

식물 생산로봇에 적용을 위한 사륜 독립 조향 구동 플랫폼 연구

Development of Four-Wheel Independent Steering Driving Platform for Agricultural Robot

김경철¹, 양창완¹, 김경주¹, 유범상^{2,✉}

Kyoung Chul Kim¹, Chang Wan Yang¹, Kyoung Ju Kim¹ and Beom Sahng Ryuh^{2,✉}

¹ 전북대학교 대학원 정밀기계공학과 (Department of Precision Mechanical Engineering, Chonbuk National Univ.)

² 전북대학교 기계시스템공학부 & 지능형로봇연구소 (Department of Mechanical System Engineering & Intelligence Robot Research Center, Chonbuk National Univ.)

✉ Corresponding author: ryuhbs@jbnu.ac.kr, Tel: 063-270-2480

Manuscript received: 2011.2.8 / Accepted: 2011.5.25

Automation is important in modern agricultural environment, which demands the highest level of technology. In the paper an independent four-wheel steering driving platform is developed especially for horticulture in glass house farm. Mathematical modeling of the four wheel system is carried out for smooth movement. The relationships between steering angle, the turning radius, and escape trajectory are simulated using the dynamic analysis program. Optimal driving algorithm is sought through the performance evaluation.

Key Words: Agricultural Robot (식물 생산 로봇), Four-wheel Steering System (사륜 조향시스템), Escape Trajectory (이탈 궤적), Dynamic Analysis (동역학해석), In-wheel-motor (인휠 모터)

기호설명

L = Distance of wheel base

T = Distance between Wheel

R = Turning radius

θ_F = Front wheel steering angle

θ_R = Rear steering angle

θ_{F_L} = Front wheel steering left angle

θ_{F_R} = Front wheel steering right angle

θ_{R_L} = Rear steering left angle

θ_{R_R} = Rear steering right angle

ΔR = Escape trajectory

1. 서론

농업은 산업원료, 식품 등 자연자원을 생산하

는 기초 산업으로 기후나 주위 환경에 쉽게 영향을 받는 분야이다. 최근 우리나라의 농업 환경은, 인구의 감소 및 노령화 되어 가고 있으며 해외 수입 농산품과의 가격 경쟁력 향상과 고생산성 요구 등으로 급격하게 변화를 받고 있다. 이에 농업환경은 단순한 양적 변화가 아닌 질적인 변화가 요구되고 있으며, 장기적으로 미래 농업을 대비한 기술로 로봇 기술이 요구되고 있다. 지능형 식물 생산 로봇 기술은 크게 주행 기술과 정밀 작업 기술로 구분된다. 특히 규격화 되어 있지 않은 환경에서 원하는 공간으로 이동시킬 수 있는 주행기술은 식물 생산 로봇의 효율성을 극대화 할 수 있는 기초적인 선행 연구이다.¹

식물 생산 로봇이 운영되는 환경은 노지와 시설로 구분되며, 로봇의 운영 목적에 따라 수확, 방제 그리고 생육환경 감시용 등으로 구분된다. 로봇

의 구동 플랫폼은 작업 위치로 이동하는 역할을 하며, 족(足) 보행과 바퀴 구동 방식으로 구분되는데 Table 1 은 보행과 구동 방식의 장단점을 보여준다.

Table 1 Characteristics of driving platform types

		Advantage	Disadvantage
Working	Bipedal	Many Conditions can be moved	Center of gravity need,Controlling
	Tetrapod	Walking balance of more than bipedal	complexity, High prices
Driving	Wheel	Fest speed, Easy to manufacture	Difficult moving obstacles
	Caterpillar	Less out of the impact	Difficult moving obstacles

기존의 사륜 조향에서 전륜, 후륜 방식의 구동에 대한 연구는 자동차 플랫폼 분야의 주행성능 및 안정성 확보 측면에서 연구가 이루어지고 있었다. 지능형 로봇의 이동은 자동차보다 저속으로 주행하며 좁은 공간에서의 기동성과 정확한 경로를 따르는 추종성, 사용자의 명령에 대한 정확한 대응이 중요한 부분을 차지한다. 따라서 자동차에서는 고속 주행에서의 안정성 등이 동력학적인 고찰이 중요한 반면, 로봇에서는 다양한 구동 방법에 대한 기구학적 해석에 따라 자율주행 기술을 활용하여 정확한 경로를 이동하는 기술이 중요하다. 본 논문에서는 시설 농장에서의 원활한 움직임 을 갖는 구동 플랫폼을 개발하기 위해서 사륜 독립 조향/구동 방식의 구동 플랫폼을 설계, 제작 하였다. 로봇의 안정적인고 원활한 움직임을 위하여 기구학적 해석을 수행하여 조향 특성과 각 바퀴의 조향각과 회전 반경과의 관계를 파악하였다. 수학적 모델링을 하여, 다물체 동역학 해석 프로그램인 Recurdyn 을 이용하여 검증 을 실시하였다.

