



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

밭농업 자율농작업을 위한 곡선경로
생성 및 추종기술 개발

2023 년 8 월

서울대학교 대학원

바이오시스템공학과

강 경 민

밭농업 자율농작업을 위한 곡선경로 생성 및 추종기술 개발

지도 교수 김 학 진

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2023 년 8 월

서울대학교 대학원
바이오시스템공학과
강 경 민

강경민의 공학석사 학위논문을 인준함

2023 년 8 월

위 원 장 박 영 준 (인)

부위원장 김 학 진 (인)

위 원 전 찬 우 (인)

초 록

본 연구에서는 국내 농업 환경에서 자율주행 기술의 적용성 확대를 위하여 직교형 또는 다변형 농지 대상이 아닌 농지 경계 또는 작업열이 직선과 같이 정의할 수 없는 형태의 다양한 곡선 궤적을 나타내는 밭에서의 자율주행 트랙터에 적용 가능한 곡선 경로 생성 및 경로 추종 알고리즘을 개발하였다. 곡선 경로 생성을 위해 작업자의 주행을 바탕으로 기존 작업경로를 생성하고 작업폭과 농지폭을 고려하여 추가 경로를 생성하고 자동선회 경로를 생성하였다. 경로 추종은 트랙터에 부착된 작업기를 기준으로 곡선 기준 경로를 효율적으로 추종하도록 트랙터와 작업기 거리 조건과 주행 곡률을 인지하는 방식의 알고리즘을 개발하고자 하였다. 시뮬레이터 환경에서의 개발 알고리즘은 기존 직선과 트랙터 본체 기반의 기술보다 방향각 오차와 측면 편차가 줄어드는 것을 확인하였다. 트랙터에 경운작업기를 장착하여 곡선 및 선회 연속 경로를 추종한 결과 곡률 적용 여부에 따라 추종 성능이 작업 구간 기준으로 오차가 33.7% 감소하였고, 선회를 포함한 주행 경로에 대한 오차는 38.9% 감소하여 작업 효율과 추종 성능이 향상되었음을 확인하였다. 이러한 포장실험 결과를 통해서 개발한 알고리즘은 경사지 조건에서 곡선 경로를 작업하는 자율농작업에 적용될 수 있을 것으로 판단하였다.

주요어 : 자율주행 농기계, 경로 생성, 경로 추종, 곡선 경로 작업, 밭농업
학 번 : 2021-23843

목 차

| | |
|--|----|
| 제 1 장 서 론 | 1 |
| 제 1 절 연구의 배경 | 1 |
| 제 2 절 연구의 목적 | 5 |
| 제 3 절 문헌 조사 | 6 |
| | |
| 제 2 장 재료 및 방법 | 13 |
| 제 1 절 곡선 경로 생성 알고리즘 | 13 |
| 제 1 항 Smoothing-spline 을 활용한 기준 경로 생성 | 13 |
| 제 2 항 왕복 곡선 작업 경로 생성 | 14 |
| 제 2 절 곡선 경로 대응 경로 추종 알고리즘 | 20 |
| 제 1 항 작업기 기준 경로 추종 알고리즘 | 20 |
| 제 2 항 곡률 적용 경로 추종 알고리즘 | 24 |
| (1) 경로점(waypoint) 생성 방법 | 24 |
| (2) 경로의 곡률 계산 | 25 |
| (3) 곡률 적용 경로 추종 알고리즘 | 27 |
| 제 3 절 평가 방법 | 29 |
| 제 1 항 3D 트랙터 시뮬레이터 | 29 |
| (1) 시뮬레이터 환경 구성 | 29 |
| (2) 경로 추종 알고리즘 타당성 분석을 위한 시뮬레이터 테스트 설계 | 31 |
| 제 2 항 현장평가 | 34 |
| (1) 현장 평가를 위한 자율주행 트랙터 시스템 구성 | 34 |
| (2) 경로 추종 알고리즘 현장 검증 | 40 |

| | |
|--|----|
| 제 3 장 결과 및 고찰..... | 44 |
| 제 1 절 작업기 기준 경로 추종 알고리즘 비교 평가 및 요인 분석... | 44 |
| 제 2 절 곡률 반영 경로 추종 알고리즘 시뮬레이션 테스트..... | 48 |
| 제 3 절 곡선 경로 생성 및 경로 추종 기술 검증 및 성능 현장 평가 | 63 |
| | |
| 제 4 장 결론..... | 69 |
| | |
| 참고문헌..... | 71 |
| | |
| Abstract | 75 |

표 목차

| | |
|--|----|
| [Table 2-1] An example of RDDF generated as the reference information for path tracking and agricultural task..... | 16 |
| [Table 2-2] Specifications of the TX853 tractor used in this study | 35 |
| [Table 2-3] Specification of the navigational controller..... | 37 |
| [Table 2-4] Components of autonomous tractor | 37 |
| [Table 2-5] Specifications of the antenna and GNSS/INS..... | 39 |
| [Table 2-6] Specifications of the EPS module | 40 |
| [Table 3-1] Lateral deviation and heading error RMSE..... | 46 |
| [Table 3-2] Heading error and implement lateral deviation RMSEs of without curvature and with curvature driving steep curve..... | 49 |
| [Table 3-3] Heading error and implement lateral deviation RMSEs of without curvature and with curvature driving gradual curve ... | 51 |
| [Table 3-4] Heading error, implement lateral deviation and lateral deviation of round operating RMSEs of without curvature and with curvature tracking inner-operating (2km/h) | 56 |
| [Table 3-5] Heading error, implement lateral deviation and lateral deviation of round operating RMSEs of without curvature and with curvature tracking inner-operating (4km/h) | 58 |
| [Table 3-6] Heading error, implement lateral deviation and lateral deviation of round operating RMSEs of without curvature and with curvature tracking inner-operating (6km/h) | 60 |
| [Table 3-7] Heading error, implement lateral deviation and lateral deviation of full path RMSEs of without curvature and with curvature tracking full path in field..... | 67 |

그림 목차

| | |
|---|----|
| [Figure 1-1] Implement guidance system..... | 2 |
| [Figure 1-2] Types of curves offered by autonomous system | 3 |
| [Figure 2-1] Example of curved path using the smoothing spline method..... | 14 |
| [Figure 2-2] Path generation algorithm flow chart | 15 |
| [Figure 2-3] Guidance Line generation for path generation..... | 17 |
| [Figure 2-4] Omega type curve of Dubins curve..... | 18 |
| [Figure 2-5] Generating a headland turning path considering the vector value of the path | 19 |
| [Figure 2-6] Tractor center of gravity based path-tracking method | 21 |
| [Figure 2-7] Implement center based path-tracking method .. | 21 |
| [Figure 2-8] Error comparison of curve and circle for three pointsfor waypoints generation..... | 24 |
| [Figure 2-9] Examples of straight and curved path driving | 25 |
| [Figure 2-10] Center of a circle through three points | 26 |
| [Figure 2-11] A virtual center of rotation that changes in real time | 28 |
| [Figure 2-12] Architecture of the simulator consisting of a path planning and tracking client..... | 30 |
| [Figure 2-13] View of the 3D virtual tractor following the desired path..... | 30 |

| | |
|--|----|
| [Figure 2–14] Reference path for implement based path–tracking in the simulator..... | 32 |
| [Figure 2–15] Curved path with gradual curves (a) and steep curves (b) for simulator testing..... | 33 |
| [Figure 2–16] View of autonomous tractor | 35 |
| [Figure 2–17] View of autonomous tractor inside(a), and Raspberry Pi 4 using for navigation controller PC (b) | 36 |
| [Figure 2–18] (a) GNSS system used in this study and (b) GPS Antenna..... | 38 |
| [Figure 2–19] Test field for full path | 41 |
| [Figure 2–20] Guidance lines for path generation by manual driving | 42 |
| [Figure 2–21] Inner–operating path for test | 42 |
| [Figure 3–1] Path for path–tracking algorithm factor analysis | 44 |
| [Figure 3–2] Results of Tractor based path–tracking and Implement based path–tracking in the simulator | 46 |
| [Figure 3–3] Tractor center based path–tracking’ s implement trajectory | 47 |
| [Figure 3–4] Implement center based path–tracking’ s implement trajectory | 48 |
| [Figure 3–5] Sharp curve driving results of path–tracking without curvature applied (a) with curvature applied (b) | 50 |
| [Figure 3–6] Gradual curve driving results of path–tracking without curvature applied (a) with curvature applied (b) | 52 |
| [Figure 3–7] Simulator slope environment..... | 53 |
| [Figure 3–8] Conditions of ridge plowing applied to the this study | 54 |
| [Figure 3–9] Inner–operating path for simulator test..... | 55 |

| | |
|---|-----------|
| [Figure 3–10] Inner–operating path driving result of path–tracking without applying curvature (2km/h) | 57 |
| [Figure 3–11] Inner–operating path driving result of path–tracking without applying curvature (2km/h)..... | 58 |
| [Figure 3–12] Inner–operating path driving result of path–tracking without applying curvature (4km/h)..... | 59 |
| [Figure 3–13] Inner–operating path driving result of path–tracking without applying curvature (4km/h)..... | 60 |
| [Figure 3–14] Inner–operating path driving result of path–tracking without applying curvature (6km/h)..... | 61 |
| [Figure 3–15] Inner–operating path driving result of path–tracking with applying curvature (6km/h) | 62 |
| [Figure 3–16] Inner–operating path for validation the path–tracking algorithm..... | 63 |
| [Figure 3–17] Agricultural operating machine position RMSE for curvature of each line for line 1 to line 10..... | 65 |
| [Figure 3–18] Heading error in the 7th line when driving the Inner–operating..... | 65 |
| [Figure 3–19] Implement lateral deviation in 7th line when driving the Inner–operating..... | 66 |
| [Figure 3–20] Inner–operating path driving result of path–tracking without applying curvature | 67 |
| [Figure 3–21] Inner–operating path driving result of path–tracking with applying curvature..... | 68 |

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경

유엔식량농업기구(FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations)에 따르면 세계적으로 단위별 경지면적이 증가하고 있으며, 농업인구가 빠르게 고령화되는 현상과 농업인구가 감소하는 현상이 나타나고 있다. 농업 인력의 부족과 고령화로 인한 문제를 해결하기 위해 편리한 기계 조작과 자동화 기술에 대한 요구가 증가하고 있다. 특히, 자율주행 기술은 자동차 분야뿐만 아니라 농기계 분야에서도 농업 인구 감소 및 고령화에 따른 부족한 농업 인력을 대체할 수 있는 정밀한 자율주행 농기계에 대한 수요가 증가하고 있다.

농기계 자율주행 기술은 작업에 필요한 노동력을 감소시켜 대규모 경작 및 장시간 작업을 가능하게 한다. 이앙기 및 트랙터, 콤바인과 같은 농기계의 작업 경로를 자동으로 생성하고, 농기계를 제어하여 경로를 추종하는 기술이 상용화되어 있다. 트랙터의 경우, 국내에서는 LS 엠트론, TYM 이 자율주행 기술이 탑재된 제품을 공개하였으며, 해외의 경우 John Deere, C&H, 구보다, 얀마, 이세키 등에서 자율 직진 및 선회, 자율작업까지 가능한 자율주행 트랙터를 개발하여 판매하고 있다.

자율주행 농기계의 사용은 주행이 아닌 농작업이기 때문에 작업자의 조작을 최소화하면서 높은 생산성과 편의성을 가진 자율농작업 기술의 진보가 지속적으로 이루어지고 있으며, 이를 위해 정밀한 농작업을 위한 자율주행 기술의 개발이 요구된다. 국내 농작업환경을 고려해보면,

85%에 해당하는 논은 평지이기 때문에 대부분 직선으로 주행하며 작업을 진행하는 반면에 밭은 대부분 경사가 있으면서 비정형의 형태를 가지기 때문에 배수가 잘 이루어지고, 토양의 유실을 막기 위해 등고선에 수직인 방향으로 논지 경계를 형성하고 작업열을 생성하기 때문에 다양한 곡선 궤적을 나타낸다. 따라서, 밭작업 조건에서 자율주행 트랙터가 정밀한 농작업을 이루기 위해서는 경로 생성 기술, 경로의 형태에 따라 발생할 수 있는 추종 정확도 및 작업 정확도 향상을 위한 경로 추종 기술이 요구된다.

세계적인 농기계 기업인 존디어(John Deere)는 그림 1 과 같이 2009 년 논지 환경에서 트랙터와 장착된 트레일러 형태의 작업기의 기술기를 감지하고, 기준 경로 대비 작업기의 오차를 트랙터에 보상하여 작업기가 주행 경로 기반의 작업영역 내에서 유지될 수 있도록 트레일러와 트랙터에 각각의 GPS 를 설치하여 트레일러 위치 기반의 자율주행 트랙터의 경로 추종 기술을 개발하였다. 또한, 다양한 형태의 논지에 대응하여 곡선 경로 생성과 이를 추종할 수 있는 기술도 출시하였다.

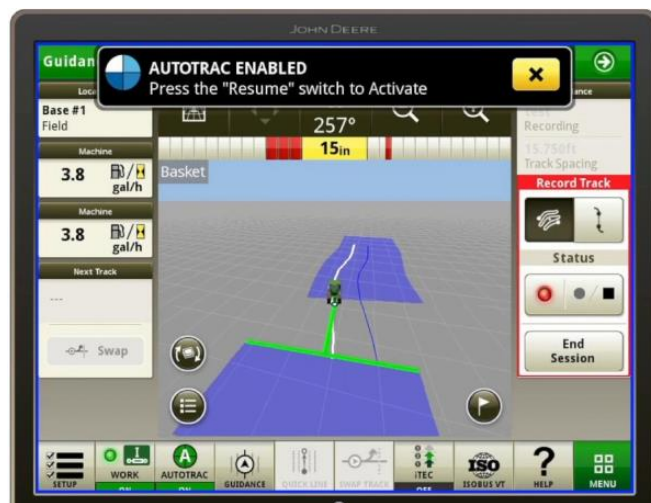


Figure 1-1. Implement guidance system (John Deere)

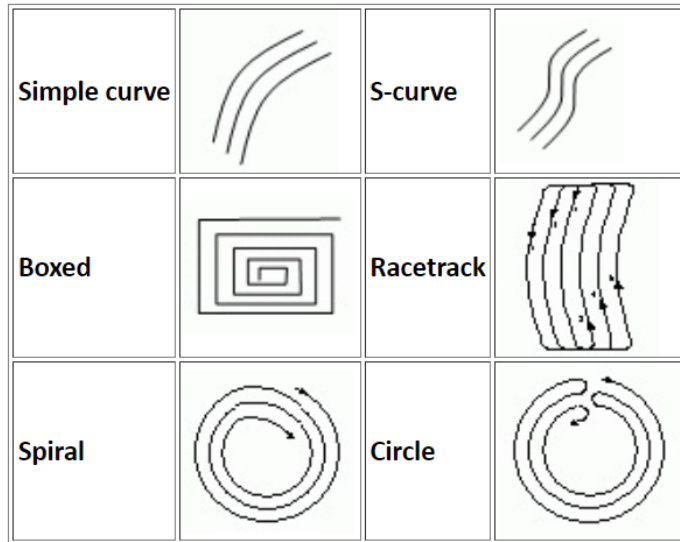


Figure 1-2. Types of curves offered by autonomous system (John Deere, Autotrac)

국내에서는, Han (2017)과 Jeon (2022)은 GNSS(Global Navigation Satellite System)를 이용하여 얻어진 포장 구획 정보를 이용하여 목표경로 좌표(TM), 횡방향 경계 오차(LBO, Lateral Boundary Offset), 작업기 상/하강 명령 등으로 이루어진 RDDF (Route Data Definition File) 파일 형태의 경로점과 관련 작업기 작동조건을 생성하고, GNSS를 이용하여 위치와 방향각 정보에 근거하여 트랙터 바퀴의 조향각을 생성하여 경로를 추종하였다. 이때 적용되는 경로 추종 알고리즘은 kinematic bicycle model 기반 상태 공간 방정식을 체인 시스템으로 변환하여 선형화하고, 이를 통해 비선형 제어 시스템을 설계하였다.

하지만, 생성된 경로는 직선 작업 경로에 집중하여 곡선 경로 생성작업과 추종 기술에 대한 연구는 수행하지 않았다. 또한, 곡선작업 경로를 마치고 선회하면서 이웃하는 작업경로에 자동으로 진입하는 기술 개발은 수행하지 않았다. 따라서, 국내 발환경을 고려한 곡선 경로 생성

연구와 생성된 곡선 경로를 정밀하게 추종하기 위한 경로 추종 연구가 필요하다.

국외의 경우는 Rahman 등 (2019)과 John Deere 의 ‘Autotrac’ 기술을 참고하여 주행 궤적을 기반으로 곡선 작업 경로를 생성하고자 하였으며, 추가적으로 발환경에 적용 가능한 선회를 포함한 곡선 작업 경로 생성 기술 개발하고자 하였다. 또한 생성된 작업 경로에 대해 작업기 위치의 오차를 감소시킬 수 있는 작업기 위치를 고려한 작업기 기준의 트랙터 경로 추종 알고리즘과 더 나아가 곡선 경로 주행을 위한 경로 추종 기술이 개발하고자 하였다. 개발한 알고리즘에 대해서는 가상 시뮬레이션을 통한 알고리즘 검증과 실제 적절한 센서와 액추에이터 및 제어기를 탑재한 차량을 이용한 효용성 평가가 요구된다.

제 2 절 연구의 목적

본 연구에서는 등고선에 수직인 방향으로 농작업을 진행하는 밭환경에서의 농작업을 고려하여 직선과 같이 일정한 형태로 정의하기 힘든 다양한 형태의 곡선으로 이루어진 농지에서 작업자의 주행으로부터 생성된 곡선 경로를 기준으로 곡선 작업경로와 선회경로를 생성하고자 하였다. 또한 주행 시 농작업 효율이 감소하는 한계를 극복하기 위해서 기존에 연구되었던 주행을 위한 차량 중심 제어 방식에서 농작업을 위한 작업기 기준의 경로 추종을 적용하고, 더 나아가 곡선 경로의 곡률 특성을 반영하여 곡선 주행 시 발생하는 작업의 정확도 감소를 경로의 곡률을 적용한 경로 추종 알고리즘을 통해 극복하고자 하였다. 구체적인 목적은 다음과 같다.

- 1) 작업자의 주행으로부터 생성된 곡선 경로를 기준으로 왕복 곡선 작업 경로 생성 기술 개발
- 2) Kinematic model 기반 작업기 기준 경로 추종 알고리즘 개발
- 3) 곡선 경로를 고려한 곡률 반영 경로 추종 알고리즘 개발
- 4) 시뮬레이터를 통한 경로 추종 알고리즘 타당성 분석
- 5) 실제 환경에서의 검증 및 성능 현장 평가

제 3 절 문헌 조사

제 1 항 경로 생성 알고리즘

Bochits 등(2009)은 Tree hierarchy 기법을 활용하여 자율주행 잔디깎이 트랙터용 경로생성기를 개발하였다. 농지 정보 및 차량 정보를 사용자 입력 받아 최소 주행거리의 새머리 자동 선회 경로와 왕복 주행 경로 계획이 가능함을 보고하였으며, 자율주행 트랙터를 활용한 현장 평가 결과, 관행 방법보다 최대 50% 미작업 거리 감소가 가능하다고 하였으며, 3 가지 다른 형태의 포장에서 시험을 진행하여 포장에서 왕복 작업 순서를 최소화하는 방법을 제시하였다.

