

AI 하이브리드 모델을 이용한 자율주행 트랙터의 추적 정확도 평가

임류갑*, 김은국**, 이준호**

*국립순천대학교 융합바이오시스템기계공학과

**한국농업기술진흥원 스마트농업본부

e-mail:limrg11@scnu.ac.kr

Tracking Accuracy Evaluation of Autonomous Agricultural Tractors Using AI Hybrid Model of EKF–Transformerof

Ryugap Lim*, Eunkuk Kim*, Junho Lee*

*Dept. of Convergence Bio–Systems Mechanical Engineering, Sunchon Univ., Sunchon, Korea

**Dept. of Smart Agricultural, Korea Agriculture Promotion Agency, Iksan, Korea

요약

본 연구는 자율 농업 트랙터의 주행 정확도를 향상시키기 위해 후방 3점 지지장치의 위치를 추정하는 방법을 제안한다. 이를 위해 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter, EKF)와 인공지능 기반 트랜스포머(Transformer)를 결합한 하이브리드 모델을 개발하였다. EKF는 비선형 시스템의 동역학과 측정 불확실성을 처리하며, 트랜스포머는 어텐션 메커니즘을 통해 정밀한 특징 추출을 가능하게 한다. 기존 딥러닝의 경우 비선형 데이터의 예측 성능이 떨어지거나 시계열 데이터라는 특징에서 높은 성능을 보이는 어텐션 메커니즘을 적용하였다. 그 결과 실제 포장 실험에서 제안된 하이브리드 모델은 기존 추정 방식에 비해 주행 정확도 면에서 유의미한 향상을 보였다. 이러한 결과는 고정밀 자율주행 농업시스템 개발을 위한 필터링 기법과 AI 모델의 융합 가능성을 시사한다.

1. 서론

최근 영농 분야에서는 인구 증가, 기후 변화, 노동력 감소 등의 문제를 해결하기 위한 다양한 노력을 기울이고 있다. Kim et al. (2023)은 생산성 향상과 지속 가능한 농업 운영의 목표를 달성하기 위해 자율주행 농업기계가 대안으로 부각됨을 분석하였고 고령화된 국가의 숙련된 농업인력 감소는 로봇 및 자율주행 농업기계 등의 보급이 필요성이 강조되고 있음을 발표하였다[1]. Yuan et al. (2023)은 농업의 고령화, 노동력 부족 등 구조적 문제 해결을 위해 로봇과 자율기계 기술이 핵심 대안임을 강조하며, 다양한 농작업(파종, 수확, 병해충 관리 등)에 적용된 최신 사례들을 분석하였다[2].

현재 고정밀 자율주행 농업기계에 대한 연구가 활발히 진행중이다. Qu et al. (2024)은 정밀한 위치 인식, 경로 계획 및 추적, 동작 제어 기술을 바탕으로 작업 효율과 안전성을 높인다고 분석하였다[3]. Han et al. (2022)은 GNSS와 관성 센서를 결합한 저가형 자율주행 시스템을 탑재한 속살포기 프로토타입을 개발하고, 실제 과수원 환경에서 경로 추종 오차 0.10 m 수준의 높은 주행 정밀도를 입증하였다[4]. Ren et al. (2023)은 위치 인식, 경로 계획, 주행 제어 기술을 통합한 지능형 무인 농업기계 시스템을 개발하고, 실제 차량 실험을 통해 해당 시스템의 정밀한 주행 제어와 높은 작업 효율을 입증하였다[5]. 국내에서 자율주행 트랙터를 판매하기 위해서는 한국의 관련 법령에 따라 경로 추종 오차의 누적 95% 값이 7 cm 이내여야 하며, 실제 트랙터를

계획된 경로를 추종하여 실제주행 경로의 오차를 계측하여 평가하고 있다. 한국의 농업기계 시험소에서는 계획 경로인 A-B 라인을 설정한 후 평가 대상 농업기계를 해당 경로에 따라 실제로 주행하여 후방 3점 지지점의 위치를 토탈스테이션(Total Station) – 프리즘(Prism) 시스템을 통해 좌표를 계측한다. 후방 3점 지지점에 설치된 센서는 진동, 설치 위치, 조향에 따른 쏠림 현상 등으로 인해 다양한 외란이 포함된다. 이러한 영향을 보완하기 위해 상대적으로 외란이 적은 Cab 지점에서 측정값을 확보하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에 사용된 Trajectory 측정용 계측기는 정밀도가 2 mm이고 연속 측정주기는 10 hz로 사양의 모델인(TS13, Leica Geosystems AG, Switzerland) 표 1 사양의 그림1의 Total station으로 좌표계는 Azimuth of a Line system을 사용하였다. 임의 두지점에 평행한 반사 프리즘을 설치하여 자율주행 경로의 진행 방향을 x축으로 설정하였다.