2. 식물 생산 로봇 구동 플랫폼 연구 동향

현재 개발된 식물 생산 로봇은 파수 수확 로봇, 방제 로봇과 생육 환경 감시 로봇 등으로 구분된다. 시설농업용 로봇은 기술적인 문제 등에 의해 아직 실용화된 예가 적으나, 최근 농업 환경의 변화에 따라서 필요성이 높아져 가며 다양한 연구가 진행되고 있다.²

이러한 로봇들의 구동을 위한 방법에는 크게 바퀴 형과 무한궤도 형으로 나눌 수 있다. 지면과

의 접촉이 균일하지 않아 원하는 방향으로 이동 및 주행하기 어려운 경우에는 무한궤도 트랙을 이용하여 지면과의 접촉 면적을 늘리는 방법이 주로 사용된다. 바퀴 구동 방식은 평지에서의 이동이 용이하고 개발이 쉬운 장점으로 많은 분야에 적용이 가능하며, 일반적으로 4 개의 바퀴를 이용한 방식을 많이 사용하고 있다. 다양한 바퀴 구동방식의 조향 방법은 Fig. 1 과 같다.

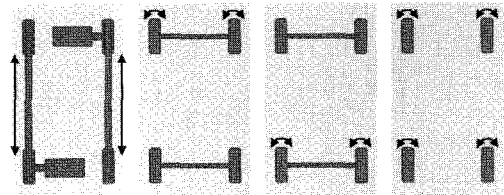


Fig. 1 Four Modes of Steering

첫 번째의 좌우 바퀴의 속도 차이 및 회전 방향을 이용한 방법의 경우 에너지 효율이 좋다는 장점을 가지고 있으나, 조향시 정확한 자세 제어가 어려운 단점을 가지고 있다. 두 번째의 전륜 조향 방식은 일반적으로 많이 사용하고 있으며, 세 번째의 후륜 조향 방식은 전륜 조향과 같은 조향 각도를 가졌을 경우 회전 반경이 더 작아진다. 네 번째의 사륜 조향 방식은 회전 반경을 더 줄일 수 있으며, 조향시 정확한 자세 제어가 가능하다는 장점을 가지고 있다.³

3. 시스템 설계

식물 생산을 위한 로봇의 운영 환경을 살펴 보면 크게 실내와 실외로 구분되며, 노면의 상태는 비포장 도로와 포장 도로로 구분된다. 본 연구의 사륜 시스템은 대단위 농업에서 많은 부분을 차지하고 있는 시설 유리 온실을 대상으로 하였다

3.1 농장 환경 분석

시설 유리온실의 환경은 Fig. 2 와 같다. 중앙 통로는 포장 도로와 비포장 도로가 혼합해 있으며, 작물과 작물 사이는 온수파이프가 설치되어 있다. 로봇은 중앙 통로를 이동하다 작은 회전 반경으로 선회하여 된다. 바퀴는 중앙 통로 노면과 식물 베드 온수 파이프를 레일 삼아 식물 베드 사이를 주행하게 사이의 레일 양쪽에서 다 주행하도록 설계 제작된다.

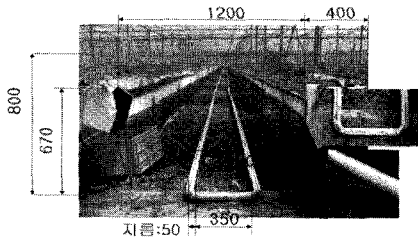


Fig. 2 Rose horticulture glass house

장미와의 간섭을 최소화 하기 위해, 농장 환경을 분석하여 로봇이 진행하며 농작물에 영향을 주지 않도록 플랫폼을 설계하였다.

3.2 구동부의 제작

구동을 위한 모터는 24V 200W 의 20:1 의 감속비를 갖는 BLDC 모터를 사용하였으며 Fig. 3 과 같은 형태로 바퀴 내부 축에 고정되어 모터와 바퀴가 같이 회전하는 형태로 제작하였으며, 구동 휠과 바퀴의 자유로운 조향을 위한 받침대를 Fig. 3 과 같이 설계 제작하였다.

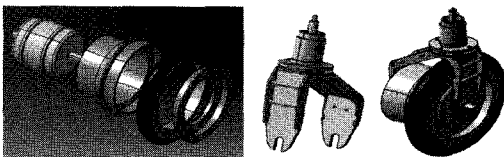


Fig. 3 3D Modeling of Wheel and Bracket

구동 바퀴의 형상은 일반 바닥과 온수 파이프를 이용한 레일 주행을 고려하여 이중 바퀴 구조로 설계하였으며, 받침대에는 바퀴가 자유롭게 조향할 수 있게 하기 위해서 축 방향으로 하중을 받는 트러스트 베어링을 장착하였다. 바퀴의 조향은 오토닉스 社의 A50K-M566-G10 의 스텝 모터를 사용하였으며, Fig. 4 와 같이 바퀴 받침대의 동력 전달은 타이밍 벨트와 풀리를 이용하여 제작하였다.

