

자율주행을 위한 트랙터 제어장치 개발

Development of a Control System for Autonomous Tractor

김 상철* 박 우풍* 정 인규* 정 선옥* 황 성준*
정회원 정회원 정회원 정회원
S. C. Kim W. P. Park I. K. Chung S. O. Chung S. J. Hwang

1. 서론

산업사회가 고도화 되어감에 따라 농촌의 노동력은 양적 감소와 더불어 노령화 및 부녀화에 따른 노동력의 질적 저하가 지속되고 있다. 높은 임금에도 불구하고 숙련된 기계운전자를 고용하여 적기에 작업을 마치기가 어려운 현실 속에서 많은 농업 종사자는 소득향상을 위해 농산물의 부가가치를 높이고 경작면적을 확대하고자 하지만 비례적으로 증가하게 되는 노동투하량 때문에 갈등을 겪고 있다. 이러한 문제를 해소하기 위해 농업의 많은 분야에도 로봇의 도입이 검토되고 있으며 농작업의 로봇화를 실현하기 위한 연구들이 진행되고 있다.

농업용 로봇은 크게 접목용 로봇이나 착유 로봇과 같이 위치가 고정된 로봇 앞으로 대상물이 이동하여 일련의 공정을 마친 다음 다른 공정으로 옮기거나 방출되는 형태의 정치식 로봇과 경운 로봇이나 이식로봇과 같이 로봇이 대상물 쪽으로 이동하여 필요한 조작을 가하는 이동식 로봇으로 구분할 수 있다. 토지이용형 농업의 농작업 공정은 대체로 작업기의 많은 이동을 필요로 하고 작업공정을 무인화 하기 위해서는 로봇의 이동이 전제되지 않으면 안된다. 로봇의 성능은 작업환경을 인식하고 예정된 경로를 오차 없이 이동할 수 있는 자율주행 기술에 좌우된다.

트랙터는 농작업을 위해 가장 넓은 용도로 사용되고 있는 농업기계중의 하나이며 트랙터의 자율주행 기술의 개발은 농작업의 무인화를 위한 시작단계라 할 수 있다. 트랙터가 자율주행을 하기 위해서는 운전자에 의해서 조작되는 모든 조종장치들이 전기적 신호에 의해서 제어되어야 하며 여러 종류의 센서에 의해 운전상태를 파악하여 환경의 변화에 스스로 대처하지 않으면 안된다. 최근 10여년 동안 농업용 로봇의 자율주행기술은 기술적 진보와 함께 세계적으로 널리 연구되어 왔으며 다양한 센서기술과 주행 알고리즘들이 개발되고 있다. YUKIMOTO 등(1997)은 25kW급의 농용트랙터에 전자 유압 액츄에이터 등을 부가하고 관성항법장치와 레이저 측거장치 등을 이용하여 무인 경운작업을 시험하였으며 직선구간에서 10cm 이내의 오차로 작업할 수 있었다. Parkinson(1997)등은 항공기의 착륙유도장치에 사용되고 있는 CDGPS기술을 응용하여 트랙터의 항법장치를 설계하고 이를 이용하여 평지주행을 시험한 결과 수 cm 이내의 제어오차를 갖고 주행할 수 있었다. Saffioti(1997)등은 자율주행로봇의 강인한 제어를 위해 퍼지추론에 의한 센서 데이터의 융합기술을 개발하여 시험하고 매우 안정된 주행이 가능하였음을 보고하였다.

대부분의 자율주행 연구는 주행 알고리즘의 개발쪽에 많은 비중을 두어 왔기 때문에 제어기의 신뢰성과 안정성확보를 위한 설계자료나 객관적인 지표의 설정에 상대적으로 소홀하여 왔다. 따라서 본 연구에서는 바퀴 구동형 트랙터의 무인주행을 위하여 전자적으로 제어가능한 액츄에이터를 개발하고 그 성능을 평가 하고자 했으며 구체적인 목적은 다음과 같다.

