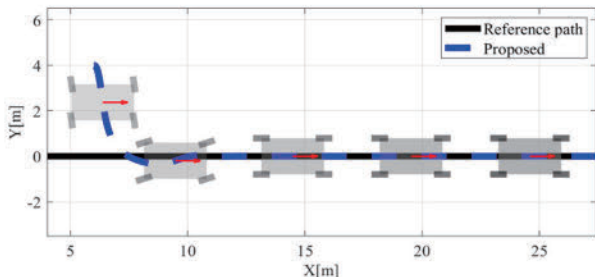


Fig. 8 Pure lateral repositioning maneuver

차량을 옆으로 이동시켰다. Fig. 8에서 차량은 주행 방향 각을 거의 변화시키지 않은 채 측면으로 안정적으로 목표 경로에 합류하였다.

5. 결론

본 논문에서는 과수원 환경에 적합한 4WIS-4WID 기반 고기동 자율주행 차량을 위한 새로운 경로 추종 최적 제어기를 제안하였다. 제안한 제어기는 전통적인 조향 모드 기반 제어와 달리, 종/횡방향 속도와 요레이트를 연속 변수로 직접 최적화함으로써 조향 모드에 구애되지 않는 유연한 운동 제어를 가능케 하였다. 계층적 제어 구조를 도입하여 상위 단계에서는 경로 오차를 최소화하는

속도 명령을 생성하고, 하위 단계에서 이를 각 바퀴의 조향각 및 속도로 변환함으로써 제어 시스템을 설계하였다.

MATLAB/CarMaker 연계 시뮬레이션을 통해 제어기를 검증하였으며, 제안 제어기가 기존 방법과 달리 모드 전환의 복잡성을 제거하고 보다 부드럽고 최적화된 주행을 구현함을 확인하였다. 또한, 제어 입력 계산 시간도 실시간 성능을 만족하는 것을 볼 수 있다. 아울러 제자리 회전과 평행 이동과 같은 고기동 시나리오에서도 원활한 제어가 가능함을 검증하여, 제안 제어기의 광범위한 주행 능력과 안정적인 자세 제어 성능을 정성적으로 입증하였다. 향후에는 본 제어기를 실제 차량에 적용하여 실험을 수행하고, 실제 과수원 환경에서 다양한 복합 조건을 고려한 추가 연구를 진행할 예정이다. 이를 통해 제안 제어기의 실차 적용 가능성을 평가하고, 보다 견고한 자율주행 제어 시스템으로 확장해 나가는 것이 본 연구의 다음 과제가 될 것이다.

후 기

본 논문은 현대차 정몽구 재단 장학생으로서 지원을 받아 수행되었음. 이 논문은 2025년 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음. 본 연구는 2023년 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 "빅데이터 기반 친환경 노지 과수용(사과 중심) 자율예찰 시스템 및 방제 플랫폼 개발"과제(CRC23041-000)의 연구결과임. 이 논문은 2025년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2022R1A2C1004405).

References

- 1) Y. Ye, L. He and Q. Zhang, "A Robotic Platform 'Bin-Dog' for Bin Management in Orchard Environment," 2016 ASABE Annual International Meeting, Paper No.162462088, 2016.
- 2) S. J. Park, J. W. Jeong and J. Y. Kim, "A Study on Wheel Independent Steering in Future Mobility," KSAE Spring Conference Proceedings, 2022.
- 3) C. W. Yang, H. H. Jeon, S. J. Yoo, B. D. Cha, M. G. Kim and Y. J. Kim, "Analysis of Steering Torque According to Steering Modes of 4WS Driving Platform for Orchard Fore," Drive & Control, Vol.21, No.4, pp.152-160, 2024.
- 4) Y. Ye, L. He and Q. Zhang, "Steering Control Strategies for a Four-Wheel-Independent-Steering Bin Managing Robot," IFAC PapersOnLine, Vol.49, pp.39-44, 2016.
- 5) Y. Chu, C. Wang, X. Zhou, Z. Zhang and W. Zhao, "Instantaneous Center of Rotation Tracking Control of Four-Wheel Independent Steering Vehicles Under Large-