설계된 전체 시스템 형상은 Fig. 5 와 같으며, 상판에는 모터 드라이버와 스텝 모터 드라이버가 각각 4 개씩 총 8 개가 위치한다.

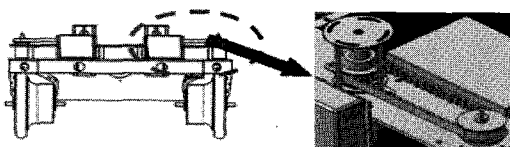


Fig. 4 3D Modeling of Power Transmission

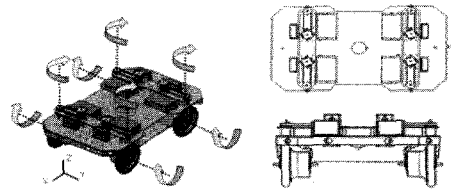


Fig. 5 Design of Driving Platform

4. 수학적 모델링

제작된 사륜 구동 플랫폼은 가변적인 회전반경과 경로를 따라 이동하도록 되어 있다. 시설 환경에서의 자유로운 시스템을 운용하기 위해서는 플랫폼의 전륜, 후륜, 사륜 조향시 회전 반경과 바퀴 조향각의 관계와 이탈 궤적(Breakaway Trace)에 대한 정확한 수학적 모델링이 필요하다. 여기서 이탈 궤적이란 네 바퀴의 궤적 중 가장 큰 회전 반경과 가장 작은 회전 반경의 차를 말하는데, 이탈 궤적이 작을수록 좁은 길을 안전하게 통과할 수 있다.⁴

4.1 전륜 조향

전륜 조향 시 회전 반경과 바퀴 조향각의 관계를 Fig. 6, 7 과 같이 도식화한 후 기하학적 해석을 하였다.

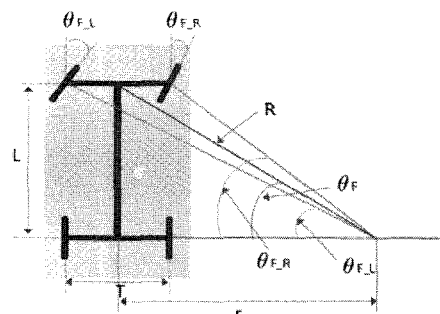


Fig. 6 Relation between the Radius of Rotation and Steering Angle in Front Wheel Steering

전륜 조향을 위한 양쪽 바퀴의 조향각 ($\theta_{F,R}$, $\theta_{F,L}$)은 회전 반경(r)과 회전 반경 중심에서 앞바퀴 사이 거리(T)의 중심 지점까지의 거리(R)를 통하여 구할 수 있다.

$$\sin \theta_F = \frac{L}{R}, \quad \theta_F = \sin^{-1}\left(\frac{L}{R}\right) \quad (1)$$

$$\cos \theta_F = \frac{r}{R}, \quad r = R \cos \theta_F = R \cos(\sin^{-1} \frac{L}{R}) \quad (2)$$

$$\tan \theta_{F,R} = \frac{L}{r-T/2} \quad (3)$$

$$\tan \theta_{F,L} = \frac{L}{r+T/2} \quad (4)$$

$\theta_{F,R}$ 과 $\theta_{F,L}$ 을 다음과 같이 구한다.

$$\theta_{F,R} = \tan^{-1} \left(\frac{L}{R \cos(\sin^{-1}(L/R)) - T/2} \right) \quad (5)$$

$$\theta_{F,L} = \tan^{-1} \left(\frac{L}{R \cos(\sin^{-1}(L/R)) + T/2} \right) \quad (6)$$

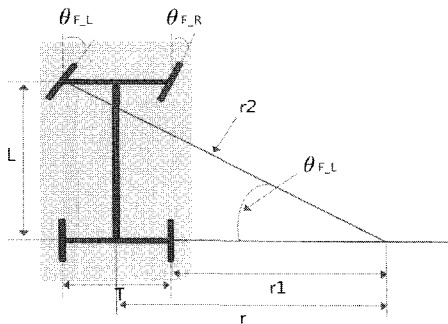


Fig. 7 Breakaway Trace of Wheels in the Front Wheel Steering

전륜 조향시 이탈 궤적(회전 반경이 가장 큰 경우에서 가장 작은 경우의 차)을 도출하였다.

$$r1 = r - \frac{T}{2} = R \cos(\sin^{-1}(\frac{L}{R})) - T/2 \quad (7)$$

$$L = r2 \sin \theta_{F,L}, \quad r2 = \frac{L}{\sin \theta_{F,L}} \quad (8)$$

$$\Delta R = r2 - r1 = \frac{L}{\sin \theta_{F,L}} - R \cos(\sin^{-1}(\frac{L}{R})) + T/2 \quad (9)$$

4.2 후륜 조향

회전 반경과 바퀴 조향각의 관계를 Fig. 8, 9 와 같이 도식화한 후 기하학적 해석을 하였다.