1. 트랙터를 전자제어하기 위한 제어기의 설계상수 구명
2. 액츄에이터 및 시스템 제어기의 개발
3. 주행시험을 통한 제어장치의 성능평가

* 농업기계화연구소(National Agricultural Mechanization Research Institute, RDA)

2. 재료 및 방법

가. 조향제어기 설계

(1) 트랙터의 조향모델

트랙터가 조향을 α (rad/m)로 z (m)만큼 주행했을 때, 트랙터 앞바퀴 중심의 x, y 축 방향으로 이동변위는,

$$\begin{aligned} x &= z \cos (0.5 \alpha z + \delta_i + \theta_i) \\ y &= z \sin (0.5 \alpha z + \delta_i + \theta_i) \end{aligned} \quad (1)$$

트랙터 중심축의 변위각은,

$$\theta_{i+1} = z(0.5 \alpha z + \delta_i) / L + \theta_i \quad (2)$$

여기서

z : 조향기간중 트랙터가 주행한 거리(m)

δ : 트랙터 중심축에 대한 앞바퀴의 조향각도(rad)

θ : 트랙터 중심축의 각도(rad)

α : 조향율(rad /m)

조향각도(rad/s) / 트랙터의 속도(m/s)

L : 앞바퀴 중심에서 뒷바퀴 중심까지의 거리(m)

속도에 따른 최대조향각은 일정한 주행 속도에서 트랙터가 안정적으로 선회할 수 있는 최대 조향각이므로, 전도 모멘트(overturning moment)와 안정 모멘트의 관계로부터 구할 수 있다.

$$\frac{Wb^2y_s}{gr} \geq Wx_g \quad , \quad r = \frac{L}{\sin \theta} \quad (3)$$

여기서

W : 트랙터의 중량(kg), g : 중력가속도(m/s^2)

v : 트랙터 속도(m/s), r : 선회반경 (m)

y_s : 지표에서 무게중심까지의 수직방향거리(m)

x_g : 바퀴접지면에서 무게중심까지의 수평방향거리(m)

L : 앞뒤 차축간의 거리(m)

따라서 주행중의 조향각은 식 (3)를 이용하여 속도를 고려한 최대조향각에 의해 제한된다.

$$\theta = \arcsin \left(K \frac{L}{v^2} \right) \quad (4)$$

(2) 설계목표

○ 조향각도 분해능 : $\theta = 0.2 \text{deg}$

○ 풀 스티어링 시간($-35 \sim +35^\circ$) : 1.8초 이내

(3) 설계상수

○ 최대 조향토크

$$T_a = \frac{(J_m + J_l)}{g} \times \omega = \frac{(J_m + J_l)}{g} \times 2\pi \times \frac{(fl \times 1.8)}{360} \times \frac{1}{ta} \quad (5)$$

$$J_l = J_s + J_{g1} + J_{g2} + P_h = 184.8 \text{ N.cm}$$

여기서 T_a : 조향 토크 (N-cm), J_m : 모터의 관성 모멘트 ($N \cdot \text{cm}^2$)

J_l : 부하축의 관성 모멘트 ($N \cdot \text{cm}^2$), ω : 모터의 각 가속도 (rad/sec^2)

나. 주행장치 설계

(1) 브레이크 제어기 설계

(가) 브레이크 의 모델링

유효 브레이크 토크는 브레이크 패드의 면적이 일정하다고 가정하면 외부에서 브레이크 라인에 가해진 압력에 의존한다. 브레이크 패드의 면압을 제어하기 위해 Hedrick이 제안한 실험식 (6)을 이용하였다.

