

기계시각과 퍼지 제어를 이용한 경운작업 트랙터의 자율주행[†]

Autonomous Tractor for Tillage Operation Using Machine Vision and Fuzzy Logic Control

조성인* 최낙진* 강인성*
정회원
S. I. Cho N. J. Choi I. S. Kang

SUMMARY

Autonomous farm operation needs to be developed for safety, labor shortage problem, health, etc. In this research, an autonomous tractor for tillage was investigated using machine vision and a fuzzy logic controller(FLC). Tractor heading and offset were determined by image processing and a geomagnetic sensor. The FLC took the tractor heading and offset as inputs and generated the steering angle for tractor guidance as output.

A color CCD camera was used for the image processing. The heading and offset were obtained using Hough transform of the G-value color images. 15 fuzzy rules were used for inferencing the tractor steering angle.

The tractor was tested in the field and it was proved that the tillage operation could be done autonomously within 20cm deviation with the machine vision and the FLC.

주요용어(Key Words) : 자율주행(Autonomous guidance), 기계시각(Machine vision), 지자기 센서(Geomagnetic sensor), 퍼지논리제어(Fuzzy logic controller), 트랙터(Tractor)

1. 서 론

1960년대 이후 산업화의 결과 급격히 감소된 농업 노동력의 수급문제를 해결하기 위해 농업기계의 보급이 증가하였다. 그러나 농업 인구의 절대적인 감소와 함께 발생한 농업노동력의 고령화(高齢化) 및 부인화(婦人化) 등은 농업기계의 효율적이고 적합한 사용에 큰 장애가 되고 있다. 또한 작업 환경이 자연환경이라는 특성상 각종 진동 및 사고 위험으로 인해 농업기계의 운전시 육체적 피로 및 사고 위험 등의 문제점을 안고 있어 이러한 문제들을 해소하기 위해 농작업의 자동화 및 무인화에 관한 연구의 필요성이 대두되었으며 농작업에 있어서 경운 동력기와 더불어 가장 많이 사

용될 뿐 아니라 다양한 용도로 사용되고 있는 트랙터의 자율주행 기술의 개발은 농작업의 무인화를 위한 시작단계라 할 수 있다.

트랙터의 자율주행을 위해서는 여러 기술이 통합적으로 요구된다. 특히 직선부를 포함하여 회전까지 고려한 자율주행을 위해서는 DGPS가 필수적이라 할 수 있다. 그러나 DGPS의 경우, 수신 신호가 안정되기까지 어느 정도의 시간이 요구되며 건물을 비롯한 장애물이 근처에 있을 경우 신호가 단락되거나 위치 오차가 커질 가능성이 있다. 이런 경우를 대비하고 직선부의 정밀한 자율주행을 위해서는 기계시각과 같은 직접적인 경로탐색기술과 이를 이용한 조향 제어 기술이 요구된다.

경로탐색 기법 및 조향 제어에 관한 다양한 연

[†] 본 연구는 1999년도 농촌진흥청 특정연구사업(과제번호 98-1515)에 의해서 수행되었음.

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

구가 보고되고 있다. Li 등(1994)과 Klassen 등(1994)은 트랙터에 작업기를 부착하고 영상처리를 통하여 이를 지능 조향하는 알고리즘을 개발하였다. Toda 등(1993)은 일반적인 차량의 시각기 모형(prototype)을 만들고, 퍼지제어기를 이용하여 조향이 가능함을 보였다. Kehtarnavaz 등(1991)은 입체영상을 이용하여 앞차의 경로를 추적하여 따라가는 시스템을 개발하였다. 앞차의 경로뿐만 아니라 안전한 거리를 유지하도록 설계되었으며, 차의 앞에 2개의 카메라를 설치하여 입체영상을 획득하였다. Hata 등(1993)은 컬러 라인 센서를 사용하여 경운기(cultivator)의 자율주행을 위한 작물 열 검출기(crop-row detector)를 개발하였다. 작물 열을 검출하기 위해 RGB 칼라시스템의 R과 G신호가 사용되었고 작물 열과 검출기 사이의 방향각과 오프셋(offset)이 측정되었다. Klassen 등(1994)은 작업기의 끝에 비디오 카메라를 설치하고 영상처리시스템을 이용하여 경운된 토양과 경운되지 않은 토양의 경계와 잘려진 작물과 서있는 작물사이의 경계를 찾아내는 센서를 개발하였다.