서일환 (2010)은 경운경로를 생성하기 위하여 포장의 작업순서를 결정하였고, 내측 왕복작업부와 외측 선회작업부로 나누었으며, 왕복작업부의 왕복작업 경로를 C 형, C-구획형, X 형 및 R 형 작업 4 가지로 구분하여 개발하였다. 경로생성 프로그램에서 생성된 주행 경로를 검증하기 위하여 검증프로그램을 개발하였으며 가상 시뮬레이션을 실시 하여 미경운 부분을 확인하고 이 결과를 경로생성 프로그램에 적용하여 성능을 향상시킬 수 있음을 제시하였다. 하지만, 개발한 경로생성 프로그램을 트랙터에 실제 장착하고 실험한 결과는 보고되지 않았으며 다변형 형태의 포장에서 경로생성 연구에서 한계를 갖는다.

Hameed 등(2011)은 비정형 농지에서 최적 왕복 경로 생성 알고리즘 연구를 진행하였다. 경로 최적화는 3 단계로 구성되며, 첫번째 단계에서는 중복되는 작업 영역을 최소화하는 것을 기반으로 주행 방향을 최적화하였으며, 두번째 단계에서는 새머리 선회 시 발생하는 미

작업 거리를 최소화 작업을 진행하였다. 마지막 단계에서는 비정형 농지의 효율적 작업을 위해 구획화하고, 구획화된 영역간 이동에 발생하는 거리를 유전 알고리즘으로 최소화함으로써, 최적화된 경로 계획 방법을 제시하였지만, 현장 시험을 통한 유효성을 확인하지 않았다.

한웅철 등(2013)은 직교형 무논 환경에서의 국내 경운 작업 순서 및 경로 유형을 분석하고 모델링 하였으며, 다양한 새머리 선회 유형(C 형, X 형, R 형) 대응 경로 계획 알고리즘을 제시하였다. 또한 Waypoint 항법 알고리즘 적용을 위한 경로 점 및 트랙터 제어 정보를 포함 RDDF (Route Date Definition File) 제시하여, 현장검증 하였으며 직선경로에서 평균 오차와 최대 오차 각각 11cm 및 21.4 이내로 나타났다.

Hameed 등(2014)은 2D 경로 최적화 방법을 3D 경로생성방법에 적용되는 전역 경로생성에 대해 연구를 하였다. 경사지면의 필드에서 경로생성이 농기계의 에너지 소모와 관계를 가지고 있으며 가장 적은 에너지 소모 기반으로 완전한 작업을 수행하기 위해 적합한 왕복경로의 순서를 결정하는 것이 본 연구의 주 목적이었다. 두가지형태의 필드에서 적용한 결과를 보면 3D 지형을 고려한 경로생성 알고리즘을 사용 시 에너지 소모가 평균적으로 6.5% 감소하는 것으로 나타났다.

Backman 등(2015)은 Dubin Curve 모델에 최대 조향 속도향을 적용한 자동 선회 경로 생성 방법을 연구하였다. 기존의 트랙터 조향 각속도가 반영되지 않은 Dubin curve 모델은 추종 속도가 연속적이지만, 이산적으로 생성되는 제어 명령으로 인해 추종 정밀도가 감소하는 한계를 numerical 최적화 방법을 활용하여 개선하였다. 시뮬레이션

환경에서 C 형, X 형, Fishtail 형 새머리 선회 방법에 대하여 시간 효율 증가가 가능한 경로 생성이 가능함을 보고하였다.

Hameed 등(2016)은 고르지 못한 농작업 환경 주행 시, 트랙터 자세 변화로 인해 발생하는 미작업 면적을 최소화하기 위해 대상 농지의 디지털 고도 모델 (DEM) 정보 활용한 3 차원 경로 계획 방법을 연구하였다. 기존의 2 차원 계획기를 이용한 생성된 경로를 DEM 의 높이 정보만큼 투영하여 생성하며, 보간법을 활용하여 차원의 증가로 경로 점간 거리 증가 보상하였다. 본 논문에서 제시한 결과 경사 지면에 따라 인접한 경로 간의 거리가 증가 혹은 감소 영향을 받기 때문에 미작업 또는 겹치는 면적이 발생하는 것을 확인하였으며, 적합한 주행 방향을 적용하게 되면 2-14%의 필드 공간을 더 확보하여 공간 사용 효율을 향상할 수 있음을 보고하였다.

Rahman 등(2019)은 비정형 농지에서 경로 계획을 위한 자동 농지 경계 정보 취득 방법을 제시하였다. 대부분의 경로 계획 알고리즘은 농지 경계 정보를 코너의 꼭지점 정보를 제공 받아 작동하지만, 실농지 환경 경계는 코너 점을 잇는 직선으로 정의하는데 한계가 있음을 밝히고, 경계를 따라 취득된 주행 궤적과 convex hull 방식을 이용해 농지 정보를 자동으로 취득하였다. Convex 및 Concave 모양의 무논에서 현장 평가를 통해 자율주행 시스템 적용 시간 효율 증대와 미작업 영역 감소 효과가 있음을 보고하였다.

제 2 항 경로 추종 알고리즘

Stoll 과 Kutzbach (2000)는 RTK-GPS 에서 얻은 위치 정보를 기반으로 경로를 생성하고 따라가기 위해 경로 추종 알고리즘과 자동 조향 시스템이 장착된 자율주행 마초 수확기를 개발하였으며, 작업 경로에 대한 오류는 100 mm 이내로 나타났다.

Guo 와 Zhang (2002)는 칼만 필터가 사용되고, IMU 가 내장되어있는 Garmin GPS 17N 기반의 시스템을 바탕으로 off-road vehicle 위치 추종 시스템을 개발하고자 하였다. 차량의 위치 오차는 공분산 행렬을 사용하여 보정하였으며, 차량 속도 1.34 m/s 에서 오차는 동쪽을 기준으로 1.29 m 에서 0.42 m, 북쪽을 기준으로 1.48 m 에서 0.31 m 로 감소하였다.

Zhang 등(2004)은 자율주행 트랙터가 원하는 경로를 추종하기 위해 Look-ahead 기반의 동적 경로추종 알고리즘을 개발하였으며, 시뮬레이터를 통해 알고리즘을 검증하였다. RTK-GPS (Real Time Kinematic - Global Positioning System)와 FOG (Fiber Optic Gyroscope) 센서를 이용한 포장 실험에서 RMSE (Root Mean Square Error) 값은 0.03 m 이내의 성능을 보였다.

Fang 등(2005)은 농업 환경에서는 필연적으로 미끄러짐이 발생으로 인해 자율주행 경로 추종 정확도가 감소하기 때문에 농업환경에서 미끄러짐을 고려한 kinematic model 을 구축하였으며, 외부의 방해요소를 고려해 노이즈를 시뮬레이션 환경 주입하여 실험하였다. 그 결과 곡선 구간에서 미끄러짐을 고려한 kinematic model 의 성능이 고려하지 않은 모델보다 성능이 뛰어난 것을 보였다.

Lenain 등(2006)은 포장의 상태에 영향을 많이 받는 농업 환경에서 정밀한 자율주행을 위해서 주행 중 발생하는 슬립을 극복하기 위한 경로

추종 알고리즘을 개발하고자 하였다. 경로 추종 알고리즘은 Kinematic Model 기반의 차량모델에 slip angle 과 관련된 동적 변수들을 고려한 Extended Kinematic Model 을 기반으로 개발되었다. 알고리즘은 GPS 기반으로 생성된 주행 경로의 선회 구간에서 테스트하였으며, 그 결과 ± 15 cm 오차를 나타냈다.

Lenain 등(2007)은 Extended Kinematic Model 기반의 모델을 통해 미끄러짐이 발생하는 경사 환경에서 4 륜 조향 off-road 차량의 측면 편차 감소와 rolling 각 편차를 보정하고자 후방 차축의 각도를 고려한 backstepping 제어 방식을 설계하였다. 실험은 RTK-GPS 가 장착된 4 륜 조향 차량을 사용하여 경사도 15%(경사각 8.5°)의 환경에서 실험하였으며, 측면오차 ± 10 cm 의 성능을 보였으며, 추후 농업환경에 적용할 수 있는 연구로 트레일러나 프론트 로더가 부착된 농기계 자율주행과 관련된 연구방향을 제시하였다.

Fang 등(2011)은 차량의 타이어와 노면 사이의 코너링 강성을 예측할 수 있는 강인 슬립 제어 알고리즘을 개발하였다. 차량이 주행중 측면 외란(Lateral disturbance)가 있는 경우에도 차량과 노면 사이의 타이어 코너링 강성을 예측하기 위해 Luenberger 유형의 관측기 적응형 타이어 코너링 강성 예측 관측기를 설계하였고, 체인 시스템 기반으로 타이어 코너링 강성을 통해 예측된 슬립각을 조향 로직에 반영하여 슬라이딩 모드 컨트롤러를 설계하였다. 실험은 MATLAB/Simulink 와 ADAMS 로 구성된 시뮬레이션과 실차 주행을 통해 진행되었으며, 시뮬레이션에서는 10cm 이내의 오차를 보였고 실차 주행시에는 측면 오차 ± 20 cm, 방향각 오차는 ± 5 deg 의 오차를 보였다.

Han 등(2015)은 국내 포장 환경을 고려하여 C 형 새머리 선회를 기반으로 경로 생성 알고리즘을 수도작 포장 조건에서 취득된 포장의 위치 정보를 이용하여 기준 경로를 생성하고, RTK-GPS, IMU, 그리고 look-ahead 기반의 경로 추종 알고리즘이 탑재하여 자율주행 트랙터를 구성하였으며, 시뮬레이션과 현장에서의 경로 추종 성능을 실차 실험을 통해 검증하였다. 슬립 현상이 구현 가능한 시뮬레이터를 통해 자율주행에 요구되는 look-ahead 거리, 속도, 선회 경로점 간격 등을 추종 성능을 기준으로 최적화하였다. 수도작 환경에서 10 개의 70 m 작업 열을 2 km/h 의 속도로 주행한 결과, 직선구간에서는 RMSE 12.8 cm 이하의 결과를 얻었다.

Han 등(2019)은 관측 루프(Observer loop)에서 트랙터의 실시간 상태를 통해 전륜, 후륜의 슬립을 예측하고 이를 조향각 산출에 반영한 kinematic model 기반의 경로 추종기를 제안하였다. 슬립 구현이 가능한 시뮬레이션에서 효용성 검토 및 수도작 포장 환경에서 자율주행 경운 실차 검증을 수행하였으며, 3 점 히치에 dynamometer 를 부착하여 자율주행 트랙터의 작업영역과 미작업 영역을 구분하였다. 실험은 80 x 30 m 의 포장에서 3 km/h 의 속도로 자율 경운을 수행한 결과 직선 작업 구간에서 RMSE 23 cm 이내의 추종 성능과 91.5%의 작업 성능 결과를 보였다.

선행연구에서는 자율주행 농기계를 위한 직진과 곡서 경로에서의 작업을 위한 경로 생성 방법을 제시하였다. 직진 경로의 경우, 두 점을 통해 정의가 가능하지만, 곡선 경로의 경우 작업자의 주행궤적을 바탕으로 작업경로와 각 작업경로를 이어주는 선회경로를 생성하는 것이 필요하다. 하지만, 선회 경로를 작업자의 주행궤적을 기준으로 생성하게 되면, 작업자에 따라 미작업 영역 또는 작업 영역의 겹침 문제가 발생할

수 있다. 발생하는 문제를 최소화하기 위해서 작업의 정확도 및 효율을 증가시킬 수 있는 선회경로 생성 기술이 필요하다.

경로 추종과 관련된 선행연구에서는 작업을 위한 경로점들이 직선으로 이어진 경로와의 오차를 감소시키기 위해서 트랙터 무게 중심을 기준으로 경로를 추종하는 방식이 많이 적용되었지만, 트랙터의 작업기 기준으로 기준 경로 대비 오차를 기반으로 주행하는 연구는 상대적으로 연구가 덜 진행되었으며 밭환경이나 경사가 있는 환경에서의 곡선 작업 경로를 주행하며 경로의 곡률을 고려한 경로 추종 기술과 국내의 밭환경의 특징을 고려한 자율주행 농기계 기술 연구는 미흡하게 진행되었다.

제 2 장 재료 및 방법

제 1 절 곡선 경로 생성 알고리즘

제 1 항 Smoothing-spline 을 활용한 기준 경로 생성

주행을 통해 생성된 기준 경로(guidance line)는 트랙터를 운전하는 작업자에 따라 기준 주행 경로가 생성하고자하는 경로와 다르게 형성될 수 있기 때문에 주행궤적에 적합한 하나의 곡선 위에서 경로를 만들고자, Smoothing-spline 방법을 적용하였다(Equation 2-1). 경로의 시작점과 종료점은 작업자가 기준 곡선경로를 생성하기 위해서 경로를 저장하기 시작한 시점부터 저장을 종료한 시점으로 정의하였다.

Smoothing-spline 은 주어진 데이터에 대해서 곡선을 적합시킬 때, 주어진 데이터셋(x_i, y_i)에 적합한 함수 $g(x)$ 를 찾는 것이 목표이다. 이때, x 에 대한 함수 $g(x)$ 값의 조건이 없다면 모든 y_i 를 연결한 $g(x)$ 를 선택함으로써 표준편차가 0 인 $g(x)$ 를 생성할 수 있지만, 이렇게 생성된 $g(x)$ 는 과적합 문제가 발생할 수 있다. 따라서 과적합 문제를 해결하기 위한 방법으로 equation1 을 최소화하는 함수 $g(x)$ 를 찾고자 함수가 주어진 데이터에 적합될 수 있도록 해주는 loss function, 기울기 변화 변동성을 반영한 penalty function 을 적용하고, penalty 함수의 튜닝파라미터 람다를 통해 작업자의 주행궤적에 적합한 곡선을 찾고, 기준 곡선 경로를 생성하였다 (Figure 2-1).

$$\sum_{i=1}^n (y_i - g(x_i))^2 + \lambda \int g''(t)^2 dt \quad (2-1)$$

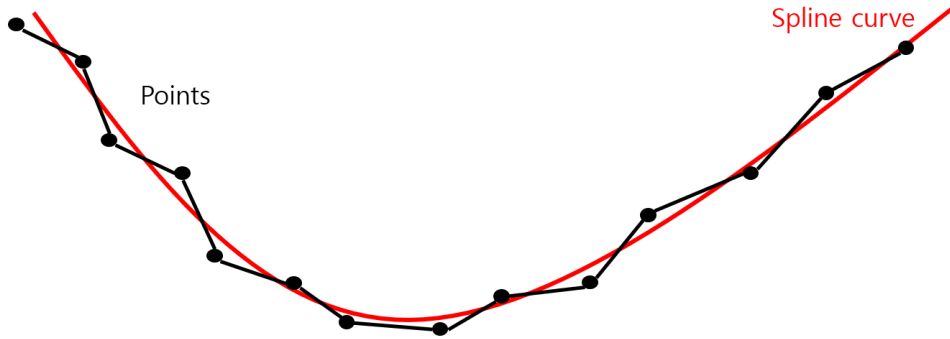


Figure 2-1. Example of curved path using the smoothing spline method

제 2 항 왕복 곡선 작업 경로 생성

대부분의 밭이 경사지에 위치하고 있으며, 작업 열도 등고선을 기준 곡선 형태를 띤다. 왕복 곡선 작업 경로 생성 알고리즘은 이러한 밭을 대상으로 개발하였다. 곡선을 따라 주행하며 작업을 진행하는 포장은 직교형 또는 다변형 포장과는 다르게 농지 경계 또는 작업열에 대한 정의가 어렵다. 따라서, 주행 방향은 등고선에 수직인 방향으로 작업열을 생성하는 밭을 고려하여 장변 방향으로 설정하였으며, 곡선 경로 생성 알고리즘의 개요도는 Figure 2-2 와 같다.

알고리즘의 입력으로는 작업자가 첫 작업 열을 수동으로 주행하며 획득한 경로, 차량의 최소 선회 반경, 속도, 작업폭, 주행 방향 및 경로 생성 방향 및 LBO (Limit of Boundary Offset) 길이가 있다. 이에 대한 출력은 전체 경로에 대한 경로점들의 집합인 RDDF (Route Data

Definition File)의 형태로 표현되며, RDDF 는 경로 탐색에 필요한 경로 정보를 제공한다.

RDDF 는 Table 2-1 과 같이 7 개 열로 구성된 TXT 파일 형태로 생성된다. 첫 번째 열은 경로점의 순서이며, 두 번째 열은 해당 경로점의 X 축 방향 좌표, 세 번째 열은 Y 축 방향 좌표이다. 4 열은 LBO 의 범위, 5 열은 생성된 경로점들의 곡률, 6, 7 번째 열은 각각 차량의 속도와, 작업기 상·하강 제어를 위한 항목이다.

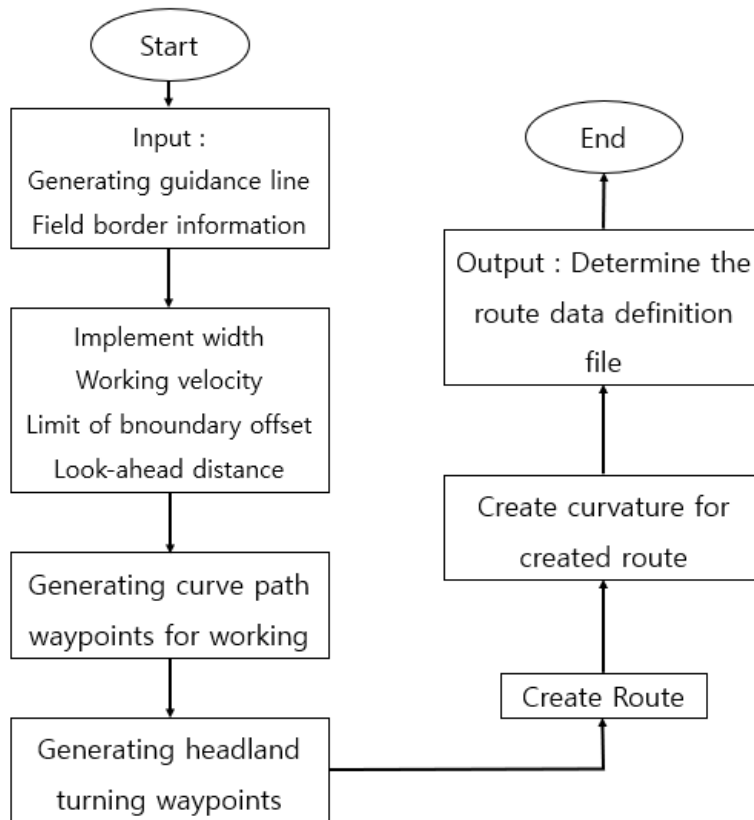


Figure 2-2. Path generation algorithm flow chart

RDDF 는 Table 2-1 과 같이 7 개 열로 구성된 텍스트(txt) 파일 형태로 생성된다. 첫 번째 열은 경로점의 순서이며, 두 번째 열은 해당

경로점의 X 축 방향 좌표, 세 번째 열은 Y 축 방향 좌표이다. 4 열은 LBO의 범위, 5 열은 생성된 경로점들의 곡률 그리고 6, 7 번째 열은 각각 차량의 속도와, 작업기 상·하강 제어를 위한 항목이다.