브레이크 라인과 브레이크 토크와의 관계

$$T_{br} = K_{br} \cdot P_{break} , (K_{br} = 1.11 N \cdot m/kPa) \tag{6}$$

여기서 T_{br} : 브레이크 토크

K_{br} : 전달계수

P_{input} : 브레이크 라인에 가해진 압력

$$P_{input} = C \cdot P_{break}$$

P_{break} : 외부에서 브레이크 조작에 가해진 힘

C : 전달계수

(2) 클러치 및 변속제어장치 설계

(가) 트랜스미션의 회전수 특성모델

대부분의 트랙터는 기어비에 따른 출력회전수의 근사특성곡선이 식(7)를 만족하므로 트랙터의 종류나 엔진에 따라 특성계수값 a, b, c, d만을 정하였다. a, b, c, d의 값들은 트랙터의 성능 시험표로부터 구하였으며 엔진 제조자의 엔진성능곡선도 참조하였다.

$$V_a = (aT_a^3 + bT_a^2 + cT_a + d) \frac{N_a \pi D}{N_r} \tag{7}$$

V_a : 트랙터속도,

T_a : 변속기어비

N_r : 엔진회전수,

N_a : 차축회전수

D : 구동륜직경

(나) 제어구조

제어장치나 운전자로부터 트랙터의 속도를 전기적 신호로 입력하여 기어위치와 클러치, 브레이크 등을 자동 조작하여 변속할 수 있도록 그림 2과 같은 구조로 설계하였다

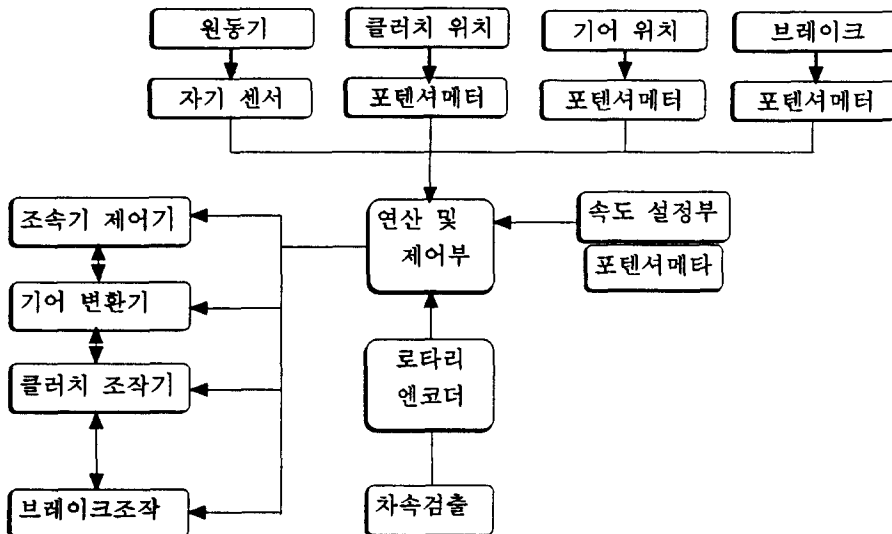


Fig.2. Schematic Diagram of Speed Controller

다. 기타 조종레버의 위치제어장치 설계

트랙터 조종장치의 실시간 위치와 상태를 검출하기 위하여 그림 3과 같이 이동변위를 갖는 제어기구의 적절한 위치에 검출와이어를 연결하고 와이어의 끝단을 포텐서메터와 결합하여 변위에 비례하는 전기적 신호를 발생하도록 하였다