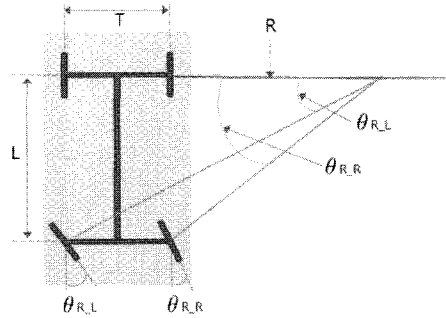


Fig. 8 Relation between the Radius of Rotation and Steering Angle in Rear Wheel Steering

바퀴의 조향각($\theta_{R,R}$, $\theta_{R,L}$)은 회전 반경(r)과 회전 반경 중심에서 뒷바퀴 사이 거리(T)의 중심 지점까지의 거리(R)을 통하여 구할 수 있다.

$$\tan \theta_{R,R} = \frac{L}{R-T/2}, \quad \tan \theta_{R,R} \cong \theta_{R,R} \quad (10)$$

$$\tan \theta_{R,L} = \frac{L}{R+T/2}, \quad \tan \theta_{R,L} \cong \theta_{R,L} \quad (11)$$

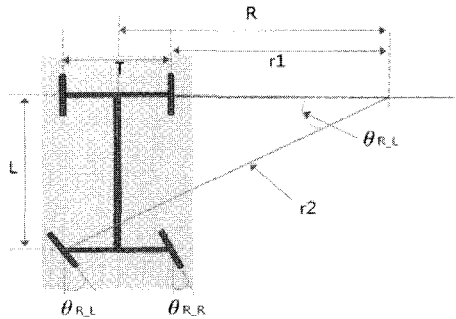


Fig. 9 Breakaway Trace of Wheels in Rear Wheel Steering

후륜 조향시 이탈 궤적(회전 반경이 가장 큰 경우에서 가장 작은 경우의 차)을 도출하였다.

$$r1 = R - \frac{T}{2} \quad (12)$$

$$L = r2 \sin \theta_{R,L}, \quad r2 = \frac{L}{\sin \theta_{R,L}} \quad (13)$$

$$\Delta R = r2 - r1 = \frac{L}{\sin \theta_{R,L}} - R + \frac{T}{2} \quad (14)$$

4.3 사륜 조향

조종 능력을 향상시키기 위해서 후륜을 전륜과 반대 방향으로 조향하는 역위상각 방식을 이용하여 구동 플랫폼의 회전 반경과 바퀴 조향각의 관계를 Fig. 10, 11 과 같이 도식화하고 수학적 모델링을 하였다.

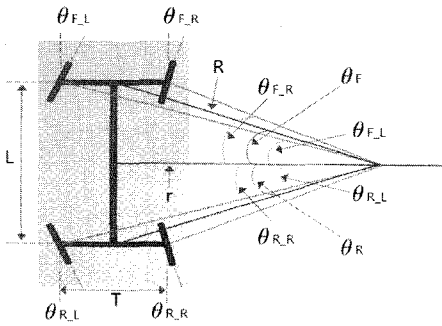


Fig. 10 Relation between the Radius of Rotation and Steering Angle in Four Wheel Steering

바퀴의 조향각($\theta_{F,R}$, $\theta_{F,L}$, $\theta_{R,R}$, $\theta_{R,L}$)은 회전 반경 (r)과 앞뒤 바퀴 사이 거리(T)의 중심까지의 거리 (R)을 통하여 구할 수 있다.

$$\sin \theta_F = \frac{L}{2R}, \quad \theta_F = \sin^{-1}\left(\frac{L}{2R}\right), \quad \theta_F = \theta_R \quad (15)$$

$$\cos \theta_F = r \quad (16)$$

$\theta_{F,R}$, $\theta_{F,L}$, $\theta_{R,R}$, $\theta_{R,L}$ 을 다음과 같이 구한다.

$$r = R \cos(\sin^{-1}(\frac{L}{2R})) \quad (17)$$

$$\tan \theta_{F,R} = \frac{L/2}{r-T/2} \quad (18)$$

$$\tan \theta_{F,L} = \frac{L/2}{r+T/2} \quad (19)$$

$$\tan \theta_{F,R} = \frac{L/2}{R \cos(\sin^{-1}(\frac{L}{2R})-T/2)} \quad (20)$$

$$\theta_{F,R} = \tan^{-1}\left(\frac{L/2}{R \cos(\sin^{-1}(\frac{L}{2R})-T/2)}\right) \quad (21)$$

$$\tan \theta_{F,L} = \frac{L/2}{R \cos(\sin^{-1}(\frac{L}{2R})+T/2)} \quad (22)$$

$$\theta_{F,L} = \tan^{-1}\left(\frac{L/2}{R \cos(\sin^{-1}(\frac{L}{2R})+T/2)}\right) \quad (23)$$