본 연구는 기계 시각을 이용하여 경운 작업 트랙터의 직선 주행 경로를 탐색하는 기법에 관해 연구하였고, 작업 현장의 지면상태로 인해 야기되는 진동 등의 예측 할 수 없는 오차를 보정하기 위해 퍼지 논리를 이용한 조향 제어 기술에 관해 연구하였으며 포장에서의 주행 실험을 통해 트랙터의 자율주행의 가능성을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

가. 자율주행시스템의 구성

본 연구에서는 트랙터의 자율주행시스템을 컬러 CCD 카메라와 지자기 센서로 구성하였으며 전체 구성은 그림 1과 같다. 트랙터의 조향은 퍼지제어를 통해 이뤄진다. 컬러 CCD 카메라로부터 얻어진 영상신호의 처리결과인 방향각과 지자기 센서로부터 얻어진 방향 각 및 영상 내에서 현재 주행 경로와 이상 경로와의 거리차이(오프셋)를 퍼지 제어기의 입력으로 사용하였으며 퍼지추론을 수행한 후에는 조향 각을 출력으로 도출하게 된다. 실험에서 사용된 트랙터는 (주) 대동공업에서 제작된 L2601-4WD모델이었다.

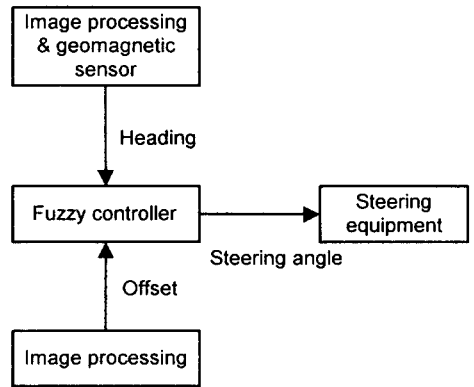


Fig. 1 Structure of the autonomous guidance system.

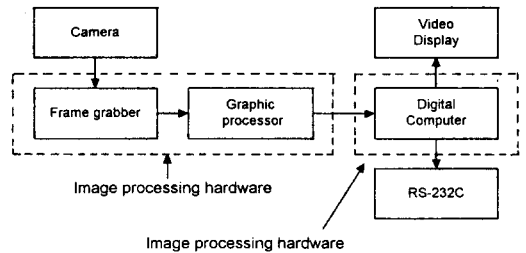


Fig. 2 Machine vision system.

나. 기계시각 시스템의 구성

영상처리 시스템은 기계에 시각적 정보를 인식·이해시키는 것을 목적으로 한다. 본 연구에서는 경지 정리된 포장의 영상을 획득하여 경운지역과 비 경운지역의 경계를 추출하고, 이를 이용하여 트랙터의 조향 각을 산출하였다. 실험에 사용된 영상처리 장치는 CORECO社의 OCULUS-TCX/MX frame grabber와 PULNIX社의 Color CCD 카메라이며 frame grabber의 해상도는 512×512에서 768×575 사이로서 처리속도를 감안하여 해상도를 조절할 수 있도록 프로그램을 작성하였다. 본 연구에서 사용된 기계시각 시스템은 그림 2와 같이 구성되었으며 기계시각에 의해 획득된 영상은 그림 3의 순서로 처리되었다.

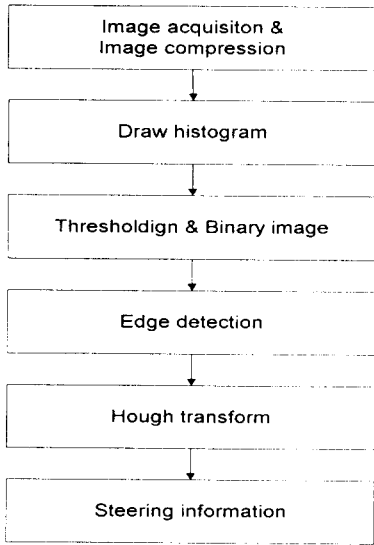


Fig. 3 Flowchart of image processing.