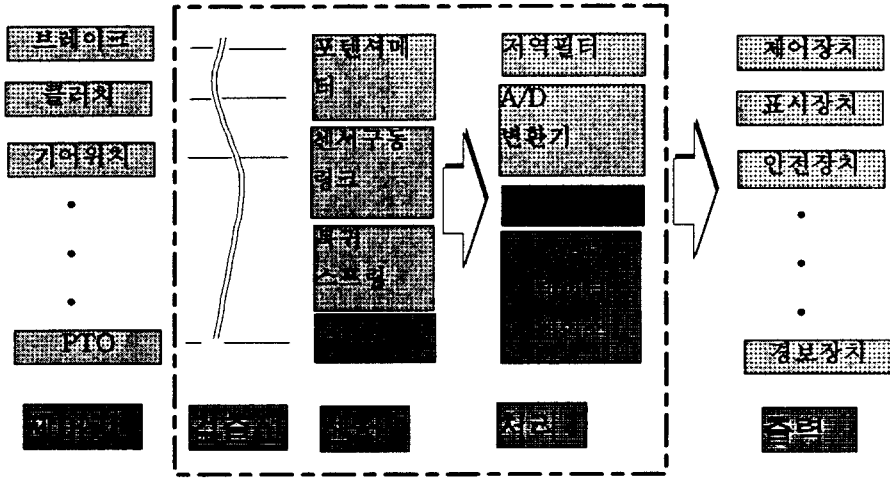


Fig.3. Schematic Diagram of Position Controller for Operating Lever

라. 센서 신호처리 알고리즘

신호잡음을 제거하기 위하여 차단 주파수가 10Hz인 저역통과 디지털필터(Lowpass Digital Filter)를 FIR를 변형하여 식 (8)과 같이 구성하였다

AMDF 디지털 필터 신호처리 알고리즘

$$y_k = \sum_{m=0}^{N-1} \frac{1}{N} x_{k-m} \tag{8}$$

y_k : 필터 출력값, x_k : 필터 입력값

N: 필터 탭의 수

차단주파수 결정

$$N = \frac{f_s}{f_c} \times 0.293 \tag{9}$$

f_s : 샘플링 주파수, f_c : 차단 주파수

마. 시스템 평가를 위한 주행제어 알고리즘

무인주행을 위한 트랙터 제어장치의 조종성능을 시험하기 위하여 식(10)의 주행 제어 알고리즘 을 적용하였다. 측방 위치 오차(X_{trac}^-), 진행 방향 오차(θ), 조향각 오차(ϕ)를 0으로하기 위해 식 (11)의 조향각(ϕ_{x+1})을 출력하도록 하였다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_{trac} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & V_{x0} & -\frac{V_{x0} l_1}{(l_1+l_2)} \\ 0 & 0 & -\frac{V_{x0}}{(l_1+l_2)} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{trac} \\ \theta \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (10)$$

X_{trac} : 측방 위치 오차
 θ : 진행 방향 오차
 ϕ : 조향각 오차

$$\phi_{x+1} = A_x \theta + B_x X_{trac} \quad (11)$$

$$\left(A_x = \frac{L}{3V_{x0}}, B_x = k_1(6X_{trac})^{\frac{1}{3}}(V_{x0})^{-\frac{2}{3}} \right)$$

[k_1 : 2.1 ~ 5.0 (최적실험치 3.2)]

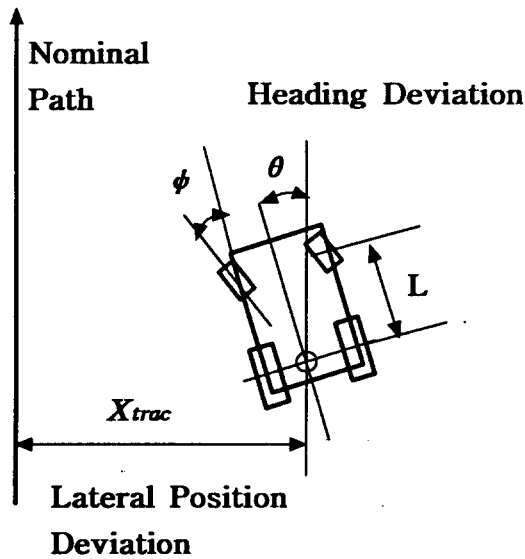


Fig.4. Simple Kinematic Model of Tractor

*1. 트랙터의 위치측정: DGPS 측위정밀도 20cm rms

*2. 트랙터의 진행방향 측정

GYRO에 의한 측정, DGPS의 좌표연산에 의한 측정

마. 시스템 제어기의 설계

트랙터의 외부환경을 인식하기 위하여 주제어기는 DGPS와 레이저 시각장치로부터 위치와 경로에 관한 정보를 직렬통신을 통해 전달받아 경로분석을 하고 내계 센서로부터 검출된 정보를 이용하여 트랙터의 현재상태를 판단하고 필요한 명령을 출력할 수 있는 구조로 설계하였다.