$$\theta_{F,L} = \theta_{R,L}, \quad \theta_{F,R} = \theta_{R,R} \quad (24)$$

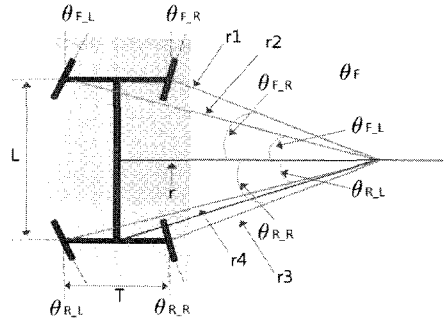


Fig. 11 Breakaway Trace of Wheels in Four Wheel Steering

사륜 조향시 이탈 궤적(회전 반경이 가장 큰 경우에서 가장 작은 경우의 차)을 도출하였다.

$$r1 = r3 = \frac{L}{2 \sin \theta_{F,R}} \quad (25)$$

$$r2 = r4 = \frac{L}{2 \sin \theta_{F,L}} \quad (26)$$

$$\Delta R = r2 - r1 = r4 - r3 = \frac{L}{2 \sin \theta_{F,L}} - \frac{L}{2 \sin \theta_{F,R}} \quad (27)$$

5. 주행 해석

기구학적 해석 결과를 검증하기 위해 Recurdyn 과 Matlab 제어 모델 Co-simulink 를 사용하여 비교 /검토하였다. Recurdyn 에서의 시뮬레이션 모델은 Fig. 12 와 같다.

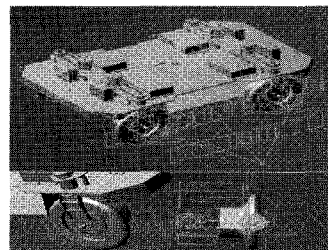


Fig. 12 Modeling of Four Wheel Steering in Recurdyn

주행 노면과 바퀴와의 접촉 조건은 바퀴의 재질인 고무와 노면의 재질인 시멘트의 운동 마찰 계수를 적용하였다. 네 개의 구동 바퀴의 속도와 네 개의 조향 각도를 입력 값으로 주었다. 각각 전, 후, 사륜 조향에 대한 Simulink 를 실시하였다.^{5,6}

5.1 결과의 해석

전, 후, 사륜 조향에 대해 회전 반경 285mm, 570mm, 1000mm, 1500mm, 2000mm, 2500mm 의 경우에 대해 시뮬레이션 하였다. 구동 플랫폼의 최고 속도가 1.5m/s 인 것을 고려하여 바퀴의 회전 속도는 13rad/s 로 지정하였다. 시뮬레이션의 결과는 Fig. 13 과 같다.

시뮬레이션 결과 값을 통하여 예측했던 회전 반경과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이를 통하여 기구학적 수식을 검증할 수 있었다.

전륜의 경우에는 반경이 285mm 인 경우와 570mm 인 경우 같은 값을 보여 주고 있는데, 이는 회전중심이 뒷바퀴의 선상에 위치하기 때문에 285mm 의 반경에 대한 구동이 불가능하다.

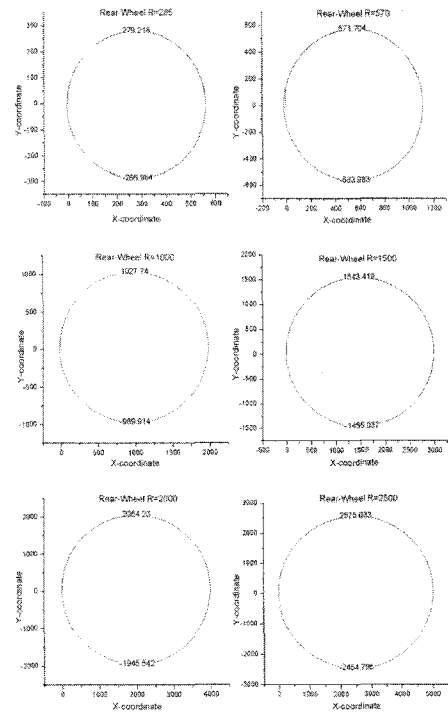


Fig. 13(b) Radii of Rotation (Rear Wheel Steering)

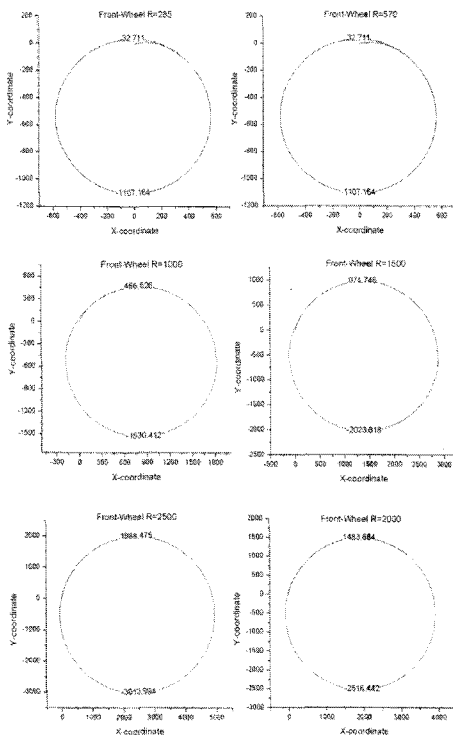


Fig. 13(a) Radii of Rotation (Front Wheel Steering)