다. 지자기 센서

기계시각 및 영상처리에 의해 제공된 조향 정보는 트랙터 진동으로 인한 카메라의 미세한 각도차이에 의해 어느정도 보정을 요하게 된다. 이를 보정하는 방법으로는 여러 가지가 있을 수 있으나 본 연구에서는 남북방향의 지구자기장을 감지하여 변화된 각 변위의 양을 측정할 수 있는 지자기 센서를 사용하였다. 본 연구에 사용된 지자기센서는 그림 4에 제시된 미국의 KVH社에서 제조한 C100 COMPASS ENGIN 이었다. 이것은 이축 도우넛형 환형코어 센서형식으로 마이크로프로세서로 작동되는 독립형 플럭스게이트 콤파스이다. C100의 분해능은 $\pm 1^\circ$ 이고 재현성은 $\pm 0.2^\circ$ 이다. C100에는 자동 보정 알고리즘이 C100의 전자회로보드에 장착된 마이크로프로세서에서 작동하여 운동체와 연관되는 자기적 이상현상에 대해 보정하는 역할을 한다. C100은 62g 정도 무게가 나가고 8~18VDC에서 40mA의 전류가 흐르며 RS-232C 시리얼통신 인터페이스를 제공한다.

라. 퍼지제어기 구성

퍼지제어기의 영상처리로부터 얻어진 방향각과 지자기 센서로부터 얻어진 방향 각의 평균을 취한 트랙터의 방향각과 경운지역과 비경운지역의

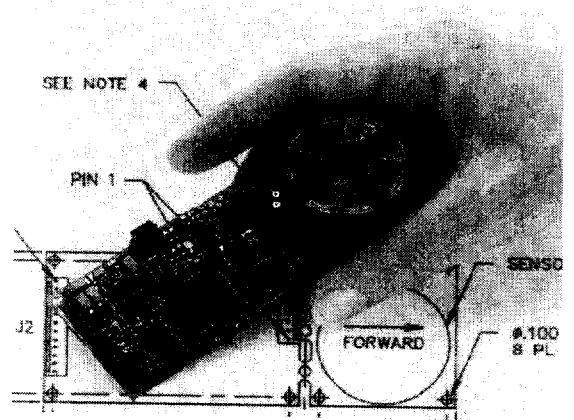


Fig. 4 The C-100 fluxgate compass engine.

Table 1 Linguistic variables of input "Heading"

LT	MD	RT
Left	Middle	Right

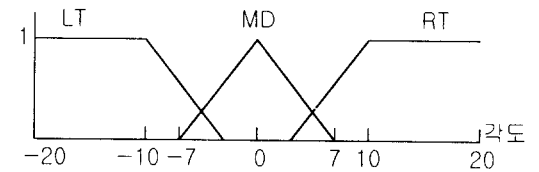


Fig. 5 Membership function of "Heading"

Table 2 Linguistic variables of "Offset"

LO	MO	RO
Left Offset	Middle Offset	Right Offset

경계선으로부터의 오프셋이 퍼지제어기의 입력변수로 선정되었다. 출력변수로는 트랙터의 주행에 필요한 조향 각으로 설정되었다. 방향각과 오프셋의 퍼지언어 변수는 표 1, 2, 3과 같고 각각에 해당하는 귀속도 함수는 그림 5, 6, 7에 나타내었다. 퍼지 추론을 위해 본 연구에서 사용된 규칙의 수는 15개로서 규칙의 형태는 IF <조건>, THEN <결론>의 형식을 취하며 조건부와 결론부 모두 하나 또는 그 이상의 퍼지 변수를 인자로 가질 수 있다. 퍼지 집합의 모양으로는 삼각형, 사다리꼴형, 종형 등이 사용되고 있는데 그 성능은 큰 차이가 없는 관계로 컴퓨터 상에서 표현이 편리하고 계산

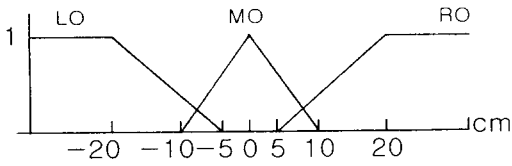


Fig 6. Membership function of "Offset"

Table 3 Linguistic variables of output "Steering angle"

LL	LM	LS	NP
Left Large	Left Medium	Left Small	No operation
RS	RM	RL	
Right Small	Right Medium	Right Large	

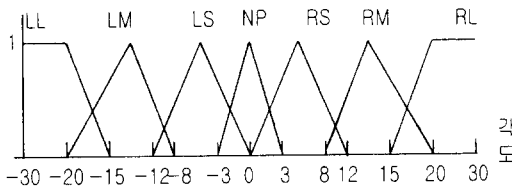


Fig. 7 Membership function of "Steering angle".