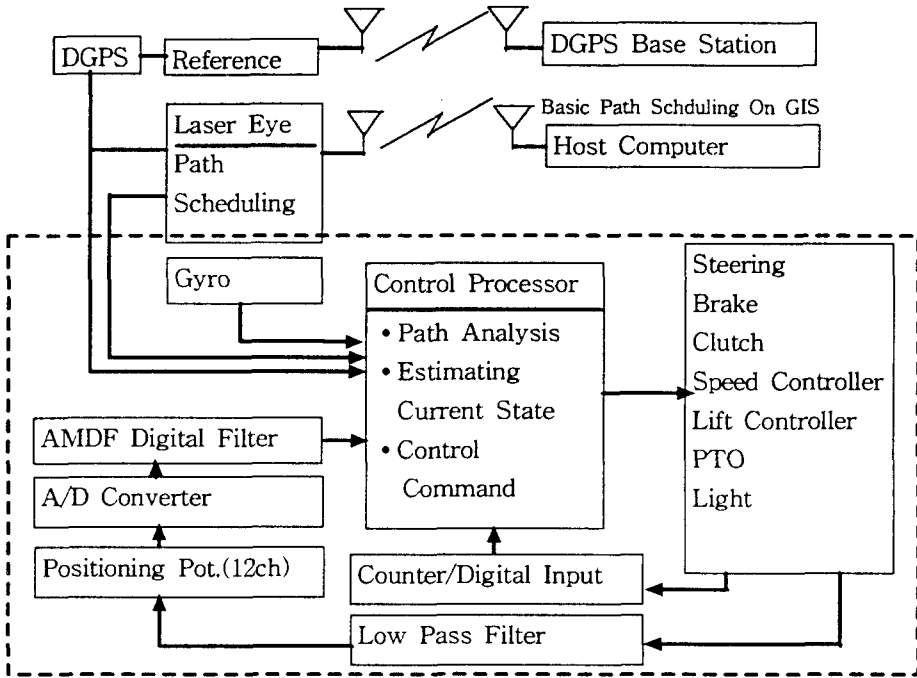


Fig.5. Schematic Diagram of System Controller

3. 결과 및 고찰

나. 조향제어기의 성능시험

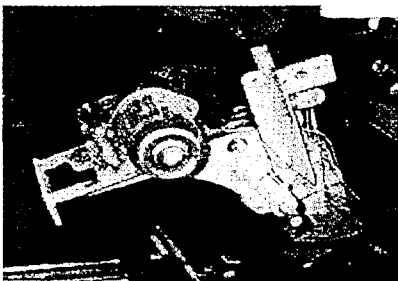


Fig.6. Picture of Steering Control Unit

조향제어기의 초기화 시간은 약 3.6sec였고, 신호에 따른 액츄에이터의 시정수 도달시간은 23.8×10^{-3} sec 정도였다. 풀 스티어링 ($-35^{\circ} \sim +35^{\circ}$) 시간은 스텝모터 구동기의 입력클럭을 변화시키는 것에 의해 $180N \cdot m$ 의 토크를 유지하며 1.6sec에서 9.4sec까지 제어하는 것이 가능했다.

다. 브레이크 제어기의 성능시험



Fig.7. Picture of Brake Control Unit

Hedrick이 제안한 실험식에 따라 그림 7과 같이 유압실린더와 압력변환기를 이용하여 제작된 브레이크 제어기는 응답시간이 160 mS였고, 6Hz의 컨트롤 주파수로PWM제어가 가능하였고 제어기의 압력분해능은 $1.33kg/cm^2$ 였음.