Table 2-1. An example of RDDF generated as the reference information for path tracking and agricultural task

| Index | Latitude (m) | Longitude (m) | LBO (m) | Curvature | Velocity (km/h) | Implement Up/down |
|-------|-----------------|------------------|------------|-----------|--------------------|----------------------|
| 1 | 518946.4001 | 199238.3468 | 0.1 | 0.0459 | 2 | 1 |
| 2 | 518943.3367 | 199237.884 | 0.1 | 0.0080 | 2 | 1 |
| ... | | | | | | |
| n-1 | 518944.0035 | 199213.0161 | 0.1 | 0.0380 | 2 | 0 |
| n | 518944.0668 | 199212.5161 | 0.1 | 0.0299 | 2 | 0 |

(1) 곡선 작업 경로 생성

Smoothing-spline 을 통해 생성된 경로를 기준으로 생성하고자하는 작업폭 및 농지의 폭을 고려하여 작업 대상 농지의 곡선 작업 경로를 생성하였다. 이때, 생성할 경로의 수(N)는 Equation 2-2 과 같이 기준 경로(guidance line)의 폭과 작업하고자하는 경로의 폭을 고려하여 결정하였다. 생성된 각 경로의 경로점은 기준 경로를 기준으로 생성하고자하는 경로의 수를 고려하여 Equation 2-3 을 통해 생성되었다.



Figure 2-3. Guidance Line generation for path generation

$$\frac{\text{Guidance Line}_i(\text{max}) - \text{Guidance Line}_f(\text{min})}{\text{implement_width}} \quad (2-2)$$

= 추가 생성할 경로 수(N)

$$\text{Line}_i(x_n, y_n) \pm \frac{\text{Line}_i(x_n, y_n) - \text{Line}_f(x_n, y_n)}{N} k \quad (2-3)$$

($1 \leq k \leq N$) = 추가 생성한 경로의 경로점 생성

여기서, x = Longitude

y = Latitude

(2) 선회 경로 생성

다음 작업 경로로 진입하기 위해서는 이전 작업경로와 다음 작업경로를 이어주는 선회경로가 필요하다. 본 연구에서의 선회 경로를 생성하기 위해서 Dubins 곡선 방법을 적용하여 선회 경로를 생성하였다. Dubins 곡선은 초기지점과 최종지점의 벡터값이 주어질 때 최단경로가 직선(S) 세그먼트와 최소 반경의 호(R 또는 L) 세그먼트 3 개의 경로 조합으로 구성되며, 세그먼트 구성 및 회전 순서에 따라 총 6 가지 형태(LSL, LSR, RSL, RSR, LRL, RLR)의 케이스가 존재한다. 본 연구에서는 트랙터의 최소 회전 반경 5m, 선회 형성 구간의 초기 및 최종지점의 벡터값(Equation 2-4, 2-5)을 고려하여 형성하였으며, 선회 초기지점과 최종지점의 차이가 트랙터의 최소 회전 반경보다 좁기 때문에 Omega 형으로 Figure 2-4 와 같이 형성하였다.

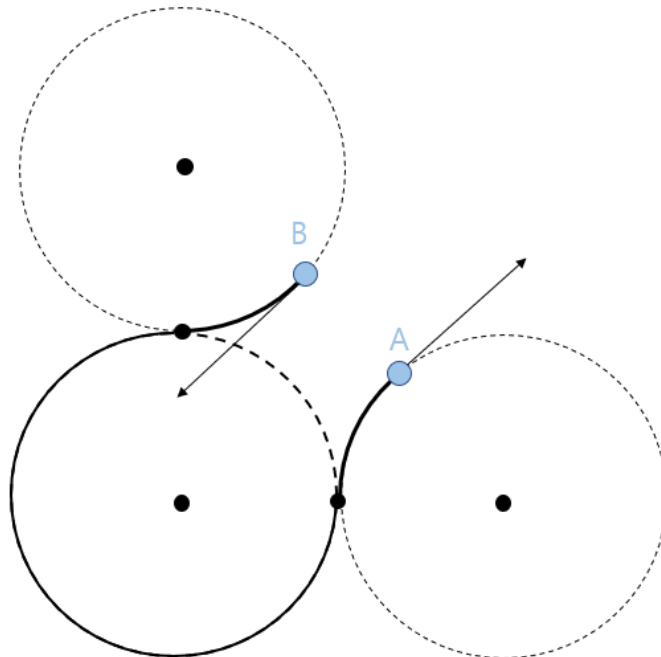


Figure 2-4. Omega type curve of Dubins curve

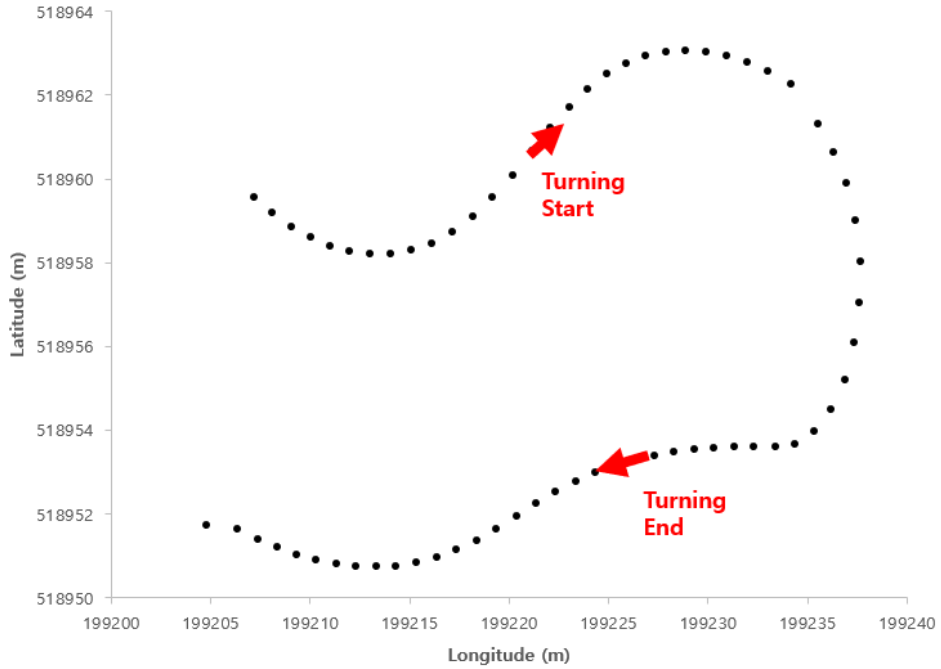


Figure 2-5. Generating a headland turning path considering the vector value of the path

$$\frac{L_{N-m}(y_n) - L_{N-m}(y_{n-1})}{x_n - x_{n-1}} = \text{선회 시작지점 벡터값} \quad (2-4)$$

$$\frac{L_{N-m-1}(y_2) - L_{N-m-1}(y_1)}{x_2 - x_1} + \pi = \text{선회 종료지점 벡터값} \quad (2-5)$$

제 2 절 곡선 경로 대응 경로 추종 알고리즘

기존의 트랙터 무게 중심을 기준 경로 상에 위치시키는 목적으로 수행된 자율주행 경로 추종 알고리즘은 정밀한 농작업을 위한 경로 추종 기술로 개선이 요구된다. 또한 밭에서의 자율주행 트랙터 적용을 위해서는 작업 경로의 형태를 고려한 경로 추종 기술이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 제어 중심점이 차량 무게 중심에서 작업기 중심으로 적용함으로써, 주행이 아닌 농작업을 위한 경로 추종 기술을 제안하고, 더 나아가 다양한 형태의 농지의 곡선 경로에서 정밀한 자율주행을 위해서 경로의 곡률 특성을 반영한 경로 추종 알고리즘을 제안함으로써 곡선 경로에서의 경로 추종 성능을 향상시키고자 하였다.

제 1 항 작업기 기준 경로 추종 알고리즘

본 연구에서는 Han et al (2019)를 참고하여 작업기 기준으로 전방 주시 거리 변수 (Look-ahead distance)를 적용하였으며, 이를 기준으로 Figures 2-6 와 2-7 과 같이 기준 경로와 수직이 되는 직선의 거리를 측면 편차로, 이때 전방 주시 거리를 이루는 직선과 경로점을 이은 직선이 이루는 각을 방향각 오차로 계산하여 경로 추종 알고리즘에 적용하였다. 경로 추종 알고리즘에 적용된 조향계산식은 Lenain et al (2007)을 참고하여 Figure 2-6 과 같이 자율주행 트랙터와 관련된 기존의 많은 연구들에서 수행된 트랙터 무게 중심의 경로 추종 방식과는 다르게 농기계의 목적에 맞게 Figure 2-7 과 같이 작업기를 기준으로 kinematic bicycle model 을 이용하여 구성하였다.

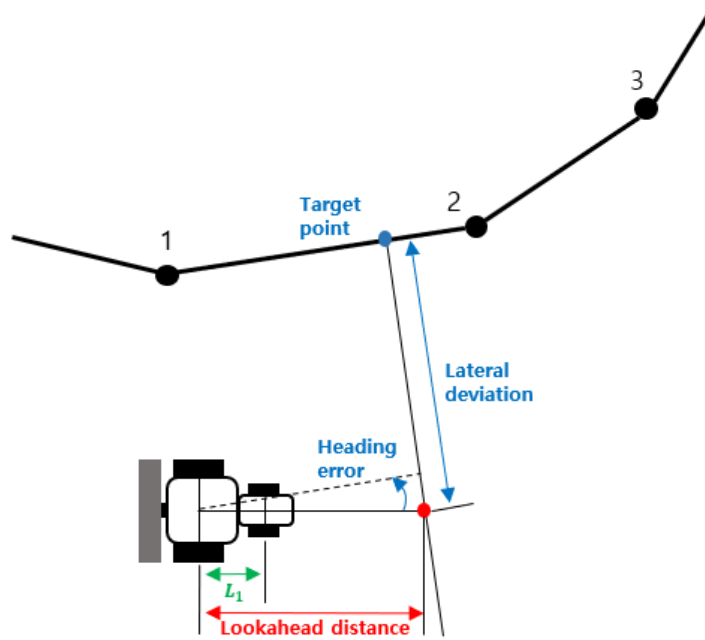


Figure 2-6. Tractor center of gravity based path-tracking method

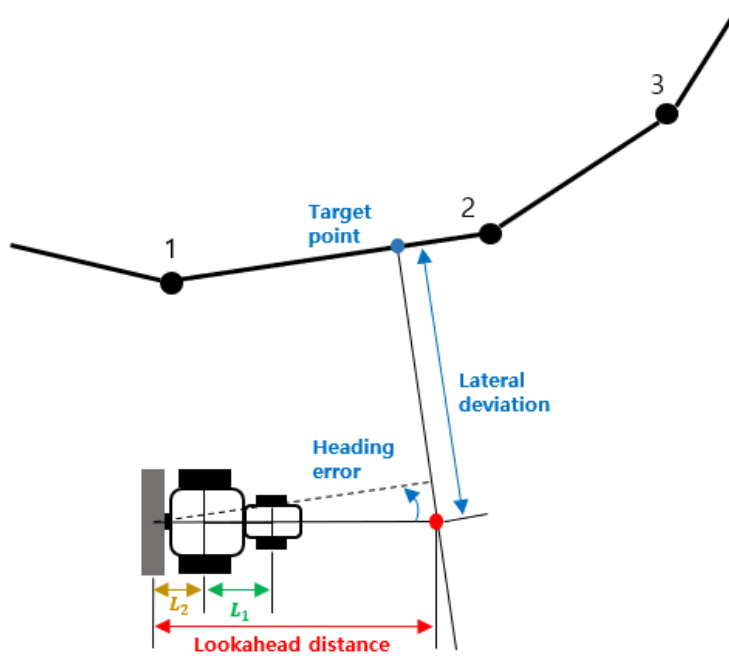


Figure 2-7. Implement center based path-tracking method

차량의 실시간 변화율을 나타내는 Equation 2-6 은 비선형 시스템을 Equation 2-7 과 같이 상태 변환하여 제어가 용이한 선형 시스템인 Chained form 형태인 Equation 2-8 로 변환할 수 있고, 이후 제어를 위해 역변환하여 횡방향 편차와 방향각 오차에 대한 비선형 PD (proportional-derivatives) 제어 시스템 Equations 2-9 와 2-10 와 같이 설계할 수 있다.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{s} = \frac{v \cos \tilde{\theta}}{1 - yc(s)} \\ \dot{y}_t = v \sin \tilde{\theta} \\ \dot{\tilde{\theta}} = v \left(\frac{\tan \delta}{(L_1 + L_2)} - \frac{c(s) \cos \tilde{\theta}}{1 - yc(s)} \right) \end{array} \right. \quad (2-6)$$

여기서, \dot{s} = 종방향 변화율

\dot{y}_t = 횡방향 변화율

$\dot{\tilde{\theta}}$ = 방향각 변화율

$$\left\{ \begin{array}{l} [s, y, \tilde{\theta}] \rightarrow [a_1, a_2, a_3] = [s, y, (1 - c(s)y) \tan(\tilde{\theta})] \\ [V, \delta_f] \rightarrow [m_1, m_2] = \left[V \cos \tilde{\theta}, \frac{da_3}{dt} \right] \end{array} \right. \quad (2-7)$$

여기서, $[a_1, a_2, a_3]$ = 상태변수

$[m_1, m_2]$ = 제어입력

$$\left\{ \begin{array}{l} a'_2 = \frac{da_2}{da_1} = a_3 \\ a'_3 = \frac{da_3}{da_1} = m_3 = \frac{m_2}{m_1} = -K_d a_3 - K_p a_2 \end{array} \right. \quad (2-8)$$

$$a''_2 + a'_2 K_D + a_2 K_p = 0 \quad (2-9)$$

$$a''_2 \left(= a'_3 = \frac{m_2}{m_1} = m_3 \right) = -a'_2 K_D - a_2 K_p \quad (2-10)$$

기존의 연구들(Han et al., 2015; Han et al.,2019)에 기반하여 경로점들이 직선으로 되었기 때문에 곡률(c(s))는 0 으로 적용하였으며, Equation 2-11 와 같다.

$$\delta_f = \arctan \left[(L_1 + L_2) [\cos^3 \tilde{\theta} (-K_d \tan \tilde{\theta} - K_p y)] \right] \quad (2-11)$$

여기서, δ_f = 트랙터의 조향각

y = 기준 경로 대비 트랙터 횡방향 편차

$\tilde{\theta}$ = 기준 경로 대비 트랙터 방향각 오차

제 2 항 곡률 적용 경로 추종 알고리즘

(1) 경로점(waypoint) 생성 방법

본 연구에서는 작업자의 주행을 통해 만들어진 기준 경로(guidance line)을 기반으로 생성된 곡선 작업 경로와 선회경로에서 자율주행 트랙터의 제어를 위한 경로점을 생성하기 위해서 곡선을 이루는 점과 이 점들을 지나는 원의 차이를 통해 오차 범위 이내에 존재하는 점을 경로점으로 선정하고자 하였다. 자세히는 곡선 경로의 시작점으로부터 양측으로 일정 간격(d)으로 증가하면서 곡선 위의 임의의 세 점을 선정하였다. 이후, 선정된 세 점을 지나는 원과 세 점의 곡선 그래프와의 차이의 오차를 비교하여 GPS 허용오차범위(e) 2cm 이내에서 경로점의 간격을 최대하고자 허용오차범위와의 차이를 최소로 만족하는 점을 경로점으로 지정하였다.

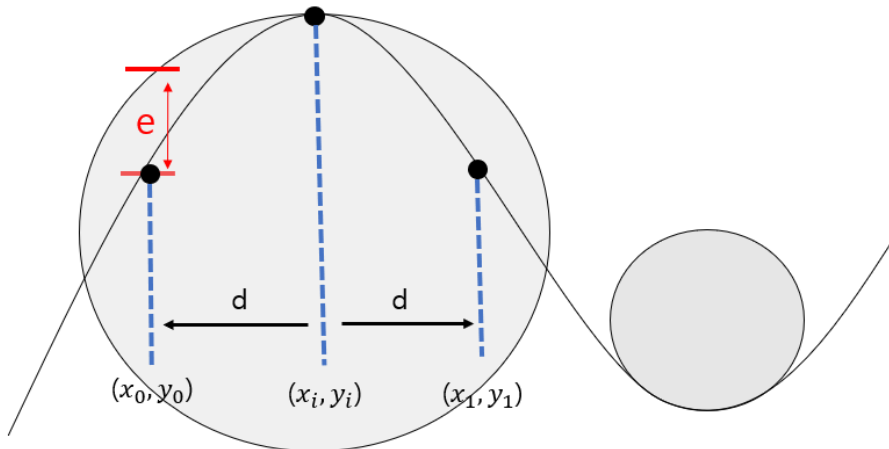


Figure 2-8. Error comparison of curve and circle for three points for waypoints generation

$$d = n\alpha \quad (\alpha = 0.001, n \geq 1) \quad (2-12)$$

$$|e| < 0.02 \quad (2-13)$$

(2) 경로의 곡률 계산

차량 주행 시 같은 지점을 바라볼 때 곡선경로 주행 상황에서는 직선 경로를 주행할 때보다 거리가 멀어지게 된다(Figure 2-9). 이러한 변화를 반영하여 제안한 곡선 경로 생성 기술과 생성된 곡선을 이루는 경로점들의 굽은 정도를 변화율로 표현하고 이를 자율주행 트랙터에 적용하기 위해서 생성된 경로의 곡률을 정의하고자 하였다. 생성된 경로의 곡률은 연속된 3 개의 경로점 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) 에 대해 정의하였다. 자세히는 Figure 2-10 와 같이 인접한 점 사이의 직선에 수직 이등분선(d_1, d_2)을 통해 Equation 2-14 과 같이 세 점이 이루는 원의 중심을 도출하였으며, 이로부터 점 사이의 거리를 통해 곡률을 정의하였다(Equation 2-15).

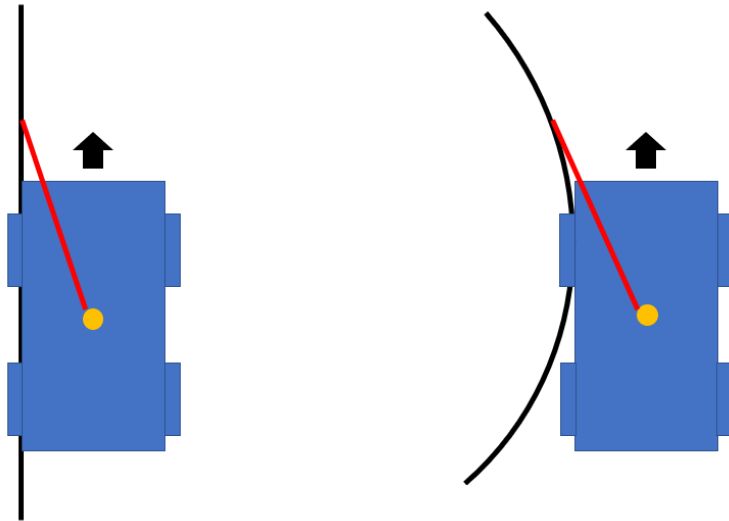


Figure 2-9. Examples of straight and curved path driving

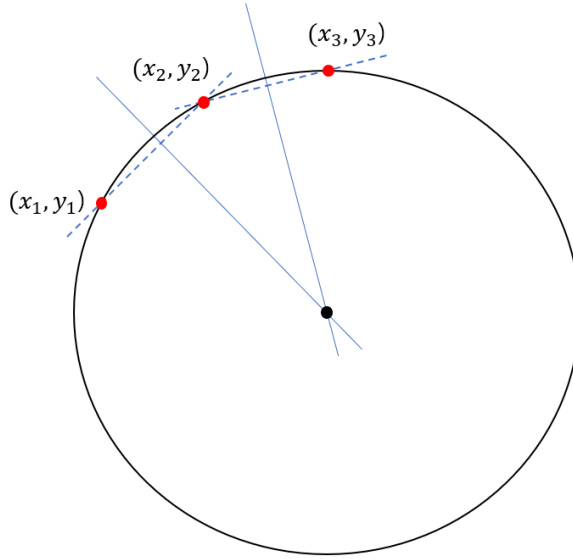


Figure 2-10. Center of a circle through three points

$$\left\{ \begin{array}{l} c_x = \frac{((y_3 - y_1) + d_2(x_2 + x_3) - d_1(x_1 + x_2))}{2(d_2 - d_1)} \\ c_y = \frac{-d_1(c_x - (x_1 + x_2)/2) + (y_1 + y_2)}{2} \end{array} \right. \quad (2-14)$$

$$radius = \sqrt{(x_1 - c_x)^2 + (y_1 - c_y)^2} \quad (2-15)$$

또한, 자율주행 트랙터의 조향제어를 위한 곡률 적용을 위하여 Equation 2-16 을 적용하여 경로의 진행 방향을 반시계 방향, 시계 방향으로 구분하였다.

$$\left\{ \begin{array}{l} (x_2 - x_1)y_3 > (y_2 - y_1)(x_3 - x_1) + y_1(x_2 - x_1) \\ (x_2 - x_1)y_3 < (y_2 - y_1)(x_3 - x_1) + y_1(x_2 - x_1) \end{array} \right. \quad (2-16)$$

(3) 곡률 적용 경로 추종 알고리즘

Equation 2-17 는 본 연구에서 적용된 곡률 특성을 반영한 경로 추종 알고리즘의 조향계산식이다. 이전 항에서 적용된 경로점 사이를 직선으로 이은 경로를 추종하는 작업기 기준 알고리즘은 경로의 형태를 고려하지 않은 경로 추종 방식이기 때문에 곡선 경로 주행 상황에서 발생하는 추종 정확도의 감소를 극복하고자 경로 추종 알고리즘에 곡선 경로의 곡률을 반영하고자 하였다. 경로의 곡률에 따른 실시간 조향 제어를 위해서 생성된 경로점들이 이루는 곡선의 곡률을 경로 추종 알고리즘에 적용하였다. 조향 제어를 위한 측면 편차, 방향각 오차는 작업기 기준 알고리즘에 사용된 계산 방식과 동일하게 전방 주시 거리를 기준으로 반영하였다.