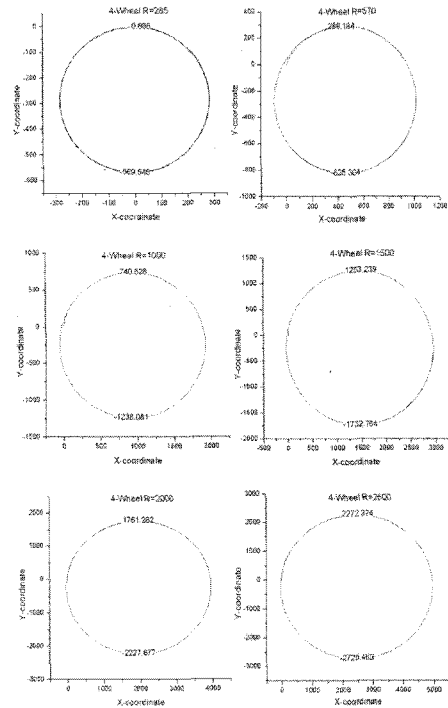


Fig. 13(c) Radii of Rotation (Four Wheel Steering)

5.2 조향 각도와 회전 반경의 관계

회전 반경과 각 바퀴의 조향각과의 관계를 살펴보기 위한 시뮬레이션을 실시하였으며 약 200 개의 데이터를 샘플링 하여 그래프로 나타냈다. 조향 시 회전 반경과 조향각의 관계는 Fig. 14 와 같다.

후륜 조향은 전륜 조향에 비해 더 작은 회전 반경에 대해서 구동이 가능하며, 사륜 조향은 후륜 조향에 비해 양쪽 바퀴 사이의 거리인 350mm 를 초과하는 범위에서 더 작은 회전반경에 대해서 구동이 가능하다는 것을 알 수 있다. 350mm 이하 범위는 사륜 조향이 제자리 회전하는 구간이다.

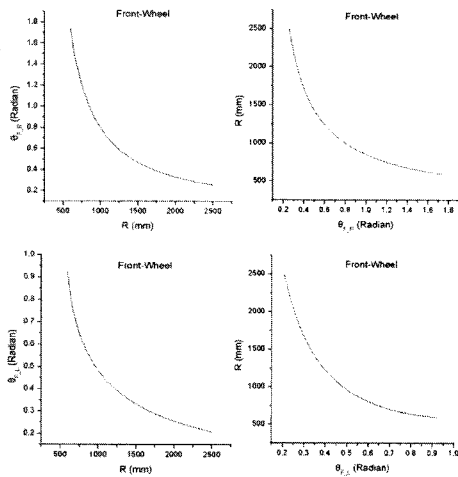


Fig. 14(a) Relation between Steering Angle and Radius (Front Wheel Steering)

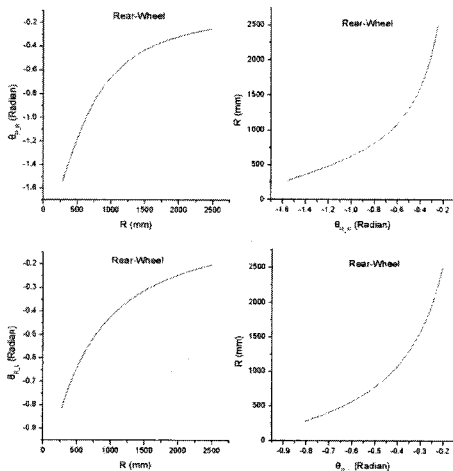


Fig. 14(b) Relation between Steering Angle and Radius (Rear Wheel Steering)