라. 변속제어기의 성능시험

트랙터의 기어비에 따른 출력회전수의 특성곡선에서 식 (7)를 만족하는 특성계수값 a, b, c, d 는 트랙터의 성능시험표로부터 구했으며 다음과 같은 값을 적용했다.

a= 0.0157, b=-0.0614, c=0.3456, d=0.2357

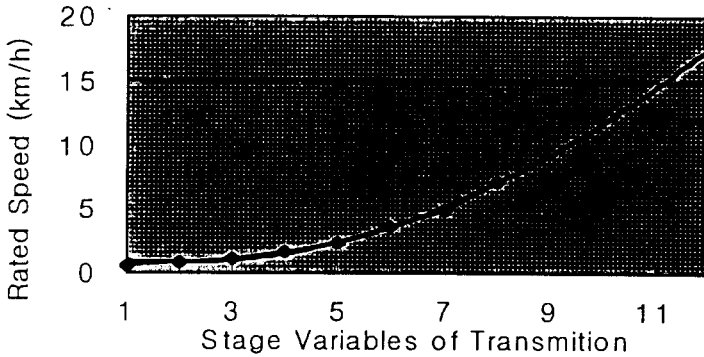


Fig.8. The Result of Speed Controller

트랜스미션의 감속단이 변할 때마다 약 80 ~ 250정도의 엔진회전수 변동이 있었으나 마그네틱 픽업 센서로부터 얻어진 회전 주파수를 F/V컨버터에 의해 전압으로 변환하고 설정 속도에 해당하는 전압값과 차동 증폭기로 비교하여 조속기 제어장치의 입력으로 사용함으로 비교적 선형적인 속도 제어가 가능였으며 시험결과는 그림 8와 같다.

마. 시스템 평가를 위한 포장시험

제작된 개별제어요소들을 26PS의 로터베이터가 부가된 트랙터에 탑재하였다. 진행방향을 보정하기 위한 GYRO와 원격제어를 위한 무선통신장치, 위치측정을 위한 DGPS장비등을 포함하여 약 78kg의 중량증가가 있었으나 조향성능이나 선회반경에는 큰 변화가 없었고 약 7cm 정도의 제동거리 증가가 나타났다.

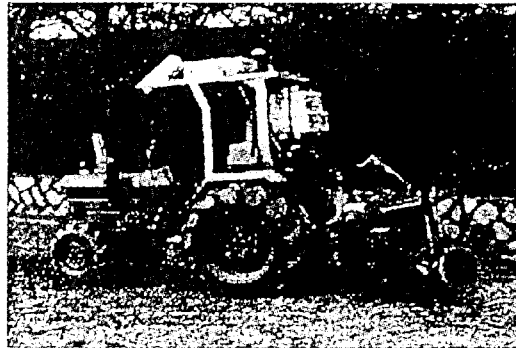


Fig9. Picture of Prototype Unmanned Tractor

공시 트랙터의 경로추종성능을 시험하기위해 DGPS 경위도 좌표계에서 그림 10과 같이 설정된 목표 경로를 따라 2m 이내 임의의 측후방에서 트랙터가 출발하도록 했을 때 약 3초 후는 그림 11에 나타낸 것과 같이 목표 경로와 30cm 이내의 오차로 접근할 수 있었으며 직선경로에서는 20cm 이내의 오차를 유지할 수 있었다. 그러나 선회나 곡선경로의 주행시에는 최단경로와 비교하여 최대 50cm 정도의 오차를 보이고 있으며 그림 12와 같이 조향제어기의 불안정이 나타나기도 하였다.무인트랙터가 정확히 경로를 주행하기 위해서는 제어장치의 정밀도 뿐만 아니라 최적화된 주행 알고리즘과 측위신호의 안정화가 주행오차에 큰 영향을 미치는 것으로 나타나 이들 기술을 개발하기 위한 별도의 연구가 있어야 할 것으로 판단된다.