이 간단한 삼각형과 사다리꼴형이 주로 사용된다. 본 연구에서는 삼각형과 사다리꼴 모양을 같이 사용하였다.

마. 유압시스템의 구성

트랙터의 조향 제어를 원활히 하기 위해 유압시스템을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 유압시스템은 그림 8과 같으며 크게 복동 유압 실린더, 두 개의 3 port 4 way 방향제어 밸브, 두 개의 플로우콘트롤 밸브, 하나의 orbitrol steering valve, 한 개의 릴리프 밸브와 유압펌프로 구성되어 있다. 방향제어 밸브는 컨트롤러에서 나오는 신호를 이용하여 유압의 방향을 제어하기 위하여 그림 9와 같은 솔레노이드 밸브를 사용하였다. 솔레노이드 밸브는 PC에서 나오는 유압실린더 구동신호를 3 state 1 output port를 갖는 8255 I/O chip을 사용하였다.

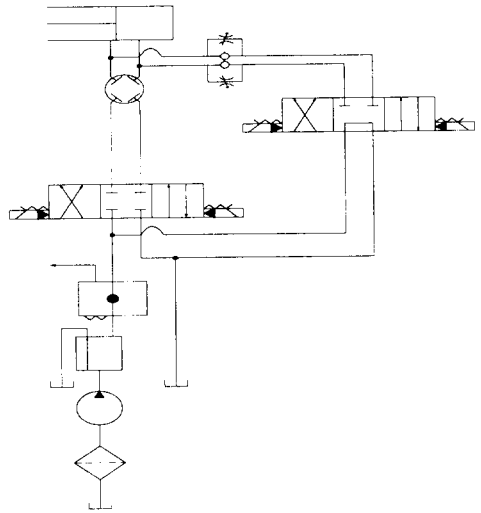


Fig. 8 The hydraulic system.

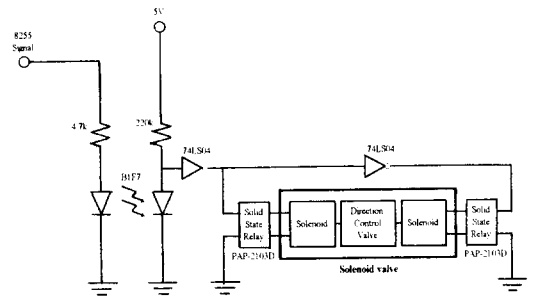


Fig. 9 Circuit for the hydraulic cylinder.

8255에서 신호가 출력되면 포토아이솔레이터를 거쳐 이 신호가 솔리드 스테이트 릴레이를 구동하게 되고 솔레노이드가 방향제어 밸브를 구동하여 유압실린더가 움직이게 된다.

바. 성능 평가 방법

트랙터의 자율주행 성능 평가 방법은 이상적인 경로와 퍼지 제어에 의한 경로를 비교하여 그 차이를 RMS 값으로 계산하였다. 식(1)은 RMS값을 계산하는 방법이다.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum (deviation)^2}{number\ of\ data}} \dots\dots\dots \text{식(1)}$$

deviation : 이상적인 경로와 실제 주행경로와의 차
number of data : 수집된 데이터의 수

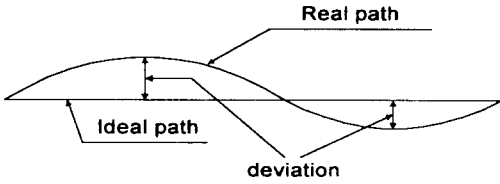


Fig. 10 Deviation of the paths.

3. 결과 및 고찰

가. 영상처리 결과

(1) 해상도의 결정

본 연구에서는 영상처리 시간을 줄이기 위해 frame grabber에서 표준 해상도로 지원하는 640×480의 영상을 80×60의 영상으로 압축하였다. 영상압축 결과 120×120 영상은 전체 영상처리 알고리즘을 수행하는데 3.5~4.2초가 소요되는데 비해 80×60 영상 처리의 경우 0.7~1.0초의 시간이 소요되었으며 해상도를 줄인 후의 영상처리 결과는 거의 차이가 없었으므로 자율주행 포장 실험시에는 80×60 크기의 영상을 획득하였다.