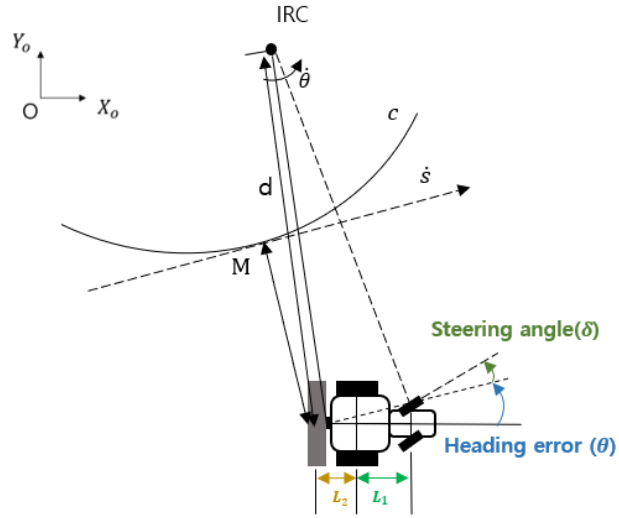


Figure 2-11. A virtual center of rotation that changes in real time

$$\delta_f = \arctan \left[(L_1 + L_2) \left[\frac{\cos^3 \tilde{\theta}_t}{(1 - yc(s))^2} (-K_d (1 - yc(s)) \tan \tilde{\theta} - K_p y + c(s)(1 - yc(s)) \tan^2 \tilde{\theta}) + \frac{c(s) \cos \tilde{\theta}}{1 - yc(s)} \right] \right] \quad (2-17)$$

제 3 절 평가 방법

제 1 항 3D 트랙터 시뮬레이터를 활용한 경로 추종 알고리즘 타당성 분석

(1) 시뮬레이터 환경 구성

경로 생성 알고리즘의 효용성과 작업기 기준 조향 계산과 곡률 반영 경로 추종 알고리즘의 타당성을 분석하기 위하여 기존 연구(Han, 2017)를 기반으로 C++와 RoboticsLab (ver. 1.10, Simlab Co., Seoul., Korea) 으로 개발된 Figure 2-12 의 시뮬레이터를 활용하고자 하였다. 시뮬레이터는 서버 환경에서 전방(Cf) 및 후방 타이어(Cr)의 코너링 강성 계수에 의해 영향을 받는 전방 및 후방 휠에 작용하는 다양한 측면 힘을 고려하는 동적 차량 모델인 Extended Kinematics Bicycle Model 기반으로 차량의 슬립, 경사지, 불규칙한 노면에서의 움직임을 표현할 수 있으며, 이에 대한 위치 및 자세 정보를 경로 추종 프로그램에 피드백할 수 있다. 또한 농작업을 위한 작업기가 장착된 트랙터 모델이 경로생성 프로그램을 통해 생성된 경로와 경로 추종 프로그램이 시뮬레이션 환경에서 경로점(waypoint)에 따른 조향각, 속도 등의 정보를 시뮬레이터에 전달하여 시뮬레이션을 수행하고, 작업기의 작업 영역과 비작업 영역을 시각적으로 식별할 수 있도록 가상 트랙터에 부착된 작업기의 폭을 표시하는 그래픽 기능이 Figure 2-13 과 같이 사용되었다.

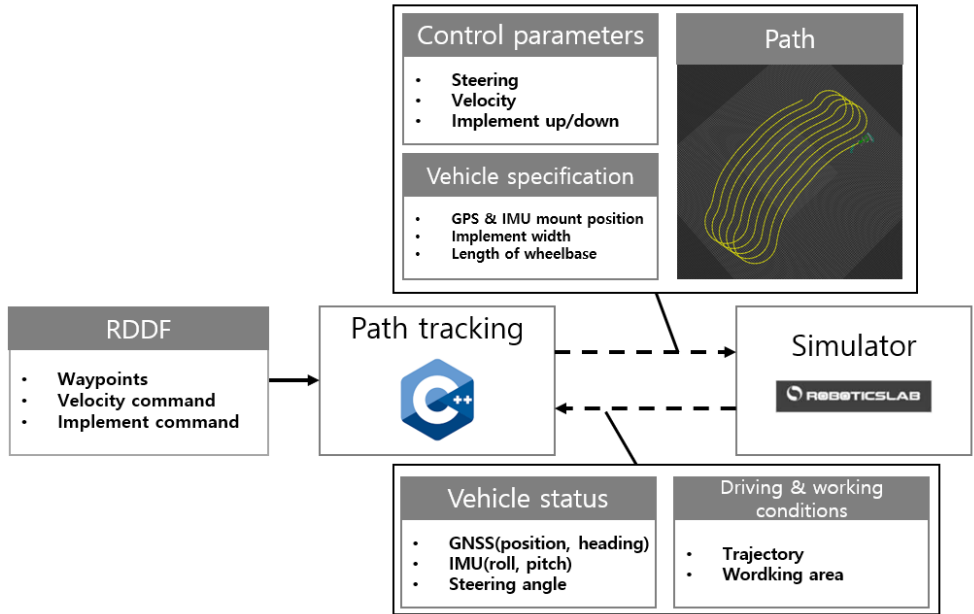


Figure 2–12. Architecture of the simulator consisting of a path planning and tracking client

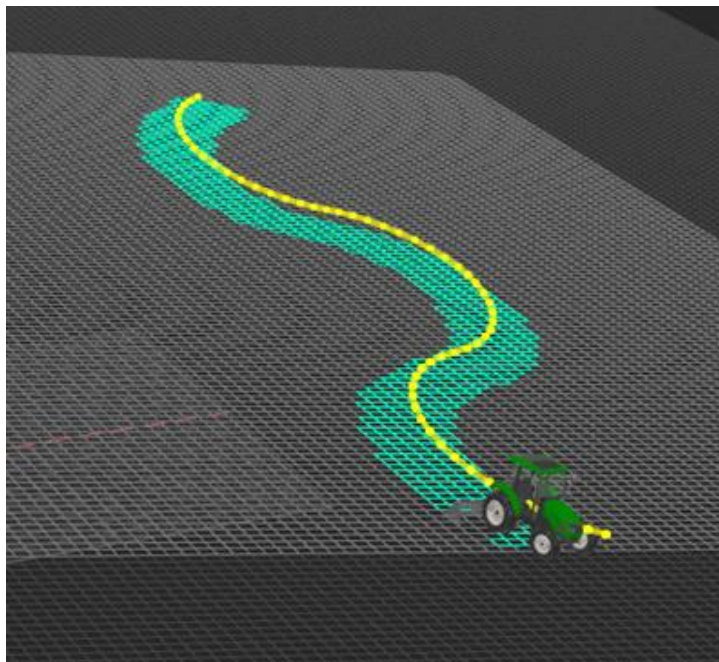


Figure 2–13. View of the 3D virtual tractor following the desired path

(2) 경로 추종 알고리즘 타당성 분석을 위한 시뮬레이터 테스트

본 연구에서 개발된 경로 추종 알고리즘의 타당성 분석을 위해서 현장 평가 전 시뮬레이터 기반으로 테스트를 진행하고자 하였다. 우선, 차량 중심 제어 경로 추종에서 작업기 기준 경로 추종 방식을 적용하고, 결과를 통해 정밀한 농작업을 위한 경로 추종 알고리즘 개발 시 작업기 기준으로 제어하는 것이 타당한지 확인하고자 하였다. 이후, 곡선 경로에서의 주행을 고려하여 작업 정확도를 증가할 수 있는 방법으로 경로 추종 알고리즘에 곡률을 적용하여 2 가지 형태의 곡선 주행의 결과를 통해 곡선 경로 주행 시 곡률 반영에 따른 트랙터의 움직임과 효과를 확인하고자 하였다. 시뮬레이터에서의 작업기 기준 경로 추종 알고리즘의 타당성 분석을 위해 사용된 경로는 Figure 2-14 와 같으며, 곡률 반영 경로 추종 알고리즘을 위해서는 Figure 2-15 와 같은 경로를 활용하였다.

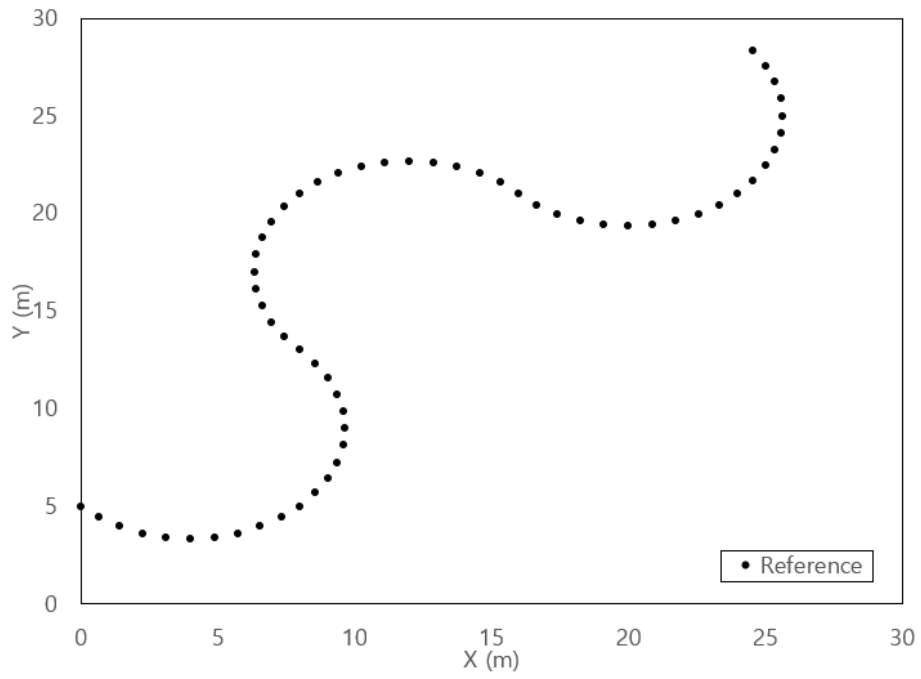
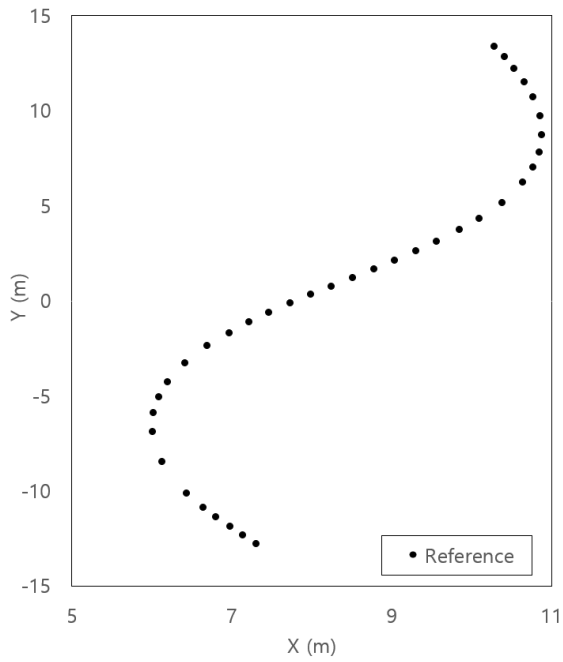
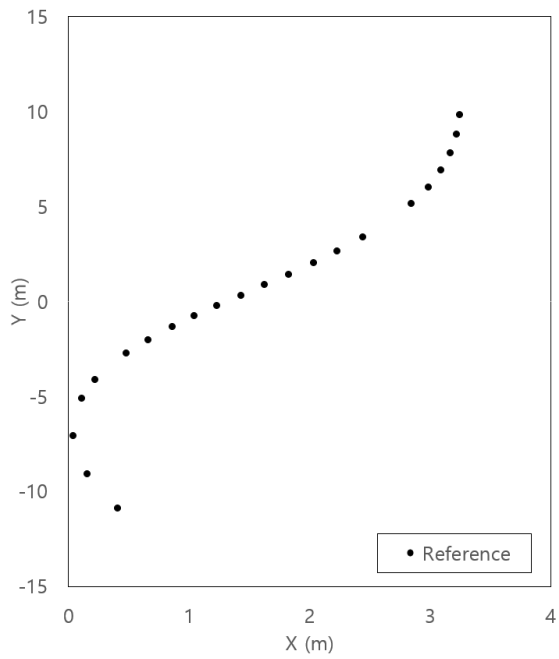


Figure 2-14. Reference path for implement based path-tracking in the simulator



(a)



(b)

Figure 2–15. Curved path with gradual curves (a) and steep curves (b) for simulator testing

제 2 항 현장 평가

(1-1) 현장 평가를 위한 자율주행 시스템 구성

본 연구를 위해 85 마력 트랙터 TX853 (TYM, Seoul, Korea) (Figure 2-16)을 활용하였으며, 제원은 Table 2-2 와 같다. 또한 자율주행 트랙터의 조향제어를 위한 조향각 센서 (Steer sensor, ComeSys, Korea)와 EPS (Electrical Power Steering) 시스템 (Unmanned Solution Co., Seoul, Korea)과 위치 및 자세정보 제공을 위한 GNSS/INS (Global Navigation Satellite System/Inertial Navigation System) 시스템 (Ellipse-D, SBG SYSTEMS., France)은 Jeon(2022)에서 구축된 자율주행 시스템을 활용하였다 (Table 2-4). 트랙터 상위 레벨 제어기는 Raspberry Pi4 (Raspberry pi., UK) (Figure 2-17, Table 2-3)를 활용하여 케이블 길이 40m 기준 최대 1Mbps의 고속 통신이 가능하고 하드웨어적으로 설정된 데이터만 선택적으로 수신 가능하기 때문에 높은 안정성을 보이며 실시간 통신이 가능한 CAN (Control Area Network) 통신 기반으로 20 Hz의 통신속도로 GNSS/INS를 통해 얻은 위치 정보 및 자세 정보를 통해 조향제어를 실시하였다. 농작업을 위한 농작업기는 폭 2.4m의 로터베이터 (YJ 215GM, YoungJin Machinery Co., Korea)를 활용하였다.

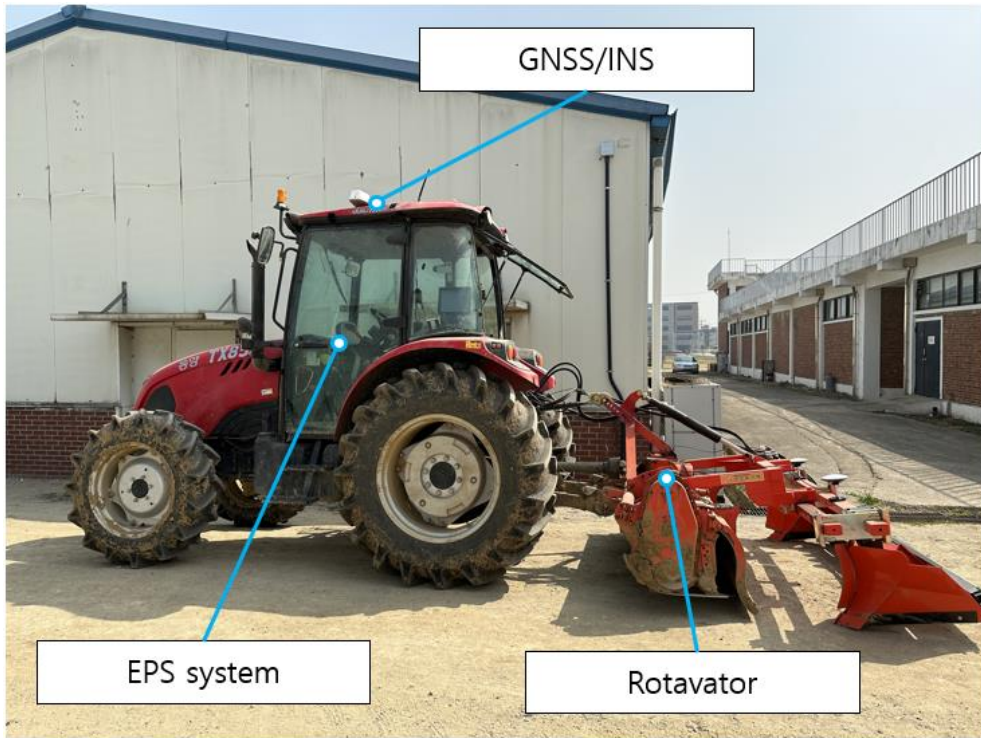


Figure 2–16. View of autonomous tractor (TX853, TYM)

Table 2–2. Specifications of the TX853 tractor used in this study

| Items | | Specifications |
|-------------------------|--------|--------------------|
| Model | | TX 853 |
| Type | | 4 CYL, Diesel |
| Length × Width × Height | mm | 3920 × 1940 × 2710 |
| Weight | kg | 3421 |
| Horsepower/rpm | ps/rpm | 85/2600 |
| Wheel base | mm | 2200 |
| Forward Speed | km/h | 32.44 |
| Engine capacity | cc | 3261 |

| | | |
|-----------|-----|--------------|
| PTO speed | rpm | 540/750/1000 |
|-----------|-----|--------------|



(a)



(b)

Figure 2–17. View of autonomous tractor inside (a), and Raspberry Pi 4 using for navigation controller PC (b)

Table 2–3. Specifications of the navigational controller

| Items | Specifications |
|-------------------|--|
| CPU | 1.5Ghz, Quad_core Broadcorn BCM2711B0 Cortex A-72 |
| RAM | 1GB/2GB/4GB DDR4 |
| GPU | 500MHz VideoCore VI |
| USB Ports | 2× USB 3.0 / 2× USB 2.0 |
| Wired Networking | Gigabit Ethernet |
| Wireless | 802.11ac (2.4 / 5GHz), Bluetooth 5.0 |
| Charging Port | USB Type-C |
| Power Requirement | 3A, 5V |
| Size | 3.5 × 2.3 × 0.76 inches |

Table 2–4. Components of autonomous tractor

| Autonomous Tractor | |
|--------------------------------|-----------------------|
| Base Model | TYM TX853 |
| Controller PC | Raspberry Pi 4 |
| GPS | SBG Systems Ellipse-D |
| Network-RTK Device | Synerex MRD-1000T |
| Angle Sensor | Comsys Steer Sensor |
| Electric Power Steering Device | Unmanned Solution EPS |
| Acceleration Valve Motor | Dynamixel MX-106R |
| Steering Type | Hydrostatic power |

(1-2) GNSS / INS 시스템

본 연구에서 사용된 GNSS/INS 센서(Figure 2-18(a)), SBG SYSTEMS 사의 Ellipse-D 센서와 안테나(Figure 2-18(b))를 트랙터 캐빈 위에 장착하여 구성하였으며, 상세 제원은 Table 2-5 와 같다. 국토정보지리원의 네트워크 RTK 서비스를 활용하여 NTRIP 을 통해 GNSS 위치 오차 보정신호를 Rover 로 받았으며, 이때 2 cm 이내 수준의 위치 정확도와 방향각을 최대 20 Hz 로 정보를 수신하였다.