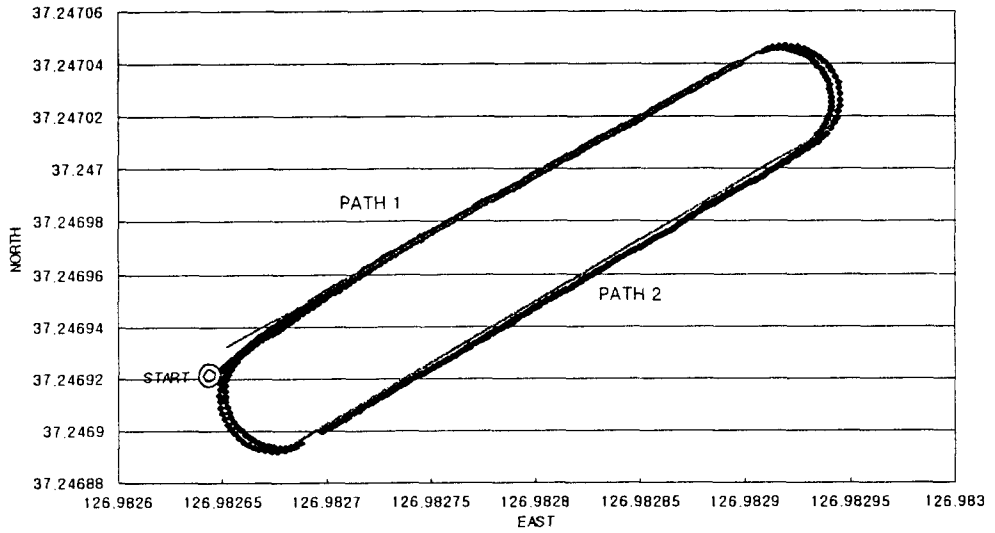


Fig.10. The Result of Tracking Path by DGPS Coordinates

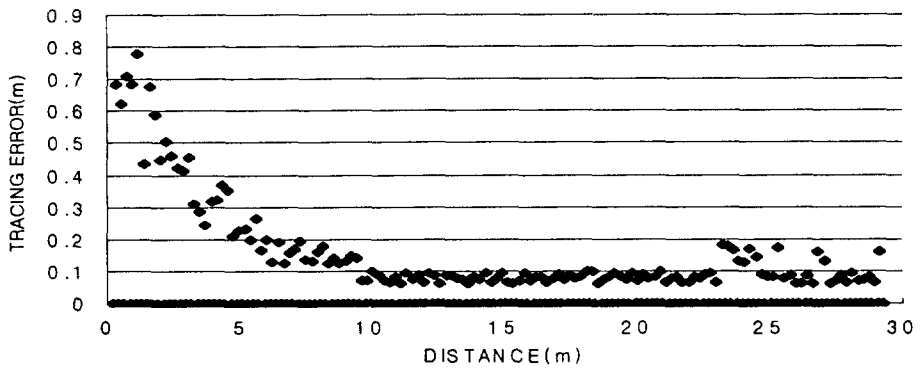


Fig.11. Error Range During Tracking Desired Path

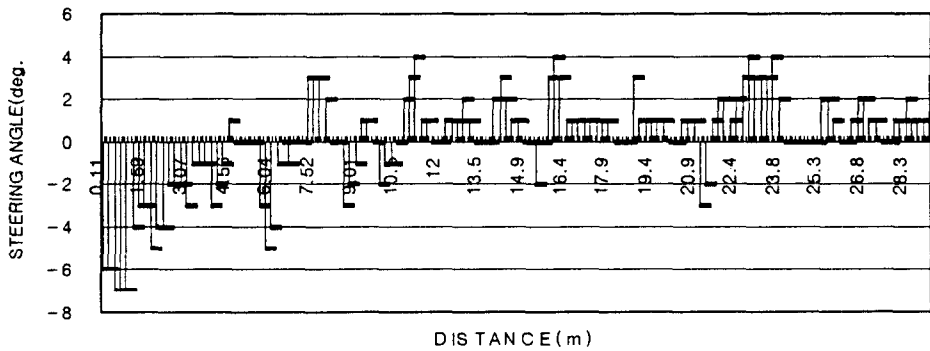


Fig.12. Output Signal for Steering Control During Tracking Path

4. 요약 및 결론

무인으로 운전되는 트랙터의 조종장치들을 전기적 신호에 따라 제어하기 위해 제어기구 및 구동장치를 제작하고 이들을 제어할 수 있는 프로그램을 개발하여 시험하였으며 그 결과는 다음과 같다

- (1) 직류모터 와 엔코더에 의해 페루프 제어되는 조향제어기를 제작하여 시험한 결과, 각도분해능은 0.2° , 전조향각 $\pm 35^\circ$, 전 조향시간은 1.8 초 였다.
- (2) Hedrick이 제안한 실험식에 따라 유압실린더와 압력변환기를 이용하여 제작된 브레이크 제어기는 응답시간이 160 mS 였고, 분해능은 1.33kg/cm^2 였다..
- (3) 와이어 기구의 조합으로 제어기구의 위치를 원격 검출할 수 있는 센서블록과 인터페이스장치를 제작하였다.
- (4) 기어 슈프트와 조속기 제어장치등을 결합한 변속제어기를 설계,제작하여 트랙터 속도제어기로 사용하였다.
- (5) 포텐서메터로부터 제어기의 위치신호를 획득하기 위하여 AMDF 디지털 필터 알고리즘을 적용하고 차단주파수를 11Hz로 하여 센서신호를 안정화 하였다
- (6) 전자제어형 트랙터의 시작기를 완성하고 조종장치를 제어할 수 있는 S/W를 개발하여 탑재하였다
- (7) GPS 신호에 따라 경로주행 시험을 한 결과 직선경로에서 20cm(rms), 곡선경로에서 최대 50cm(rms)오차를 나타내었음