(2) 방향각 획득

획득된 영상을 이용하여 트랙터의 방향각을 획득하기 위해서는 영상을 이치화하고 경계를 추출한 후 Hough transform을 이용하여 영상을 처리하는 과정을 거치게 된다. 영상을 이치화하기 위해서는 영상의 히스토그램을 이용하게 되는데 본 연구에서는 컬러 영상의 R, G, B 각각의 히스토그램을 획득하였다. 그림 11은 G 값의 히스토그램이다. 이 히스토그램을 이용하여 본 연구에서는 탐색기법의 일종인 반복적 선택법을 사용하여 영상을 이치화하였으며 획득된 이치화 된 영상은 그림 12와 같다. 이치화 된 영상은 sobel mask를 이용하여 경계를 탐색하였다. 그림 13는 그림 12의 영상을 sobel mask를 이용하여 경계를 탐색하여 획득된 영상이다.

영상의 경계를 탐색한 후에는 마지막으로 Hough 변환을 이용하여 영상에서 보이는 경운 지역과 비경운지역의 경계를 직선 방정식으로 변형시키게 되며 이 때의 직선의 방정식은 다음의 식 (2)와 같다.

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho \dots\dots\dots \text{식(2)}$$

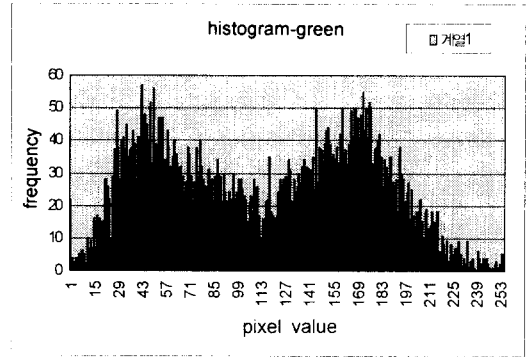


Fig 11. histogram for G value.

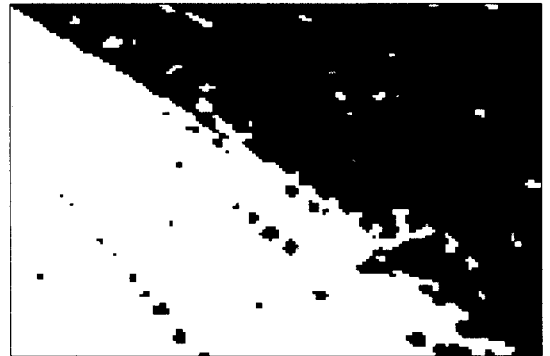


Fig. 12 Binary image.



Fig. 13 Edge-detect image.

여기서 θ 는 직선에 대한 normal vector의 각도이고 ρ 는 normal vector의 크기이다. 영상의 가운데를 중심으로 그림 13을 Hough 변환한 후의 결과는 그림 14와 같다. 즉, $\theta = 45^\circ$, $\rho = 0$ 일 때가 조향을 위한 작업선의 정보가 된다.

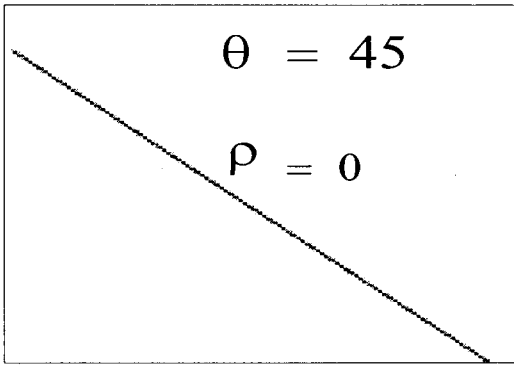


Fig. 14 Detected line after Hough transform.

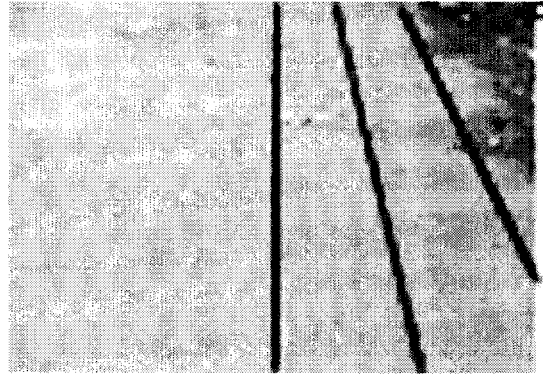


Fig. 16 Image 2 for calibration.