- Curvature Turning Conditions,” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.25, No.11, pp.17965–17978, 2024.
- 6) P. Wei, C. Peng, W. Lu, Y. Zhu, S. Vougioukas, Z. Fei and Z. Ge, “Efficient and Safe Trajectory Planning for Autonomous Agricultural Vehicle Headland Turning in Cluttered Orchard Environments,” IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.10, No.3, pp.2574–2581, 2025.
 - 7) N. T. Nguyen, P. T. Gangavarapu, N. Mandel, R. Bruder and F. Ernst, “Motion Planning for 4WS Vehicle with Autonomous Selection of Steering Modes via an MIQP-MPC Controller,” 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.9765–9771, 2024.
 - 8) F. Xu, X. Liu, W. Chen and C. Zhou, “Dynamic Switch Control of Steering Modes for Four Wheel Independent Steering Rescue Vehicle,” IEEE Access, Vol.7, pp.135595–135605, 2019.
 - 9) P. Hang and X. Chen, “Towards Autonomous Driving: Review and Perspectives on Configuration and Control of Four-Wheel Independent Drive/Steering Electric Vehicles,” Actuators, Vol.10, No.8, Paper No.184, 2021.
 - 10) G. S. Park, J. Y. Kim, G. S. Heo, K. Y. Jang and J. E. Oh, “Brake Steering Analysis of Electric Driven Special Purpose Vehicles,” Transactions of KSAE, Vol.5, No.4, pp.29–38, 1997.
 - 11) J. H. Hwang, H. S. Jeong and H. Yeo, “Trends and Development Outlook of Agri-Food IT Convergence Technologies,” The Journal of the Korean Institute of Communication Sciences, Vol.30, No.10, pp.53–60, 2013.
 - 12) S. T. H. Jansen and J. J. M. Van Oosten, “Development and Evaluation of Vehicle Simulation Models for a 4WS Application,” Vehicle System Dynamics, Vol.24, No.4–5, pp.343–363, 1995.
 - 13) X. Chen, F. Luo, P. Hang and J. Luo, “Steering Mode Switch Control of Four-Wheel-Independent-Steering Electric Vehicle,” In: (SAE-China), S. (eds), Proceedings of the 19th Asia Pacific Automotive Engineering Conference & SAE-China Congress 2017: Selected Papers. SAE-China 2017. Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol.486, Springer, Singapore, 2019.
 - 14) X. Lai, X. B. Chen, X. J. Wu and D. Liang, “A Study on Control System for Four-Wheels Independent Driving and Steering Electric Vehicle,” Applied Mechanics and Materials, Vol.701-702, pp.807–811, 2014.
 - 15) W. Wei, M. Xiao, W. Duan, H. Wang, Y. Zhu, C. Zhai and G. Geng, “Research Progress on Autonomous Operation Technology for Agricultural Equipment in Large Fields,” Agriculture, Vol.14, No.9, Paper No.1473, 2024.
 - 16) K. Bazargani and T. Deemyad, “Automation’s Impact on Agriculture: Opportunities, Challenges, and Economic Effects,” Robotics, Vol.13, No.2, Paper No.33, 2024.
 - 17) G. Nagaraja, H. Shoba, M. S. Sreedevi and P. N. Krishnamma, “The Impact of Robotics and Drones on Agricultural Efficiency and Productivity,” International Journal of Research in Agronomy, Vol.7, No.9S, pp.1001–1009, 2024.
 - 18) M. N. Zeilinger, M. Morari and C. N. Jones, “Soft Constrained Model Predictive Control with Robust Stability Guarantees,” IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.59, No.5, pp.1190–1202, 2014.