(a)



(b)

Figure 2-18. (a) GNSS system used in this study and (b) GPS Antenna

Table 2-5. Specifications of the antenna and GNSS/INS

| Items | Specifications |
|----------------------|--------------------------------|
| 42G1215A-XT-1-2-CERT | Frequency: L1, L2 |
| | Performance: LNA Gain (dB) |
| | Tracking: L-Band, SBAS, QZSS |
| | Max. number of frequency: Dual |
| | Input voltate: 2.5 to 24 VDC |
| | Consumption: 35 mA |
| Ellipse-D | VSWR: <2.0:1 |
| | -Position & Heading accuracy |
| | RTK: 1cm + 1ppm |
| | Heading accuracy < 1.3 deg |
| | -Data rate |
| | Measurements: 20Hz |
| | Position: 20Hz |

(1-3) 조향 제어 모듈

자율주행 중인 트랙터의 방향을 위치하고자하는 경로로 수렴하기 위해서 모터가 포함된 조향 제어 모듈 전자 동력 조향 장치(EPS)를 사용하였다. 자세한 제원은 Table 2-6 과 같다.

Table 2-6. Specifications of the EPS module

| Items | Specifications |
|------------------|----------------|
| Power | 12V / 7A |
| Drive Torque | 2.5 Nm |
| Reducation Ratio | 1:15 |

| | |
|----------------------------|---------------------------------|
| Rotational Speed (No load) | 150 RPM |
| Weight | 3.05Kg |
| Operating Temperature | 20°C ~ 80°C |
| | Baud rate : 500kbps |
| | Analog Input 2 channel |
| Control Board | 0Vdc, 5Vdc Output DIO 2 channel |
| | RS232 1 channel |
| | CAN 1 Channel |

(2) 경로 추종 알고리즘 현장 검증

본 연구에서 개발한 곡선 경로 생성 기술과 작업기 기준 경로 추종 기술의 성능 평가와 현장 적용성을 검토하기 위해서 경기도 수원시의 서울대학교 수원농장의 논 포장에서 실험을 실시하였다. 시험 포장의 크기는 Figure 2-20 와 같이 길이 70 m, 폭 30 m 로 구성되었다. 개발한 곡선 경로 생성을 위해서 Figure 2-21 의 장변 상단과 하단을 중심으로 경로기준선을 주행을 통해 생성하고, 작업폭을 고려하여 추가적인 경로 생성을 실시하였으며, 생성된 왕복 곡선 작업 경로는 Figure 2-22 과 같다. 실험은 2.5 km/h 의 속도로 곡률을 고려한 경로 추종 알고리즘과 곡률을 고려하지 않은 알고리즘의 작업 경로에서의 기준 경로 대비 트랙터 위치 오차를 비교하기 위해서 측면 편차 및 방향각 오차에 대해 성능 비교를 실시하여, 곡선 경로 생성 기술과

곡률을 고려한 작업기 기준 경로 추종 기술에 대한 검증을 실시하였다. 평가 방법은 기준 경로 대비 트랙터의 위치의 평균 제곱근 오차(RMSE, Root Mean Square Error)를 Equation 2-18 을 통해 계산하였으며, 기준 경로 대비 트랙터 위치가 좌측에 위치하면 음수, 우측에 위치하면 양수로 구분하여 측면 편차를 계산하였다. 또한 기준 경로의 방향과 주행 중인 트랙터의 방향각에 정확성을 비교하기 위하여 오차를 Equation 2-19 를 활용하여 계산하였으며, 경로의 방향을 기준으로 트랙터의 좌측 방향이 음수, 우측 방향을 양수로 측정하였다.

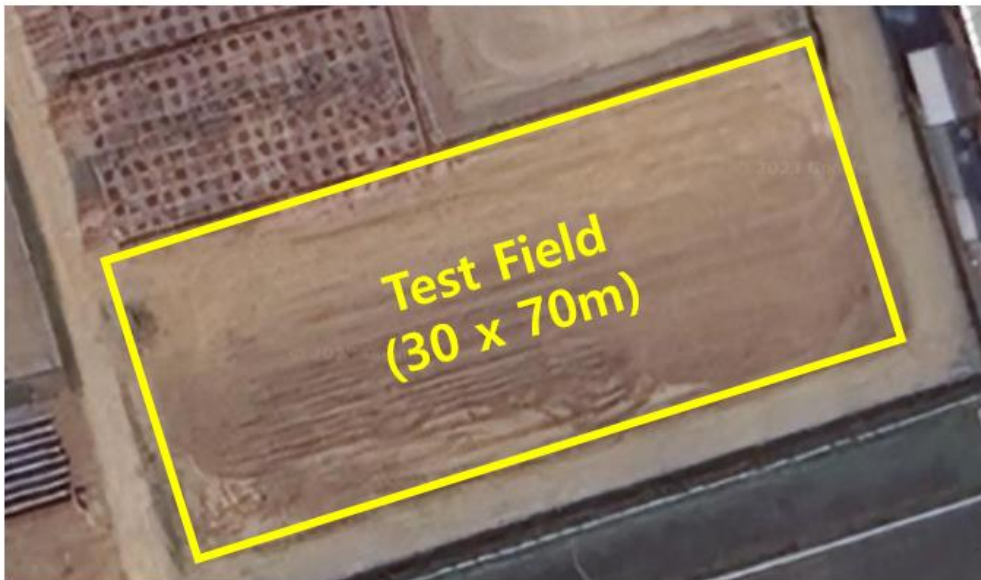


Figure 2-19. Test field for full path



Figure 2–20. Guidance lines for path generation by manual driving

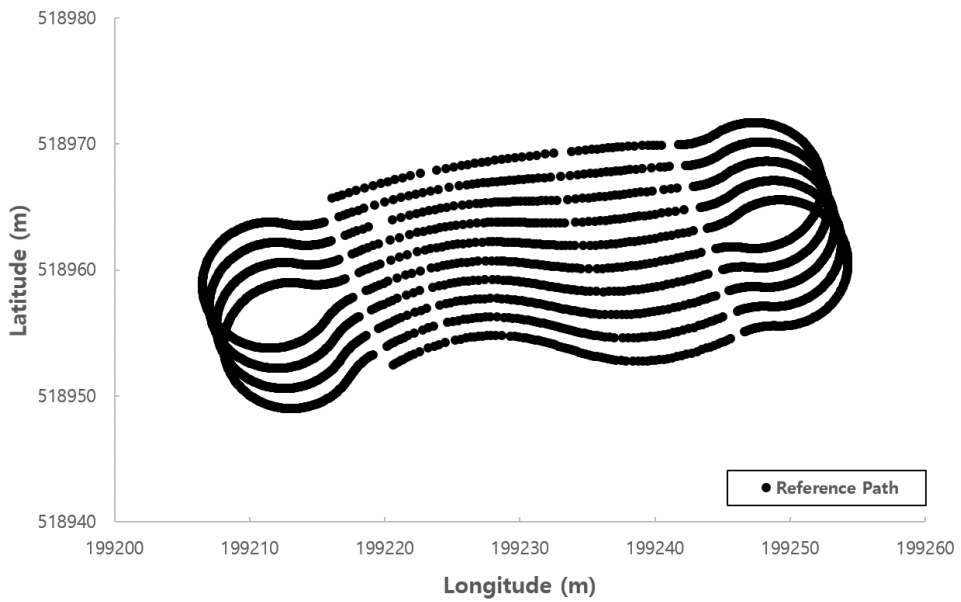


Figure 2–21. Inner–operating path for test

$$Lateral\ RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 1}} \quad (2-18)$$

여기서, y_i = 차량의 위치

\hat{y}_i = 기준 경로의 위치

n = 전체 표본 수

$$Heading\ RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \hat{\theta}_i)^2}{m - 1}} \quad (2-19)$$

여기서, θ_i = 차량의 방향각

$\hat{\theta}_i$ = 기준 경로의 방향각

n = 전체 표본 수

제 3 장 결과 및 고찰

제 1 절 경로 추종 알고리즘 비교 평가 및 요인 분석

본 연구에서 개발한 작업기 기준 경로 추종 알고리즘의 적용을 위하여 차량 중심의 경로 추종 알고리즘과 비교 평가하였다. 비교 평가를 위해서 시뮬레이터에서 작업기 기준 알고리즘에 대한 타당성을 분석하고, 이후 실제 농업 환경에서 검증을 진행하였다. 검증을 위한 장소는 서울대학교 수원 농장의 필드에서, 경로는 본 연구의 목표인 비정형 농지에서의 개발한 작업기 기준 경로 추종 기술의 적용을 위하여 Figure 3-1 과 같은 곡선 경로를 주행하며, 기준 경로 대비 작업기 위치의 측면 편차와 방향각 오차의 평균 제곱근 오차로 비교 평가를 실시하였다.

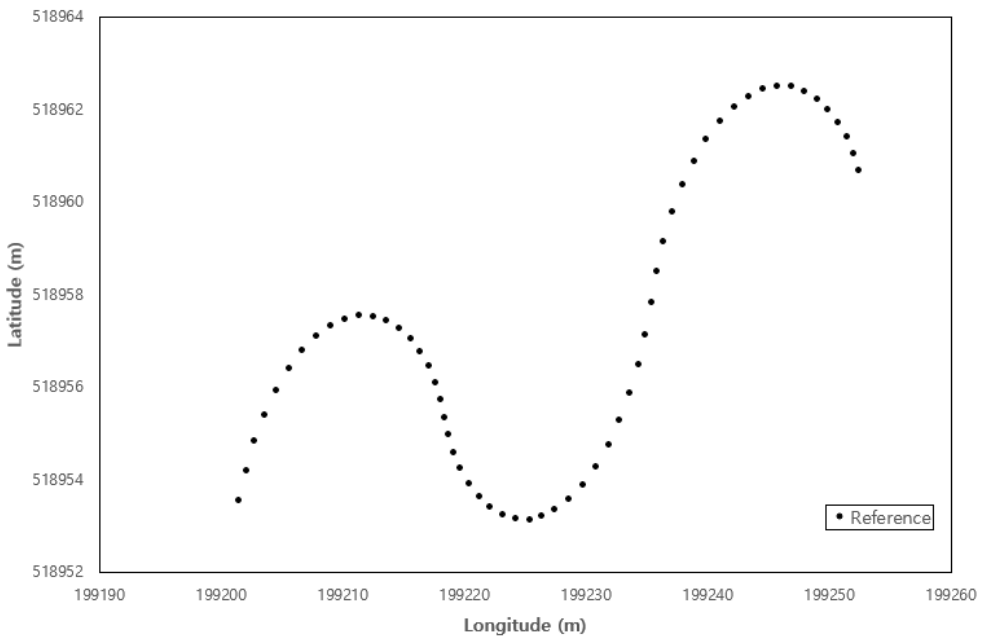
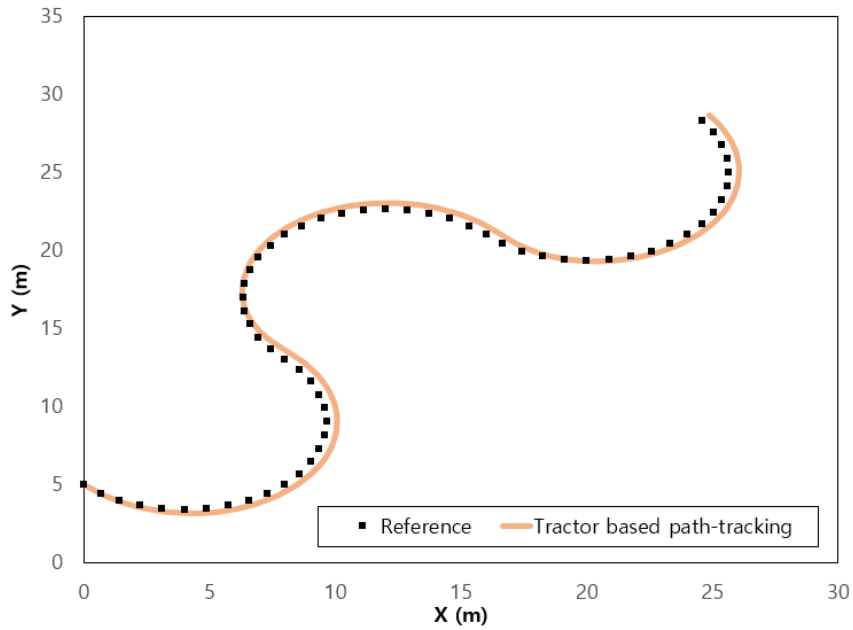
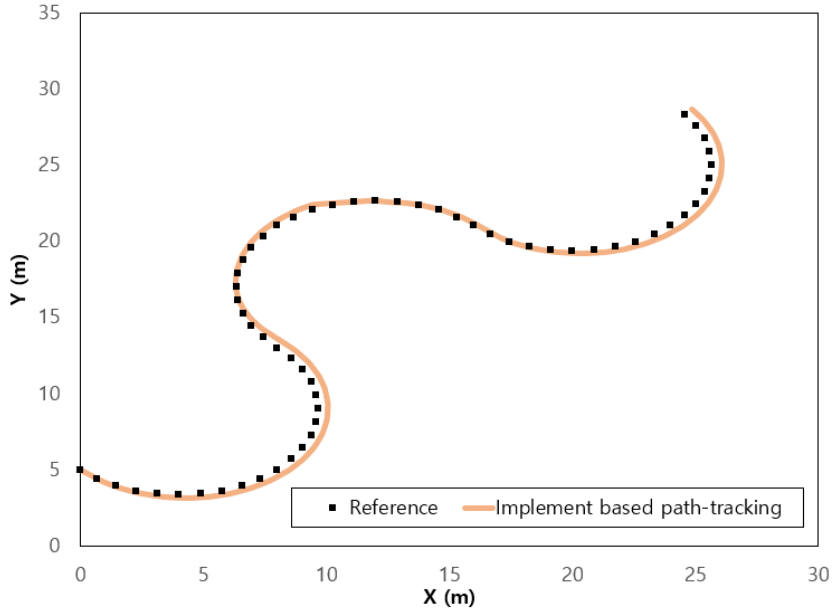


Figure 3-1. Path for path-tracking algorithm factor analysis

시뮬레이터에서의 주행 결과는 Figure 3-2 의 그래프를 통해서 큰 차이를 느낄 수 없지만, Table 3-1 을 통해서 작업기 기준 경로 추종 알고리즘의 작업기 위치의 기준 경로 대비 오차가 작게 나타났으며, 이를 통해 작업 정확도가 더 높았음을 확인할 수 있었다. 하지만 시뮬레이터는 실제 환경과는 다르게 농작업 환경 특성상 토양의 상태에 따라 많은 변수가 존재하지 않기 때문에 실제 농업환경에서 검증을 실시하였다. 비교 평가를 위해 주행은 총 3 회 반복 실험을 진행하였다. 결과는 Table 3-1 과 같았다.



(a)



(b)

Figure 3-2. Results of Tractor based path-tracking and Implement based path-tracking in the simulator

Table 3-1. Lateral deviation and heading error RMSE in the simulator

| RMSE | 차량 중심의 경로 추종 | 작업기 기준 경로 추종 |
|-----------------------|--------------|--------------|
| Lateral deviation (m) | 0.112 | 0.101 |
| Heading error (deg) | 3.4594 | 3.5184 |

차량 중심의 경로 추종 알고리즘의 경우, Figure 3-3 과 같이 곡선 경로의 변곡점 부근에서 작업기 위치의 오차가 크게 발생하는 것을 볼 수 있으며, 이때 최대 1m 의 오차를 보였다. 이는 차량의 중심이 목표 경로점에 도달하면 다음 목표 경로점을 위해 제어하고, 작업기 위치를 고려하지 않기 때문에 이와 같은 결과를 보이는 것으로 분석되었다.

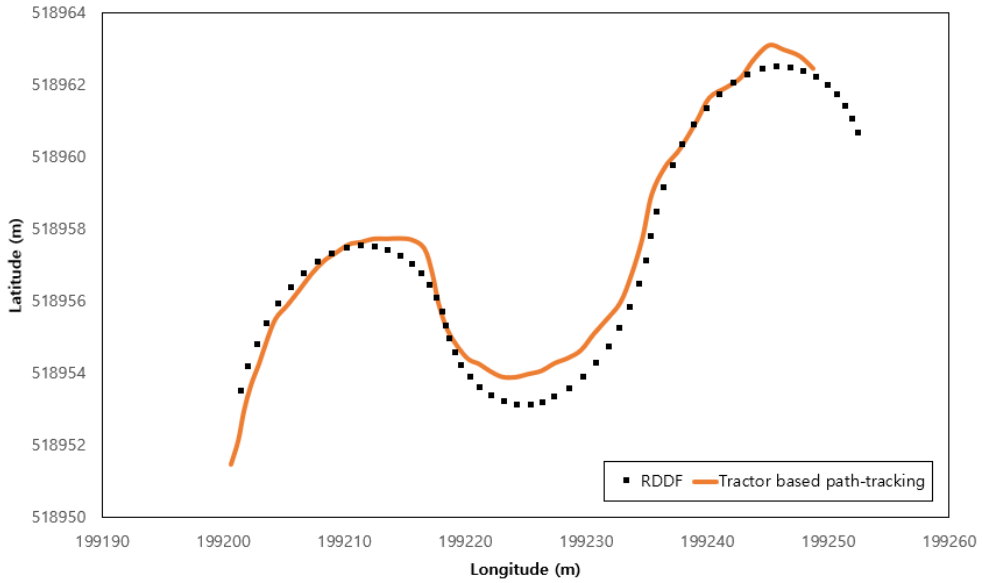


Figure 3-3. Tractor center based path-tracking' s implement trajectory

작업기 기준 경로 추종 기술의 경우, 작업기 위치가 목표 경로점에 도달할 때까지 다음 목표 경로점을 갱신하지 않기 때문에 차량 중심의 경로 추종 알고리즘과 비교하여 기준 경로 대비 작업기 위치의 오차가 Figure 3-4 과 같이 차량 중심의 경로 추종 알고리즘보다 작게 나타나고, 이에 따라 방향각 오차 또한 작게 나타는 것으로 분석되었다. 이를 통해, 차량 중심의 경로 추종 알고리즘 보다 작업기 기준 경로 추종 알고리즘이 나은 성능을 보이며, 현장에서의 효용성을 확인하였다.