- (8) 무인트랙터가 정확히 경로를 주행하기 위해서는 제어장치의 정밀도 뿐아니라 최적화된 주행 알고리즘과 측위신호의 안정화가 주행오차에 큰 영향을 미치는 것으로 나타나 이들 기술을 개발하기 위한 별도의 연구가 있어야 할 것으로 판단되었다.

5. 참고문헌

1. Bradford Parkinson, Gabriel Elkaim, 1997, System Identification of a Farm Vehicle Using Carrier Phase Differencial GPS, Stanford University Technical Report
2. Osamu YUKIMOTO, Yosuke MATSUO, 1997, Navigation Technology for Tilling Robots, International Symposium On Mobile Agricultural Bus-System LBS and PA For the Large-Scale Farm Mechanization
3. Alessandro Saffiotti, 1997, Handling uncertainty in control of autonomous robot, Technical Report TR/IRIDIA/97-8
4. 巖崎浩一. 1996. 農作業機械の 位置檢出に 研究-GPS 利用による 側衛精度について-. 第55回 日本農業機械學會 年次大會 講演要旨.pp. 301~302.
5. 並河 清. 1996. 晝像處理による 無人追從方式の 研究. 第55回 日本農業機械學會 年次大會 講演要旨.pp. 299~300.
6. 최창현. 1990. 위치측정장치를 이용한 트랙터의 자동주행장치. 한농기지Vol.15.
7. 村住勝彦. 1996. 晝像處理による 農用車輛の 位置計測. 第55回 日本農業機械學會 年次大會 講演要旨.pp. 299~300.
8. Matthew A. Turk, David G. Morgenthaler and Mattin Marra. 1988. VITS-A Vision System for Autonomous Vehicle Navigation. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence. vol. 10. no. 3. pp.342~361