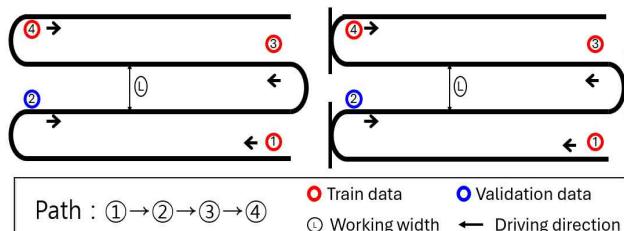
[표 1] 자율주행 트랙터 성능평가 장비 제원

Item	Specification
Measurement Range (mm)	0.9 m to 3500m
Accuracy (mm)	1mm(1.5 PPM)
measurement interver(hz)	10
Working temperature range (°C)	-20 to +50



[그림 1] 자율주행 트랙터 성능평가 장비

본 연구에서는 자율주행 농업용트랙터의 주행 궤적을 정밀하게 추적하기 위해, 그림 2와 같은 경로로 평가를 추진하였다. 캐빈과 3점 지지점 각각의 위치에 360도 반사 프리즘을 그림 3과 같이 농업용트랙터의 수직 중심선과 정렬되도록 설치하였다. 3점지지의 프리즘 설치의 경우 링크 구조로 수직 중심선으로부터 좌우 방향으로 작은 설치 오차에 대한 유탄 확인은 어려웠다. 시험 장치의 중심 정렬이 정확하지 않을 경우, 측정 편차가 증가할 수 있다.



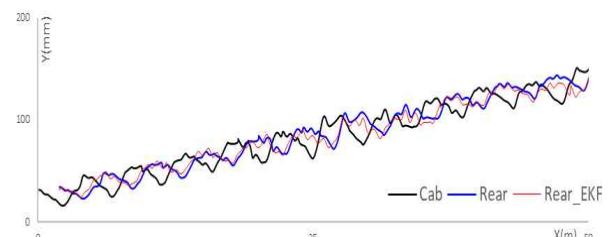
[그림 2] 자율주행 트랙터 성능평가 경로



[그림 3] 자율주행 트랙터 성능평가 장비 설치

3. 결과 및 고찰

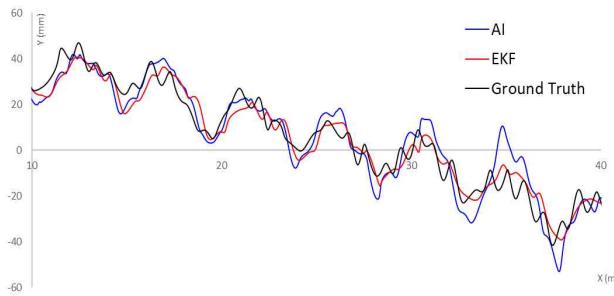
본 연구에서 기초 데이터로 활용된 자율주행 농업용트랙터 궤적은 총 2개 모델의 농업용트랙터를 대상으로 수집하였다. 주행 속도는 0.3 m/s이었으며, 토탈 스테이션(Total Station)을 이용하여 10 Hz 간격으로 궤적 데이터를 계측하였다. 그러나 데이터 손실이 발생하여 실제 수집 주기는 평균 약 8 Hz 수준이었다. 캡처 지점과 3점 지지 지점은 동시에 계측되었으며, 이 과정에서 0.1 Hz 이하의 미세한 시간적 불일치가 관찰되었다. 그림 4는 자율주행 농업용트랙터가 자율주행 계획 경로에 따라 실제 주행한 결과이다. 선회 구간은 농업용트랙터가 실제 농작업을 하지 않은 구간으로 자율주행 경로 추종 능력 평가에서는 제외됨에 따라 본 연구에서 선회 구간의 데이터는 제외되었다. EKF(Extended Kalman Filter)를 기반으로 추정된 Cab 예측 좌표와 Rear Three-Point의 예측 좌표를 나타낸다. 실측된 Cab 센서 데이터, 3점 지지점(3-point linkage) 센서 값, 그리고 칼만 필터를 적용하여 보정된 Rear Point의 궤적을 함께 비교하였다. 캐빈 예측의 경우 Yaw 값은 SKF를 통해 노이즈를 제거한 후, 농업용트랙터 중심으로부터 일정 거리 1만큼 후방에 위치한 Rear Point를 추정하는 데 활용되었다.