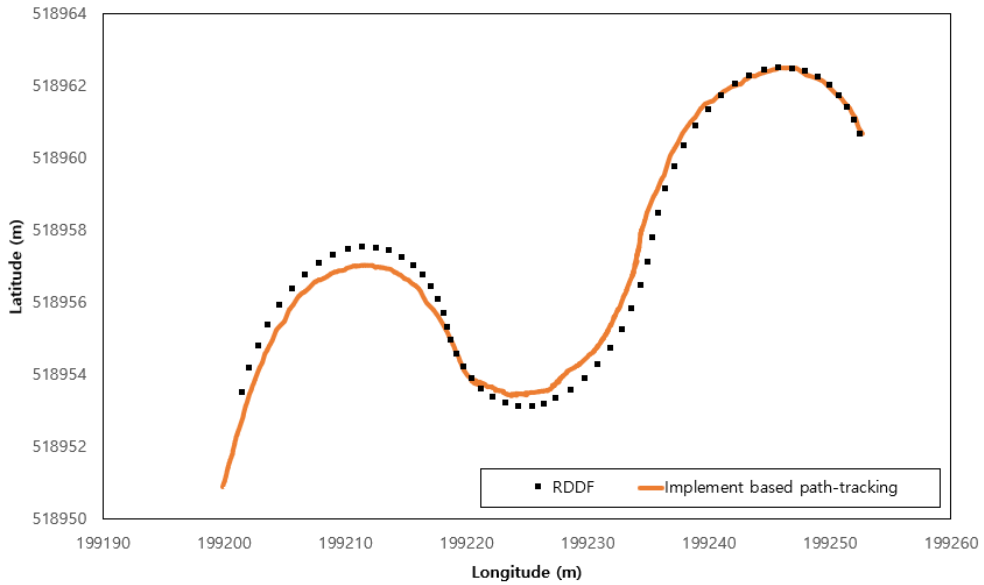


Figure 3-4. Implement center based path-tracking' s implement trajectory

제 2 절 시뮬레이션 테스트

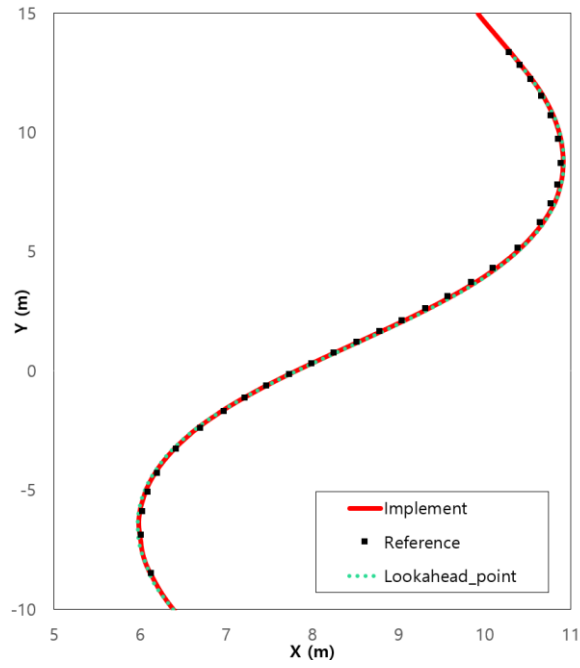
제 1 항 곡률 적용 경로 추종 알고리즘 시뮬레이션 테스트

본 연구에서는 곡선 경로를 대상으로 자율주행 중 작업을 진행하기 때문에 개발한 곡률 적용 경로 추종 알고리즘을 실제 트랙터에 적용하기 전에 곡률 특성의 반영 유무에 따라 경로 추종 경향성과 타당성을 분석하기 위해 시뮬레이터를 이용하여 주행 성능을 분석하였다. 또한, 발환경을 고려하여 시뮬레이터 환경에서 국내 발환경의 평균 경사도를 고려하여 경사 13 °의 환경을 구성하였고, 경로는 완만한 곡선과 급커브 형태를 띠는 2 가지 형태의 경로를 바탕으로 시뮬레이션 테스트를 진행하였다.

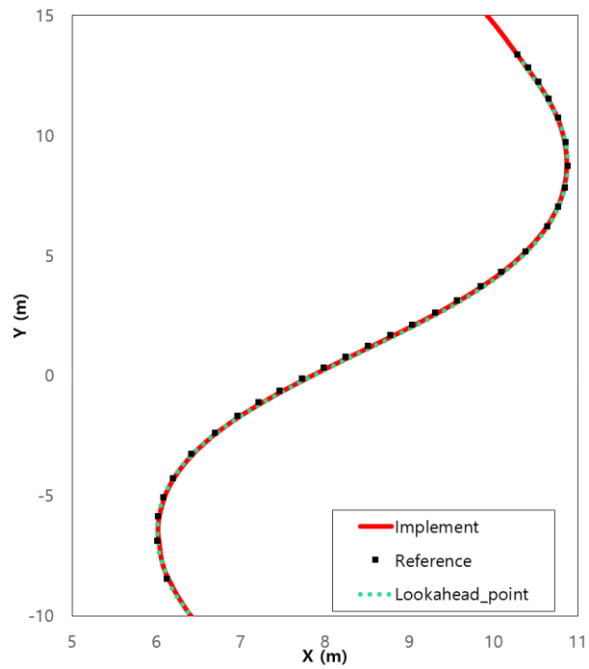
각 경로에 대해 곡률 적용 전, 후 경로 추종 알고리즘의 기준 경로 대비 방향각 오차 평균 제곱근 오차와 작업기 위치의 측면 편차에 대해 비교 평가를 실시하였다. Figure 3-5(a), 3-6(a)에서 곡률이 적용되지 않은 경로 추종 알고리즘의 결과와 곡률이 적용된 경로 추종 알고리즘의 주행 궤적 Figure 3-5(b), 3-6(b)과 비교해보면, 곡률이 적용된 경로 추종 알고리즘이 기준 곡선 경로의 안쪽 방향으로 주행하는 경향을 볼 수 있으며, 이에 반해 곡률이 적용되지 않은 경로 추종의 결과는 기준 곡선 경로 대비 바깥으로 주행하는 결과를 볼 수 있다. 이와 같은 곡률 적용 전, 후 경로 추종 알고리즘의 경향은 Table 3-2 을 통해 알 수 있듯이 곡률이 적용된 경로 추종 알고리즘의 경우, 기준 경로 대비 방향각 오차가 작고, 이로 인해서 작업기 측면 편차가 작아짐으로 인해서 나타는 결과로 판단된다.

Table 3-2. Heading error and implement lateral deviation RMSEs of without curvature and with curvature driving steep curve

| RMSE | Without curvature | With curvature |
|---------------------------------|-------------------|----------------|
| Heading error (deg) | 7.0779 | 5.0038 |
| Implement lateral deviation (m) | 0.1105 | 0.0829 |



(a)

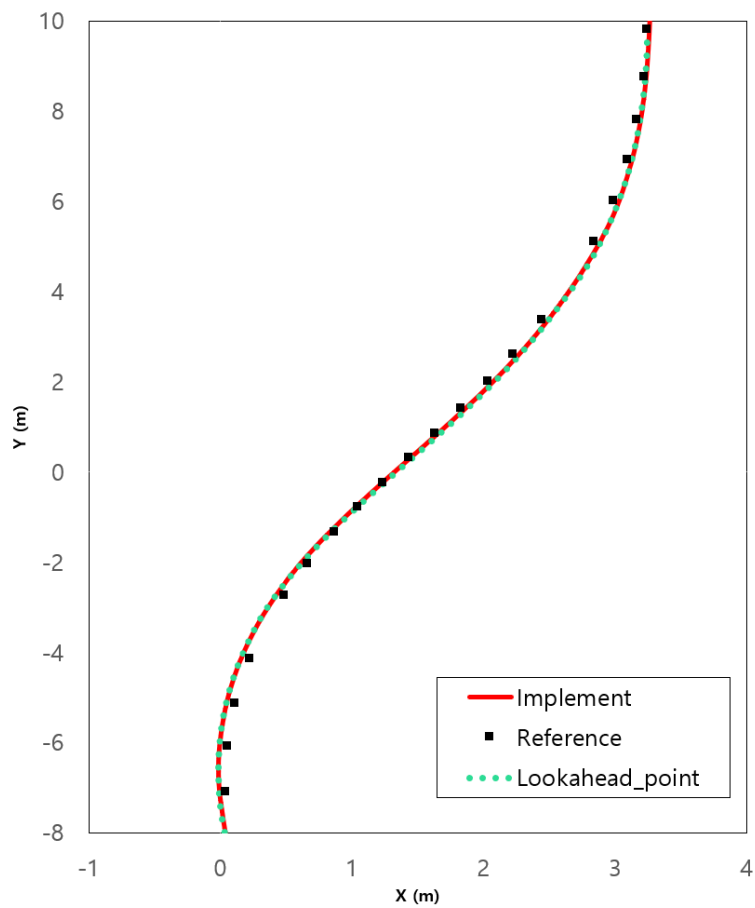


(b)

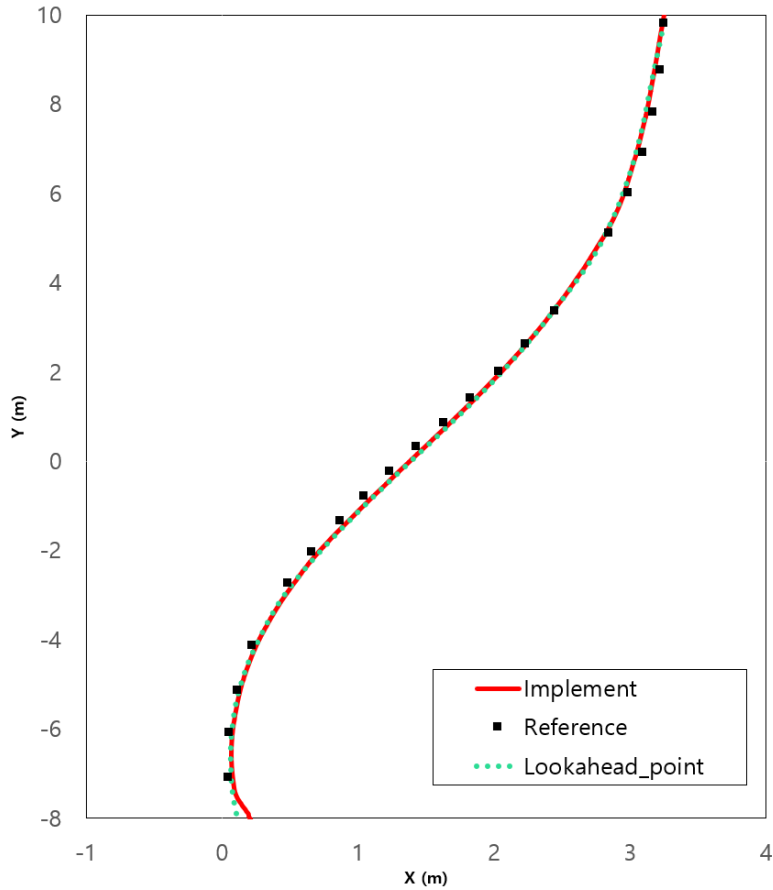
Figure 3–5. Sharp curve driving results of path-tracking without curvature applied (a) with curvature applied (b)

Table 3–3. Heading error and implement lateral deviation RMSEs of without curvature and with curvature driving gradual curve

| RMSE | Without curvature | With curvature |
|---------------------------------|-------------------|----------------|
| Heading error (deg) | 5.9540 | 2.9963 |
| Implement Latetal deviation (m) | 0.1052 | 0.0665 |



(a)



(b)

Figure 3-6. Gradual curve driving results of path-tracking without curvature applied (a) with curvature applied (b)

제 2 항 왕복 곡선 작업 경로 시뮬레이션 테스트

앞선 시뮬레이터 테스트에서는 두가지 형태의 1 열 경로에 대해 경로 추종 알고리즘에 곡률 적용 유무에 따른 경향성을 통해 곡선 경로 따라 주행할 때 곡률 특성을 반영한다면 방향각 오차가 작게 나타나고, 이에 따라 기준 경로 대비 측면 편차가 작게 나타났다. 이를 Figure 3.7 과

같이 시뮬레이터 환경에서 국내 밭의 평균 경사도 13° 를 구성하였다. 작업은 두둑 성형 작업을 고려하였으며, 두둑의 폭은 Figure 3-7의 최대 조건인 1.3 m 설정하여 곡선 작업 경로를 생성하였다. Figure 3.8과 같이 선회를 포함한 곡선 작업 경로에 적용하여 2, 4, 6 km/h의 속도로 주행하며, 곡률 적용 유무에 따른 작업의 정확도를 비교해보고자 하였다.

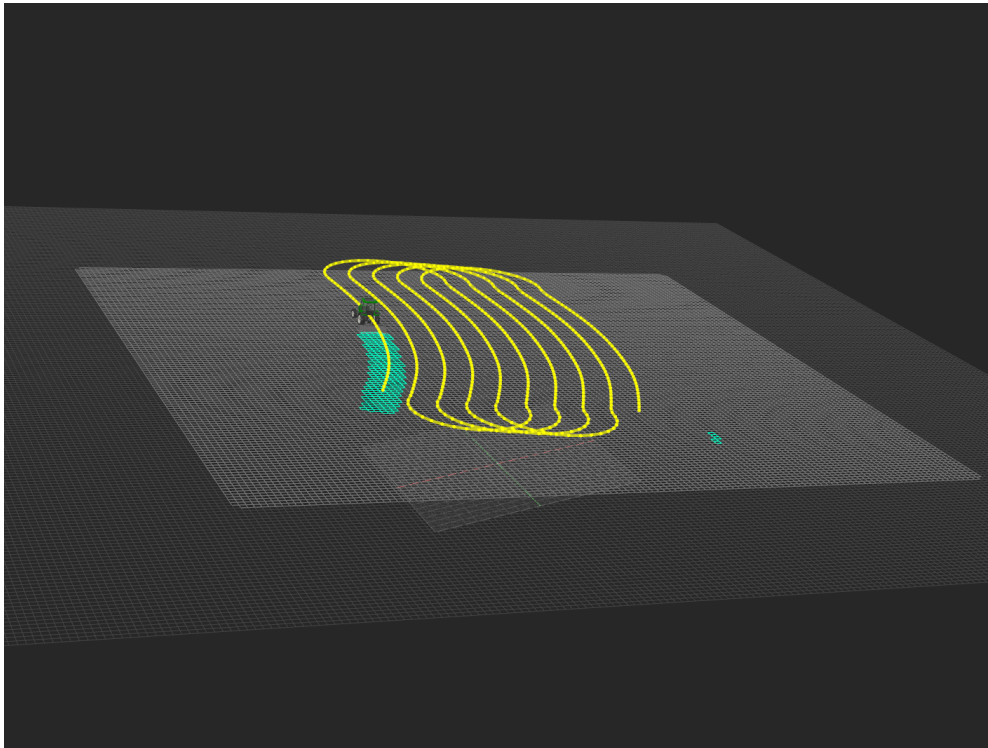


Figure 3-7. Simulator slope environment

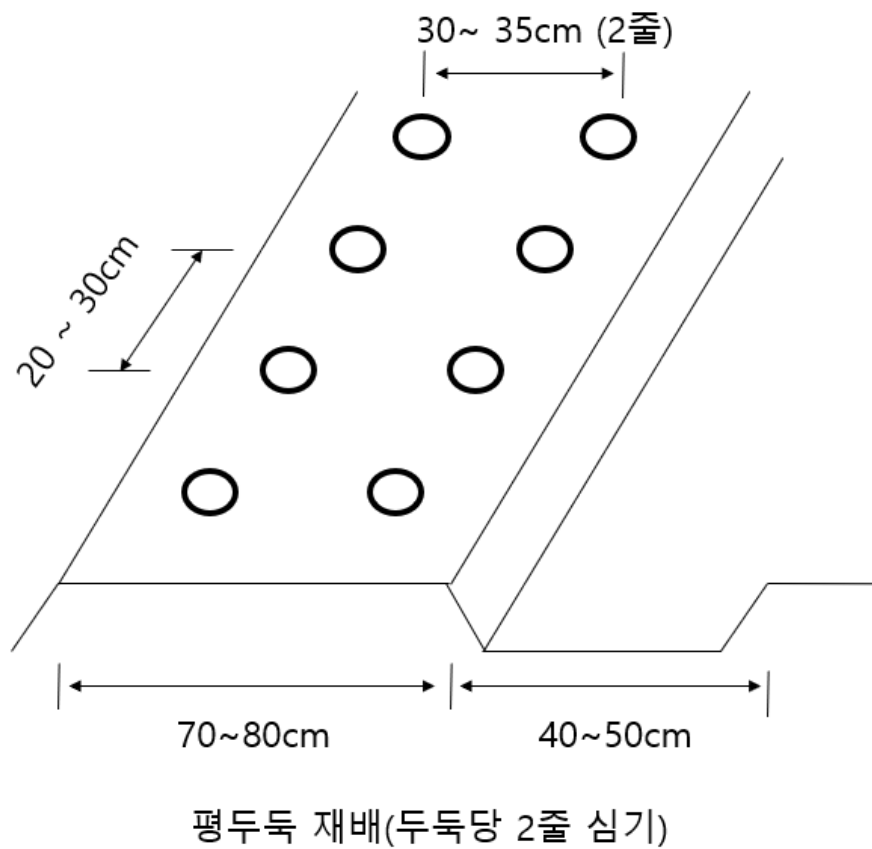


Figure 3-8. Conditions of ridge plowing applied to the this study

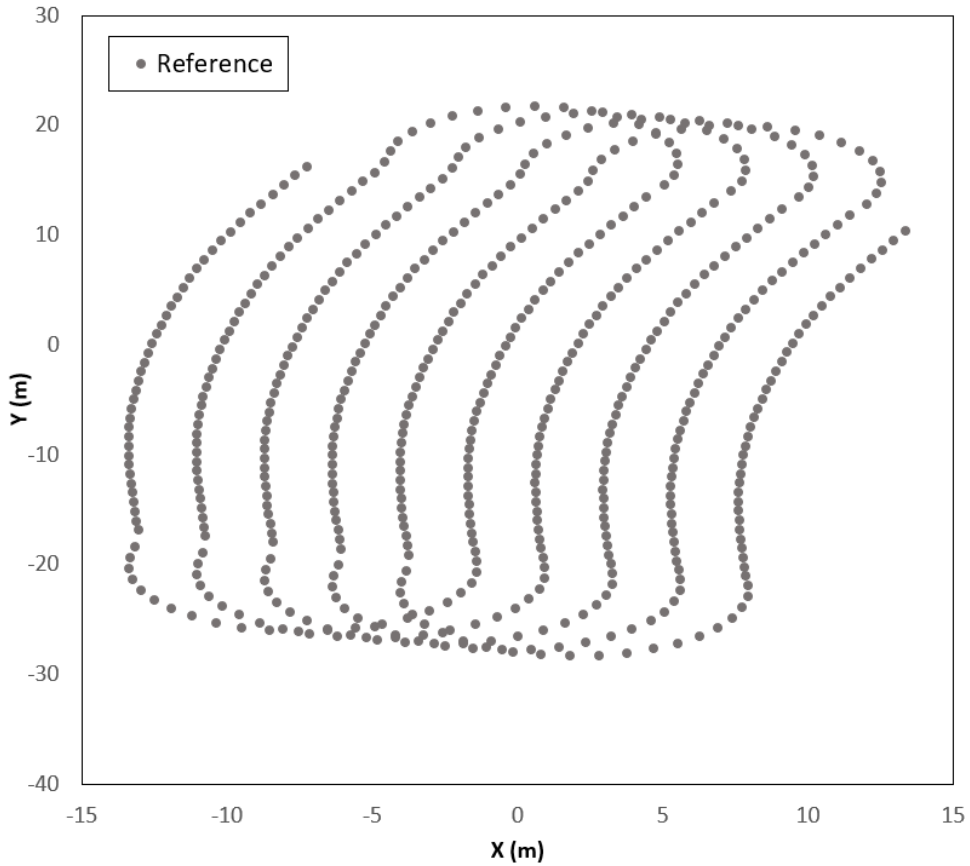


Figure 3-9. Inner-operating path for simulator test

속도 2 km/h 로 주행 시 작업 후 구간 진입 시 최대 5.6 cm 의 오차를 보이며, 전체 곡선 작업 경로에 대해서는 RMSE 3.92 cm 의 오차를 보였다. 속도 4 km/h 로 주행 시, 곡선 경로에서 곡률이 가장 커지는 구간에서의 오차가 최대 6.8 cm 의 오차를 보이며, 전체 곡선 작업 경로에 대해서는 RMSE 4.45 cm 의 차이를 보였다. 본 연구의 시뮬레이터 테스트 중 가장 빠른 속도로 주행한 6 km/h 의 속도로 주행 시 곡률 적용 전 최대 15.2 cm 의 오차를 보이며, 곡률 적용 후 최대 9.02 cm 의 오차를 보였다. 전체 작업 경로에 대한 기준 경로 대비 작업기 위치의 RMSE 차이는 5.01 cm 의 차이를 보였으며, 방향각

오차는 곡률 적용 전 9.55 °, 곡률 적용 후 2.67 ° 로 서로 다른 속도 조건 중 가장 큰 차이를 보였다. Tables 3-4, 3-5, 그리고 3-6 과 같이 곡률을 적용하였을 때의 기준 경로 대비 오차가 작게 나타나는 것으로 보아, 작업의 정확도가 높은 것으로 보였으며, 속도가 높을수록 곡률 적용 여부에 따른 작업의 정확도 차이는 커지는 것으로 확인하였으며, 높은 속도의 농작업 시에도 적용 가능성을 확인하였다. 이러한 결과를 통해 두둑 형성 작업의 허용 오차 범위(5~10 cm)에 만족하는 결과를 보였으며, 경사가 존재하는 밭에서 곡선 경로를 주행하며 두둑 형성 작업의 현장 적용성에 대한 가능성을 보였다.