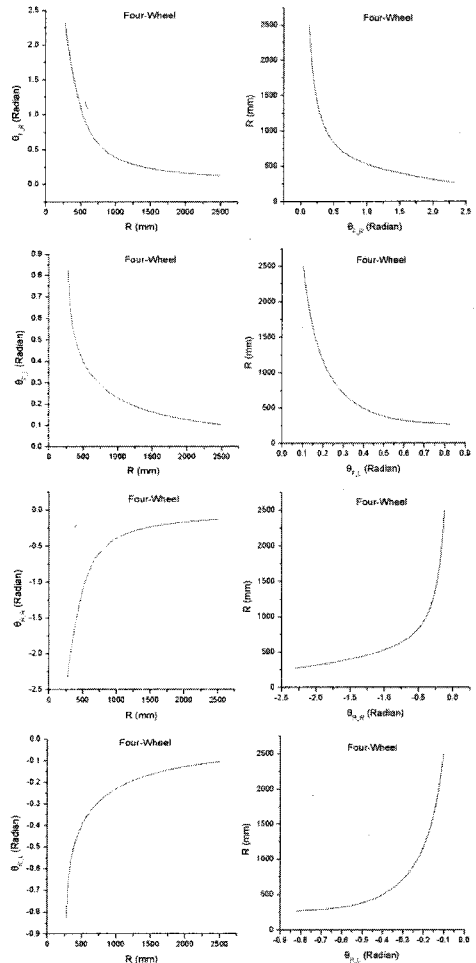


Fig. 14(c) Relation between Steering angle and Radius (Four Wheel Steering)

이는 제자리 회전이 불가능한 후륜보다 작은 회전 반경을 갖는다.

5.3 이탈 궤적

이탈궤적이란 네 개의 바퀴 중에서 회전 중심과의 회전 반경이 가장 큰 반경 값과 가장 작은 반경 값의 차이를 말한다. 즉 이탈궤적이 작을수록 좁은 길을 장애물에 간섭 받지 않고 움직일 수 있음을 나타내는 것이다. 이를 구하기 위해 각각의 바퀴에 마커를 부착하여 회전반경 R 값이 285, 1000, 2000mm 인 경우를 주행 시뮬레이션 하여 각 마커의 궤적을 그래프에 나타내었으며, Table 2 는 계산된 이탈궤적 값을 보여주고 있다.

Table 2 Calculated results of Breakaway Trajectory

	R	F_R	F_L	R_R	R_L	Escape trajectory
Unit	mm	Degree	Degree	Degree	Degree	mm
Front wheel	285					
	1000	0.7973	0.4831	0	0	670
	2000	0.3322	0.2555	0	0	602.2
Rear wheel	285	0	0	-1.5357	-0.8032	771.8
	1000	0	0	-0.66	-0.4235	651.36
	2000	0	0	-0.3174	-0.2465	599.8
Four wheel	285					
	1000	0.39	0.2288	-0.39	-0.2288	506.7
	2000	0.165	0.1263	-0.165	-0.1263	527.14

*R (Turning radius) / F_R (Front right steering angle) / F_L (Front left steering angle) / R_R (Rear right steering angle) / R_L (Rear Left steering angle)

각 조향 방법에 따른 이탈궤적을 Fig. 15 그래프로 표현하였다. 가장 큰 원의 반경과 가장 작은 원의 반경의 차이가 이탈궤적이 된다.

전륜시 결과값은 670mm, 600mm 의 값으로 계산 결과와 유사하며, 후륜시 결과값은 전륜과 유사하게 나타났다. 사륜의 경우에는 504mm, 523mm 로 전륜, 후륜 조향시 보다 작은 이탈궤적 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 이탈궤적을 살펴본 결과 같은 회전반경에서 이탈궤적이 가장 작은 경우는 사륜 조향의 경우이며, 후륜 조향, 전륜 조향 순이다. 특히 회전반경의 값이 작은 경우에는 사륜 조향과 다른 조향 방법들과의 이탈궤적 차이는 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

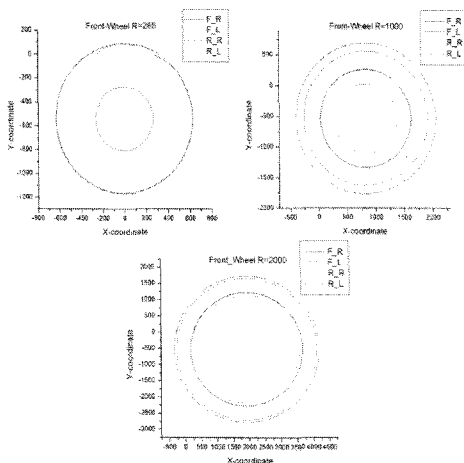


Fig. 15(a) Breakaway Trajectory and Radius of Rotation (Front Wheel Steering)

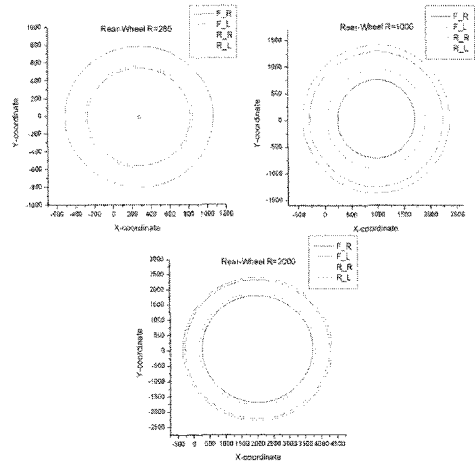


Fig. 15(b) Breakaway Trajectory and Radius of Rotation (Rear Wheel Steering)