[그림 4] 자율주행 트랙터 계획경로 성능평가 결과

그림 5는 AI 기반 예측 모델을 통해 후방 지지점(Rear Point)의 위치를 추정한 결과를 나타낸다. Cab 센서 및 실측 Rear Ground Truth와 비교한 결과, AI 예측은 전반적으로 유사한 궤적을 따르는 경향을 보였으나, 초기 구간에서 불안정하거나 급격한 오차가 발생하는 사례가 관찰되었다. 이는 추정을 위한 캡의 측정 에러로 인해 X축의 농업용 트랙터가 후진하는 착각으로 인한 EKF 및 AI 추정 오류를 유발한 것으로 분석되었으며, X축의 시계열과 계측의 값의 방향성이 일치하여야 함을 의미한다. 전반적으로 예측 궤적이 비교적 안정적으로 유지되며 실측 경로와 유사한 흐름을 보여, AI 모델의 학습 및 일반화 가능성을 확인할 수 있었다. 이는 Zhang et al. (2023)이 제안한 TA-AEKF(Transformer-Aided Adaptive Extended Kalman Filter) 방식의 결과와도 유사한 경향으로, 단일 AI 모델보다 필터 기반 모델과의 결합이 시계열 안정성

확보에 더욱 효과적인 것으로 판단된다.



[그림 5] AI 하이브리드 모델 위치 추정 결과

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 자율주행 농업용 트랙터의 주행 정밀도 분석을 위해, 기존 후방 3점 지지점의 계측 과정에서 발생하는 외란 문제를 개선하고자, 측정 지점을 외란이 상대적으로 적은 Cab 위치로 변경한 후, 실제 계측이 필요한 후방 3점 지지점의 측정을 EKF와 AI 기법을 활용하여 간접적으로 추정하는 방법을 제안하였다. 실험 결과, EKF 기반 예측에서는 실측값 대비 최대 RMSE 1.6 mm, 최대 오차 12.6 mm, 표준편차 최대 3.9 mm 수준의 정확도를 보였다. AI 기반 추정에서도 최대 RMSE 1.9 mm, 최대 오차 24.1 mm, 표준편차 최대 5.4 mm로, 양자 모두 3.5 mm 이내의 예측 정밀도를 달성하였다. 이는 IMU, 조향 센서 등 추가적인 센서 없이 Cab 좌표만을 이용한 추정으로 얻은 성과라는 점에서 큰 의의를 가진다. 본 연구의 한계로는, 실측 좌표의 외란 제거가 완전하지 않다는 점과 추후 다양한 외란 조건에 대한 추가 검증 필요성이 존재한다. 본 연구는 Attention 메커니즘의 시계열 내 비선형 패턴 학습 능력에 주목하여 이를 자율주행 트랙터 경로 예측에 적용함으로써, 계측 단계에서 발생하는 진동, 쏠림, 센서 설치 오차 등 복합적인 외란 요소를 효과적으로 억제하였다. 특히, Attention 기반 예측 결과는 실측값과의 높은 유사성을 유지함으로써, 향후 자율주행 농업용 트랙터의 다양한 응용 분야에 Attention 기반 예측 기법의 적용 가능성과 실용적 확장성을 제시한 사례로 평가된다.

사사 : 본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 노지스마트농업활용모델개발 사업의 지원으로 연구되었음(RS-2025-02216783).

참고문헌

- [1] Kim, Y.-T.; Kim, Y.-H.; Baek, S.-M.; Kim, Y.-J.

Technology Trend on Autonomous Agricultural Machinery. *J. Drive Control* 2022, *95*, 95–99.

- [2] Yuan, J.; Ji, W.; Feng, Q. Robots and Autonomous Machines for Sustainable Agriculture Production. *Agriculture* 2023, *13*, 1340.
- [3] Qu, J.; Zhang, Z.; Qin, Z.; Guo, K.; Li, D. Applications of Autonomous Navigation Technologies for Unmanned Agricultural Tractors: A Review. *Machines* 2024, *12*, 218.
- [4] Han, J.-H.; Park, C.-H.; Jang, Y.Y.; Gu, J.D.; Kim, C.Y. Performance Evaluation of an Autonomously Driven Agricultural Vehicle in an Orchard Environment. *Sensors* 2022, *22*, 114.
- [5] Ren, H.; Wu, J.; Lin, T.; Yao, Y.; Liu, C. Research on an Intelligent Agricultural Machinery Unmanned Driving System. *Agriculture* 2023, *13*, 1907.