Table 3-4. Heading error, implement lateral deviation and lateral deviation of round operating RMSEs of without curvature and with curvature tracking inner-operating (2km/h)

| RMSE | Without curvature | With curvature |
|---------------------------------|-------------------|----------------|
| Heading error (deg) | 3.9216 | 3.0808 |
| Implement lateral deviation (m) | 0.1048 | 0.0656 |

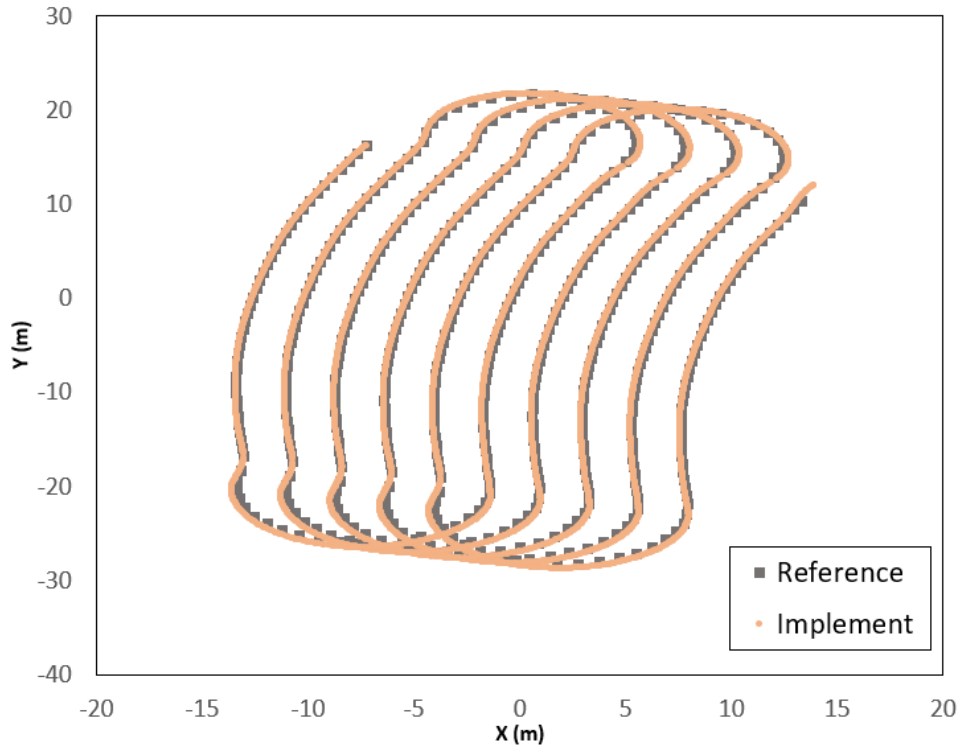


Figure 3-10. Inner-operating path driving result of path-tracking without applying curvature (2km/h)

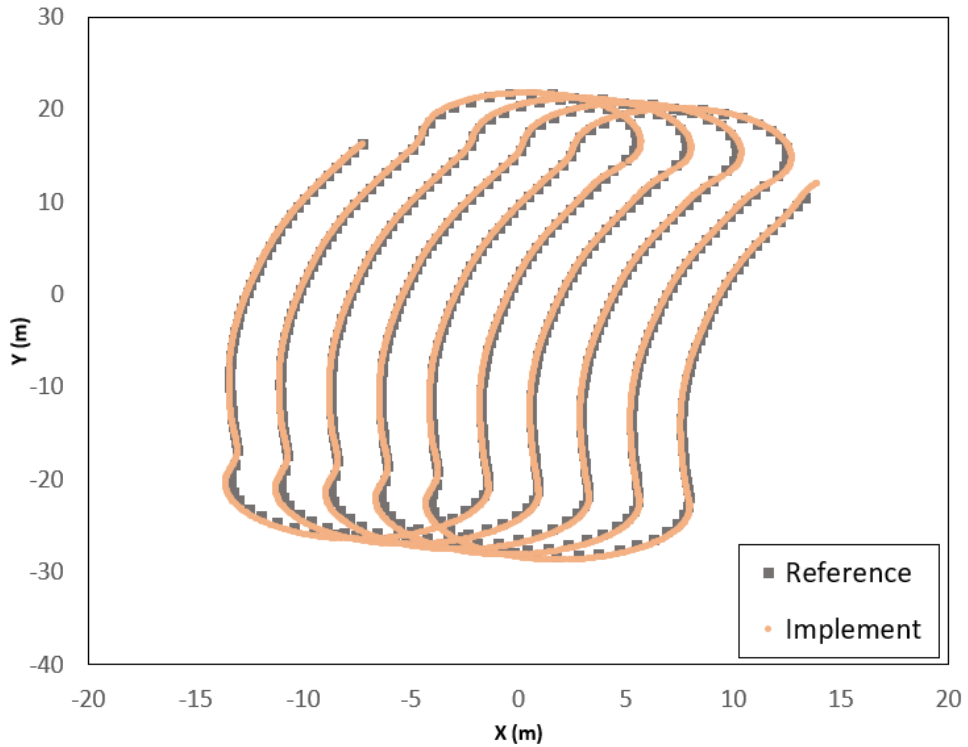


Figure 3-11. Inner-operating path driving result of path-tracking without applying curvature (2km/h)

Table 3-5. Heading error, implement lateral deviation and lateral deviation of round operating RMSEs of without curvature and with curvature tracking inner-operating (4km/h)

| RMSE | Without curvature | With curvature |
|---------------------------------|-------------------|----------------|
| Heading error (deg) | 3.4141 | 2.7246 |
| Implement lateral deviation (m) | 0.1162 | 0.0717 |

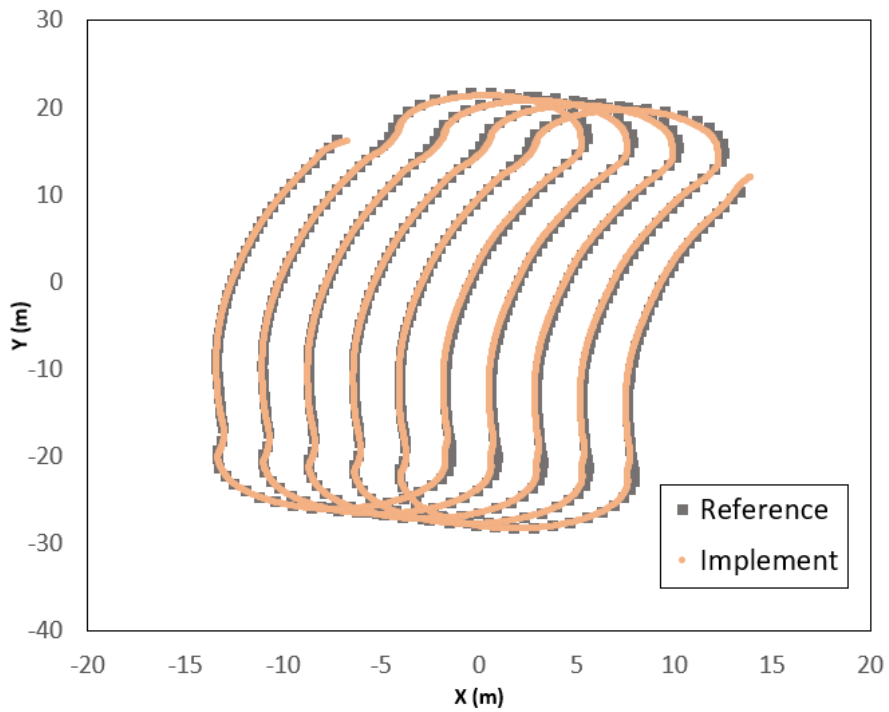


Figure 3–12. Inner–operating path driving result of path–tracking without applying curvature (4km/h)

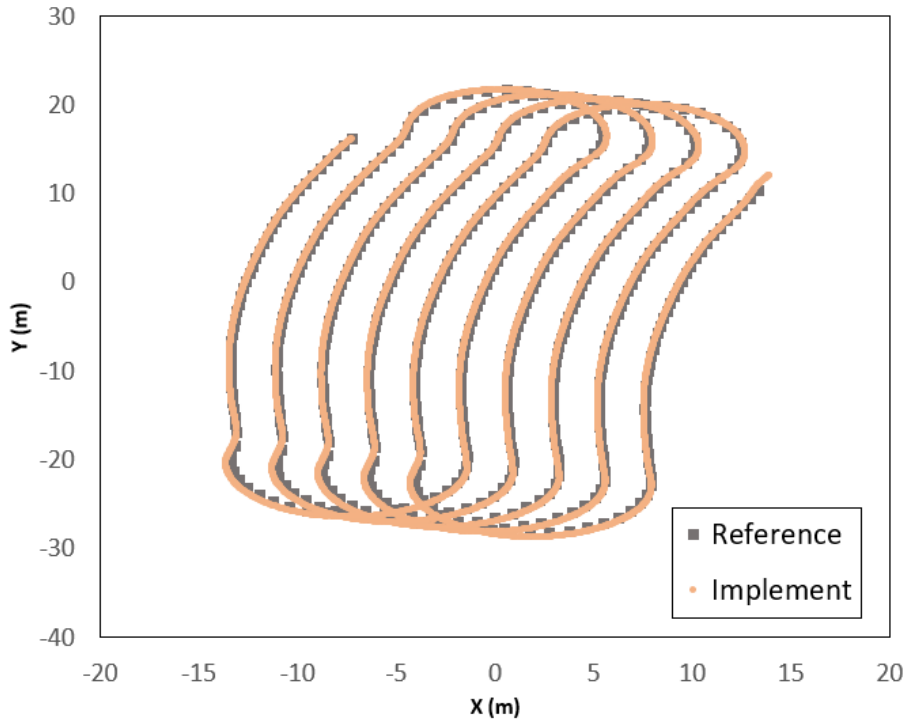


Figure 3–13. Inner–operating path driving result of path–tracking without applying curvature (4km/h)

Table 3–6. Heading error, implement lateral deviation and lateral deviation of round operating RMSEs of without curvature and with curvature tracking inner–operating (6km/h)

| RMSE | Without curvature | With curvature |
|---------------------------------|-------------------|----------------|
| Heading error (deg) | 9.5517 | 2.6653 |
| Implement lateral deviation (m) | 0.1306 | 0.0805 |

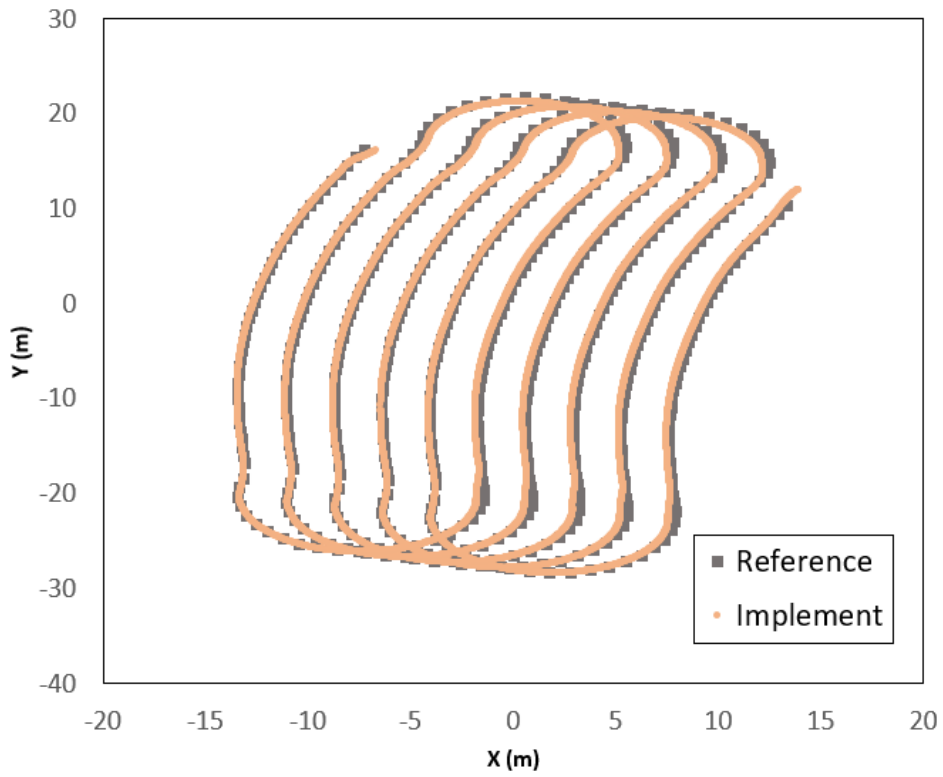


Figure 3-14. Inner-operating path driving result of path-tracking without applying curvature (6km/h)

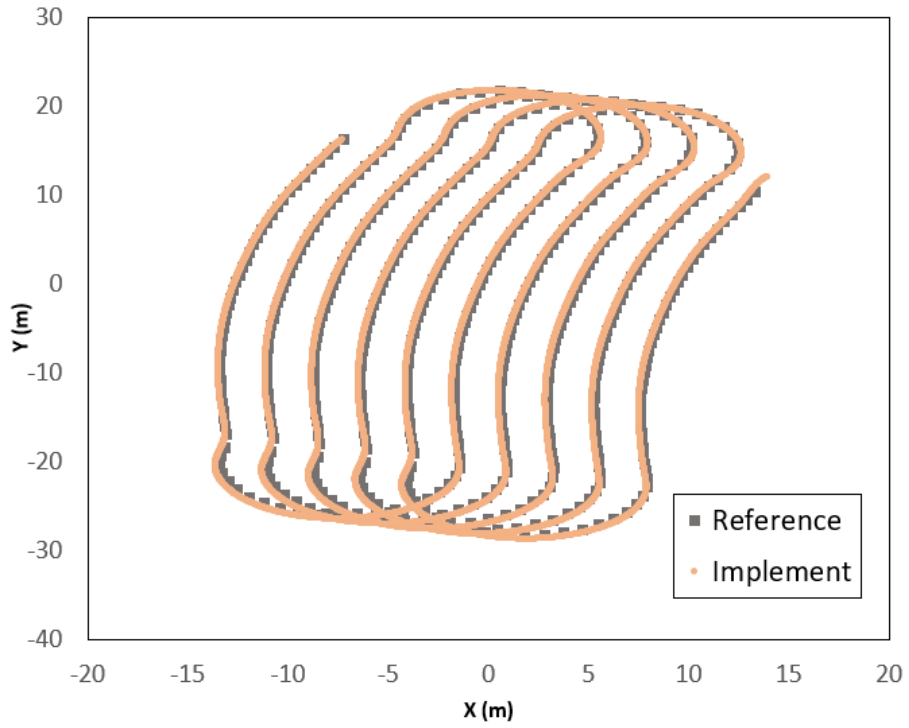


Figure 3-15. Inner-operating path driving result of path-tracking with applying curvature (6km/h)

제 3 절 곡선 경로 생성 및 경로 추종 기술 검증 및 성능 현장 평가

제 1 항 왕복 곡선 작업 경로에서의 현장 평가

개발한 경로 생성 및 경로 추종 기술을 검증하기 위해서 왕복 곡선 작업 경로를 생성하고 이를 기반으로 2.5 km/h 의 속도로 주행하며, 경로 추종 기술의 현장 적용을 확인하고 평가하고자 하였다. 왕복 곡선 작업 경로 생성을 위해서 기준이 되는 경로를 직접 주행을 통해 생성하고, 작업폭을 고려하여 추가적인 곡선 경로와 선회 경로를 Figure 3-13 과 같아 다양한 형태의 곡선을 포함하는 10 열의 경로를 생성하였다.