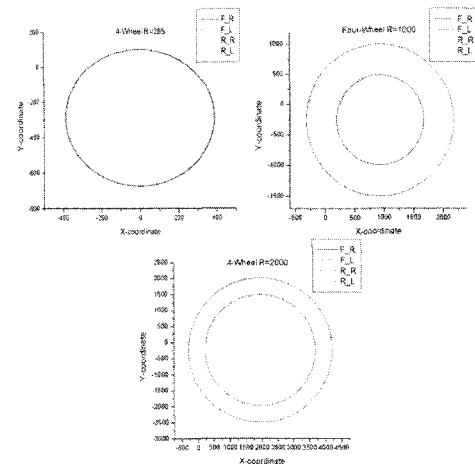


Fig. 15(c) Breakaway trajectory and radius of rotation (Four Wheel Steering)

5.4 주행 해석 분석

4 장의 수학적 모델링과 5 장의 주행해석을 통하여 사륜 조향의 경우가 가장 작은 조향각을 가지며, 작은 회전반경에 대한 구동이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 이탈궤적의 경우는 사륜 조향의 경우가 가장 작은 이탈궤적을 가지고 구동함으로 좁은 공간에서의 원활한 구동이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

6. 제어 시스템

구동 제어는 Fig. 16 과 같이 구성하였다. 무선 통신을 사용하여 사용자가 원하는 값을 입력하게

되면 주제어기(Main controller)에서는 조향각과 속도를 계산하여 모터를 제어한다.

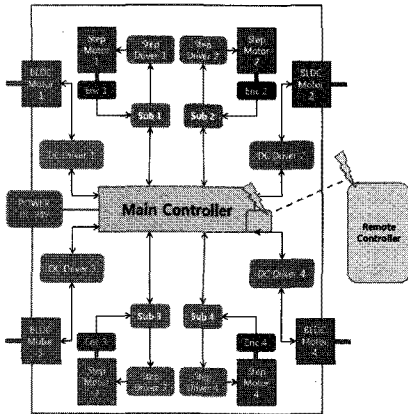


Fig. 16 Hardware Construction of Four Wheel Platform Control System

Atmel 社의 XMEGA128 을 이용하여 Fig. 17 의 모터 드라이버를 제작하였다. 엔코더를 통하여 습득된 조향 바퀴의 위치 정보를 주제어기와의 통신을 통하여 조향각을 피드백 하였다.

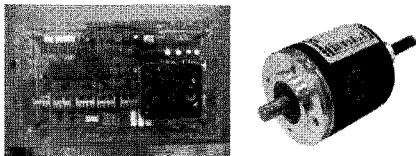


Fig. 17 Driving Motor Driver & Steering Motor Encoder

7. 결론

본 연구에서는 원활한 구동을 위한 플랫폼 연구를 위해 전, 후, 사륜 조향에 대한 수학적 모델링을 하였으며, 이를 다물체 동역학 프로그램을 이용하여 회전 반경과, 조향각, 이탈계적에 대해서 비교 검토하였다. 그 결과 회전 반경과 조향각의 관계를 검증 하였으며, 사륜 조향 시 가장 작은 조향각으로 작은 회전 반경을 가질 수 있다는 것을 입증 하였다. 또한 이탈계적도 사륜 조향 시 가장 작다는 것을 통하여 좁은 공간에서도 원활한 주행이 가능하다는 것을 입증하였다.

사륜 독립 조향 시 식물 생산 로봇의 원활한 움직임을 얻을 수 있으며, 규격화 되지 않은 식물 생산 로봇의 구동 환경에서 원활한 구동이 가능한

사륜 독립 조향 구동 플랫폼을 개발하였다. 차후 다양한 위치인식과 자율주행 기술들과 융합하여 부드럽고 정확한 자율 주행 구현이 가능할 것이다.

참고문헌

1. Kim, K. C., Ryuh, B. S., Yang, C. W. and Chang, K., "Development of Semi-Autonomous Pesticide Spray Robot for Glass House Rose Farming," J. of KSPE, Vol. 27, No. 9, pp. 34-42, 2010.
2. Kassler, M., "Agricultural Automation in the near Millennium," Computer & Electronics in Agriculture, Vol. 30, No. 1, pp. 237-240, 2001.
3. Kim, M., Lee, J. and Yoo, W., "A Study on the Optimum Velocity of a Four Wheel Steering Autonomous Robot," Trans. of KSAE, Vol. 17, No. 4, pp. 86-92, 2009.
4. Gillespie, T. D., "Fundamentals of vehicle Dynamics," Society of Automotive Engineers, pp. 249-278, 1992.
5. Kim, M. O., Lee, J. H. and Yoo, W. S., "A Study on the Optimum Velocity of a Four Wheel Steering Autonomous Robot," Trans. of KSAE, Vol. 17, No. 4, pp. 86-92, 2009.
6. Hahn, B. H. and Valentine, D. T., "Essential MATLAB for engineers and scientists, 4th Edition," Academic Press, 2009.