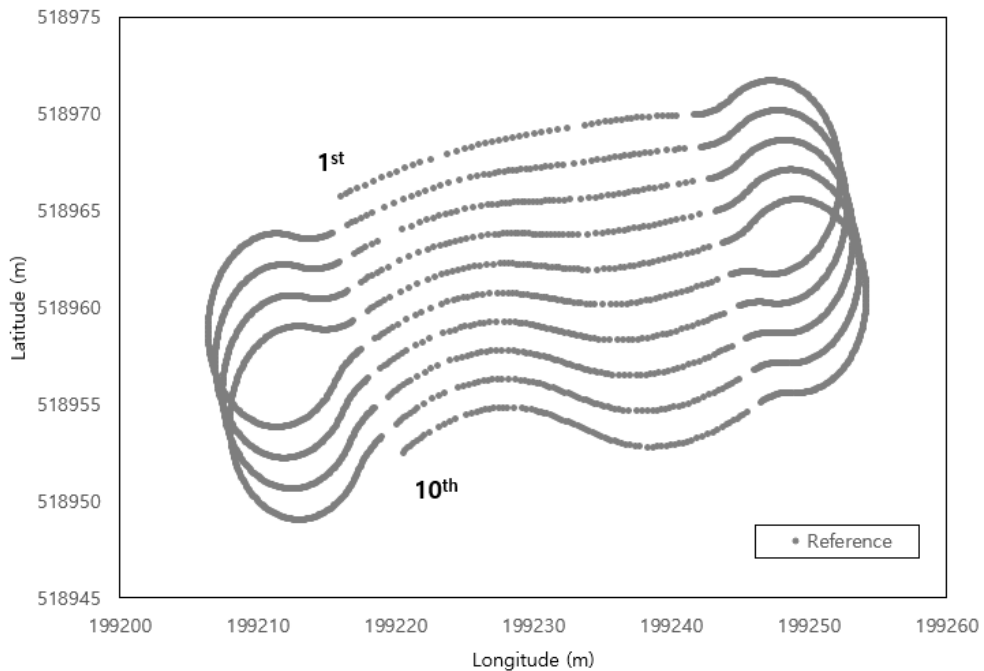


Figure 3-16. Inner-operating path for validation the path-tracking algorithm

경로 생성은 서울대학교 수원농장의 30 × 70 m 크기의 필드에서 진행되었으며, 자율주행 트랙터의 경로 추종을 위해 적용된 전방 주시 거리, K_p , K_d 값은 이전 연구 Han (2017)과 동일한 조건으로 진행되었다. 평가는 앞선 시뮬레이터 왕복 곡선 작업 경로 실험과 동일하게 각각의 작업 경로에 대해 곡률 적용 유무에 따라 곡률 평균에 대한 기준 경로 대비 작업기의 평균 제곱근 오차를 비교하고 전체 작업 경로의 평균 제곱근 오차를 통해 평가하고자 하였다(Figure 3-14). 결과는 Table 3-8 과 모든 작업 경로에서 나은 추종 성능을 보였고, 특히 7 번째 열에서 최대 20 cm 이상의 오차를 보였다. 이는 해당 열에서 Figure 3-15 과 같이 기준 경로와의 방향각 오차가 크게 발생하게 되고, 이에 따라 측면 편차가 커지기 때문에 이와 같은 결과를 보이는 것으로 판단된다 (Figure 3-16). 또한 경로 추종 알고리즘에 곡률 적용 여부에 따라 방향각 오차 계산에 차이가 나게 되는데, 이와 같은 결과는 나타내는 원인 중 하나로 분석되었다. 본 연구에서는 다루지 않지만 농업 환경에서의 작업은 토양의 상태에 따라 작업 효율에 크게 영향을 미치게 되는데, 7 번째 열 또는 6 번째 선회 구간과 같이 오차가 크게 발생하는 이유는 실험 당시 우천으로 인해 토양의 함수율이 높은 상태였으며, 이러한 환경으로부터 발생하는 동적 요인도 작업 효율에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

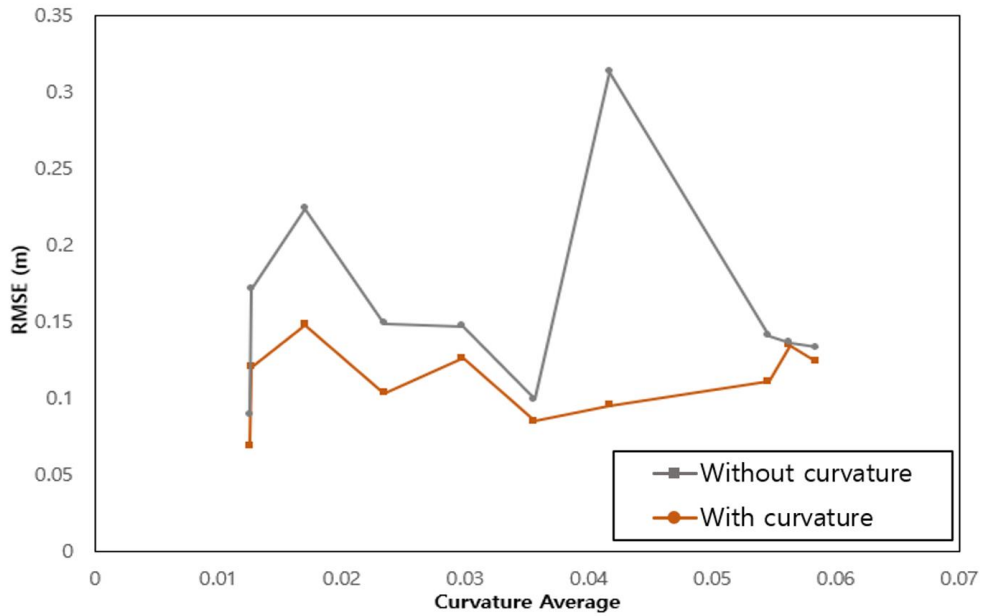


Figure 3–17. Agricultural operating machine position RMSE for curvature of each line for line 1 to line 10

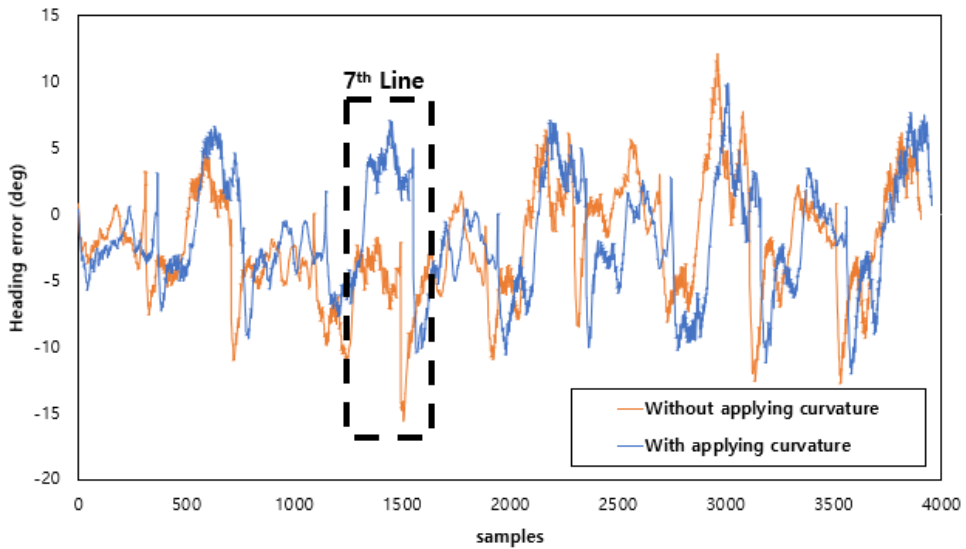


Figure 3–18. Heading error in the 7th line when driving the round operating

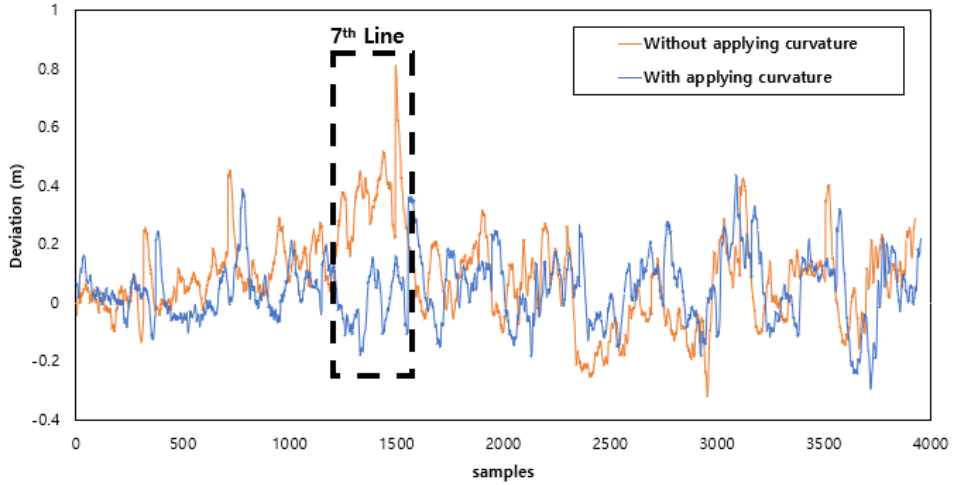


Figure 3–19. Implement lateral deviation in 7th line when driving the round operating

선회를 포함한 전역 경로에 대한 결과는 Table 3–8 의 3 열과 같으며, 작업 구간에 대한 방향각 오차와 작업기 위치 오차는 Table 3–8 의 1, 2 열과 같다. 곡률 적용 전 경로 추종 알고리즘의 경우, 27 cm 의 오차를 보였지만 곡률이 적용된 경로 추종 알고리즘의 경우 16.5 cm 오차를 보이며 10 cm 이상의 성능 차이가 확인되었다. 또한 전역 곡선 경로 추종 결과 Figures 3–17 와 3–18 를 통해 선회 후 작업 경로 진입 구간과 선회 진입 구간에서 곡률이 적용된 경로 추종 알고리즘이 적용되지 않은 알고리즘보다 안정적으로 추종하는 것으로 분석되었다.

Table 3–7. Heading error, implement lateral deviation and lateral deviation of full path RMSEs of without curvature and with curvature tracking full path in field

| RMSE | Without curvature | With curvature |
|------------------------------------|-------------------|----------------|
| Heading error (deg) | 5.6126 | 5.3597 |
| Implement lateral deviation (m) | 0.1719 | 0.1139 |
| Lateral deviation of full path (m) | 0.2712 | 0.1655 |

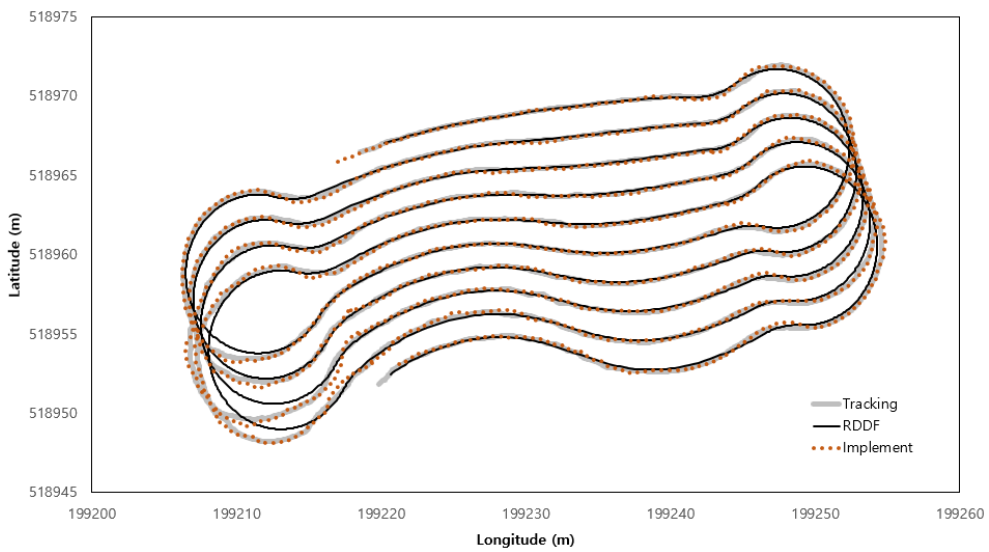


Figure 3–20. Round operating path driving result of path-tracking without applying curvature

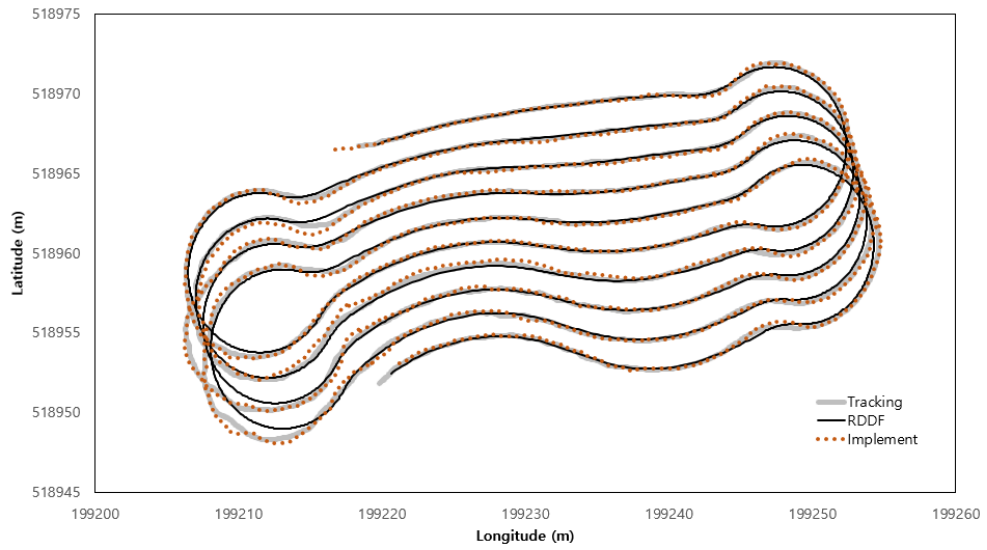


Figure 3–21. Round operating path driving result of path-tracking with applying curvature

제 4 장 결론

본 논문에서는 기존의 연구되었던 자율주행 트랙터의 밭 환경 적용을 위해서 곡선 경로 생성 기술을 개발하고, 생성된 곡선 경로에서 정밀한 주행을 위해 경로의 곡률을 고려한 작업기 기준 경로 추종 알고리즘을 개발하였다. 밭은 대부분 산지에 위치하고 있기 때문에 등고선을 기준으로 작업열을 생성하며, 다양한 형태의 곡선으로 이루어져있기 때문에 농지 경계 또는 작업열을 따라 주행하며 왕복 곡선 작업 경로 생성을 위한 기준 경로를 생성하여, 작업폭과 농지의 최대 폭을 고려하여 전역 경로를 위한 추가적인 경로와 선회 경로를 생성하였다. 또한 많은 연구에서 진행된, 차량 중심의 경로 추종 방식에서 정밀한 농작업을 위해서 현장에서 곡선 경로 주행을 통해 차량 중심의 경로 추종 시 작업기의 움직임 분석하였고, 작업기 기준 경로 추종 알고리즘을 개발하여 경로 추종 성능을 향상시키고자 하였다. 곡선 경로는 직진 및 선회로 이루어진 작업 경로와는 다르게 더 안정적인 주행 성능을 필요로 한다. 이에 따라, 개발한 작업기 기준 경로 추종 알고리즘에 곡률 특성을 반영하였다. 개발된 알고리즘은 시뮬레이터 환경에서의 적용을 통해 서로 다른 속도 조건으로 주행하며, 곡률 적용 여부에 따른 작업의 정확도를 분석하였다. 이후, 현장에서의 검증하였고, 실제 농업 환경의 적용성을 평가하기 위하여 필드에서 생성된 왕복 곡선 작업 경로를 바탕으로 자율주행하며 곡선 경로 주행 시 곡률 적용 여부에 따라 추종 성능이 작업 구간 기준으로 오차가 33.7% 감소하였고, 최대 27 cm 가 감소하여 작업 효율과 추종 성능이 향상되었음을 확인할 수 있다.

본 연구에서 개발된 경로 생성 알고리즘과 경로 추종 알고리즘은 주행 경로 기반으로 왕복 곡선 작업 경로를 생성하였지만, 추후 연구에서는 트랙터의 최소 회전 반경 또는 최대 조향각을 고려하여 생성된 곡선 경로를 보정하고, 차량의 실시간 위치와 경로의 위치를 통해 기준 경로와의 곡률을 계산하고 경로 추종 방식에 적용할 수 있는 정밀한 자율주행 기술이 적용된다면 자율주행 트랙터의 적용성은 더욱 확대되고 기술 고도화하는 데에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. Backman, J., P. Piirainen, and T. Oksanen, *Smooth turning path generation for agricultural vehicles in headlands*. Biosystems Engineering, 2015. 139: p. 76–86.
2. Bochtis, D. and C.G. Sørensen, *The vehicle routing problem in field logistics part I*. Biosystems engineering, 2009. 104(4): p. 447–457.
3. Fang, H., Dou, L., Chen, J., Lenain, R., Thuilot, B., & Martinet, P. (2011). Robust anti-sliding control of autonomous vehicles in presence of lateral disturbances. Control Engineering Practice, 19(5), 468–478.
4. Guo, L. S., Zhang, Q., & Han, S. (2002). Position estimate of off-road vehicles using a low-cost GPS and IMU. In 2002 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
5. Hameed, I.A., D. Bochtis, and C. Sorensen, *Driving angle and track sequence optimization for operational path planning using genetic algorithms*. Applied Engineering in Agriculture, 2011. 27(6): p. 1077–1086.

6. Hameed, I.A., D. Bochtis, and C.A. Sørensen, *An optimized field coverage planning approach for navigation of agricultural robots in fields involving obstacle areas*. International journal of advanced robotic systems, 2013. 10(5): p. 231.

7. Hameed, I.A., A. la Cour-Harbo, and O.L. Osen, *Side-to-side 3D coverage path planning approach for agricultural robots to minimize skip/overlap areas between swaths*. Robotics and Autonomous Systems, 2016. 76: p. 36–45.

8. Han, X. Z., Kim, H. J., Moon, H. C., Woo, H. J., Kim, J. H., & Kim, Y. J. (2013). Development of a path generation and tracking algorithm for a Korean auto-guidance tillage tractor. Journal of Biosystems Engineering, 38(1), 1–8.

9. Han, X. Z., Kim, H. J., Kim, J. Y., Yi, S. Y., Moon, H. C., Kim, J. H., & Kim, Y. J. (2015). Path-tracking simulation and field tests for an auto-guidance tillage tractor for a paddy field. Computers and Electronics in Agriculture, 112, 161–171.

10. Han, X., Kim, H. J., Jeon, C. W., Moon, H. C., Kim, J. H., & Yi, S. Y. (2019). Application of a 3D tractor-driving simulator for slip estimation-based path-tracking control of auto-guided tillage operation. Biosystems engineering, 178, 70–85.

11. Hao, F., Lenain, R., Thuilot, B., & Martinet, P. (2005). Robust adaptive control of automatic guidance of farm vehicles in the presence of sliding. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 3113–3118).
12. Lenain, R., Thuilot, B., Cariou, C., & Martinet, P. (2006). High accuracy path tracking for vehicles in presence of sliding: Application to farm vehicle automatic guidance for agricultural tasks. *Autonomous robots*, 21(1), 79–97.
13. Lenain, R., Thuilot, B., Cariou, C., & Martinet, P. (2007). Adaptive and predictive path tracking control for off-road mobile robots. *European journal of control*, 13(4), 419–439.
14. Rahman, M.M., K. Ishii, and N. Noguchi, *Optimum harvesting area of convex and concave polygon field for path planning of robot combine harvester*. *Intelligent service robotics*, 2019. 12(2): p. 167–179.
15. Seo, I.-H., D.-H. Seo, and K.-D. Kim, *Development of working path formation program for autonomous tractor system*. *Korean Journal of Agricultural Science*, 2010. 37(1): p. 113–121.

16. Stoll, A., & Dieter Kutzbach, H. (2000). Guidance of a forage harvester with GPS. *Precision Agriculture*, 2(3), 281–291.
17. Zhang, Q., & Qiu, H. (2004). A dynamic path search algorithm for tractor automatic navigation. *Transactions of the ASAE*, 47(2), 639.
18. 전찬우. 박사학위논문 (2022)

Abstract

Development of Curved Path Generation and Path-tracking Technologies for Field Autonomous Agricultural Operation

Kyeong-min Kang

Biosystems Engineering

The Graduate School

Seoul National University

In this study, in order to expand the applicability of autonomous technology in the domestic agricultural environment, new path generation and tracking algorithms applicable to curved working paths and implement-based tracking have been developed. An initial reference path was generated based on the worker's driving pattern and headland turning paths were generated considering the operation width of the implement and the turning radius of the tractor. In many previous studies related to path-tracking, most of them were vehicle-centered control methods, but through field factor experiments, the vehicle-centered path following method showed a large error in the position of the implement compared to the reference path. In this study, the performance of the path-tracking

algorithm has been improved considering the implement operation characteristics and dimensions. In addition, by considering the application in the curved path, the curvature of the path was defined and applied to the implement-based path tracking algorithm. The developed path generation technology and path tracking algorithm were applied to the laboratory-made simulator and tested for their applicability. When a curvature was applied, driving on a curved path resulted in increases in heading and lateral deviation errors as compared to those obtained without curvature. In the field, the error in tracking performance decreased by 33.7% based on the operating section depending on whether or not curvature was applied, and the error for the operating path including headland turning was decreased by 38.9%, improving operating efficiency and tracking performance has been improved. These results show that the application of autonomous tractors can be expanded to inner-work in field on sloping ground and operating efficiency can be improved.

Keywords : Autonomous Tractor, Path generation, Path-tracking, Curvature, Field Operation

Student Number : 2021-23843