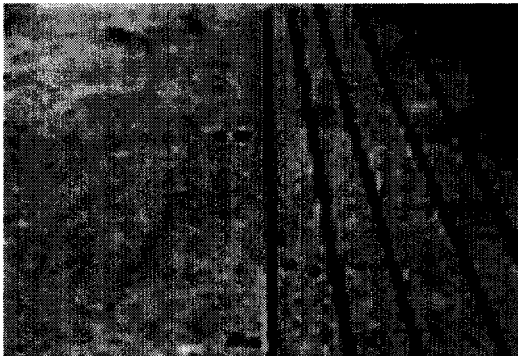


Fig. 15 Image 1 for calibration.

(3) 방향각 calibration

실 세계에서 Scene은 카메라에 잡히면서 원근법에 의하여 왜곡되어 나타난다. 그러므로 영상처리 후 정확한 방향각과 오프셋을 도출하기 위해서는 영상의 calibration이 필요하게 된다. 카메라에 잡히는 영상은 카메라의 설치각에 따라 다른 왜곡현상을 보이므로 미리 카메라의 설치각을 설정해 놓아야 한다. 본 연구에서는 트랙터의 회전반경(4m)을 고려하여 설치각(tilt angle)을 68°로, pan angle은 0°로 결정하여 카메라를 설치하였다. 원근에 의한 영상왜곡은 기준 점으로부터 얼마나 떨어져 있는가에 따라 그 거리와 각도의 차이가 변하게 되어 있다. 본 연구에서는 이런 차이를 보정하기 위해서 기준 점으로부터 떨어져 있는 거리(오프셋)와 그에 해당하는 기울기가 각각 비례적으로 변한다고 가정하였다. 그림 15와 16은 방향각을 calibration하기 위해 서울대학교 농공학관의 실험동 뒤 야외에서 획득한 기준영상이다. 영상에서 보이는 선은 테이블을 20 cm와 40cm 간격으로

평행하게 땅에 붙인 것이다. 그림에서 보듯이 평행선들이 원근에 의해 기울어져 영상이 왜곡되어 있다.

획득한 영상의 중앙 수직선에 대해 평행선들의 떨어진 거리는 영상의 중앙 점을 기준으로 Hough 변환한 결과로 얻어진 normal vector의 크기(픽셀 수)와 비례관계에 있다고 가정하였다. 영상의 중앙선을 기준으로 80cm 떨어진 선의 normal vector의 크기의 픽셀 수는 30개였다. 따라서 영상 내에서 중앙 기준선을 기준으로 픽셀 수 만큼 떨어진 지점을 cm 단위로 변환하는 식은 식 (3)과 같다.

$$\rho = \frac{8}{3} \times \rho_m \dots\dots\dots \text{식(3)}$$

ρ : 변환후의 오프셋(cm)

ρ_m : 영상에서 측정된 오프셋의 pixel 개수

또한 각 선들은 어느 선을 중심으로 하여 떨어진 거리만큼 기준선과의 각도차이가 변하게 된다. 본 연구에서는 앞서 밝힌 바와 같이 이 차이의 변화를 비례적으로 가정하였다. 기준선을 중앙선으로부터 80cm 떨어진 선을 기준으로 하였다. 기준선의 경우 Hough 변환한 결과 영상 내에서 중앙선을 기준으로 27° 기울어져 있었으며 기준선을 중심으로 40cm 떨어진 가운데 선의 경우 기준선과 약 13°의 각도 차를 보였다. 따라서 기준선으로부터 x_d 만큼 떨어진 지점에서의 보정된 방향각은 식 (4)로 정리할 수 있다.

$$\theta_c = \frac{13}{40} \times \rho_c + \theta_m \dots\dots\dots \text{식(4)}$$

θ_c : 보정후의 방향각

ρ_c : 영상에서의 기준선으로부터의 오프셋(cm)

θ_m : Hough-transform 결과 얻어진 영상에서의 방향각

(4) 조향각 결정

그림 15와 16의 영상에서의 중앙선으로부터 80cm 우측에 떨어진 선을 기준직선으로 정했기 때문에 처음 영상처리 결과 도출되는 방향각과 오프셋을 기준직선에 대한 방향각과 오프셋으로 다시 계산해야 한다. 그 식은 아래의 식 (5), (6)와 같으며 그림 17로 나타내었다.

$$\theta = \theta_c - \theta_b \dots\dots\dots \text{식(5)}$$

θ : 최종적으로 결정되는 조향각

θ_c : 보정 후의 방향각

θ_b : 기준직선의 영상처리후 방향각

$$\rho = \rho_c - \rho_b \dots\dots\dots \text{식(6)}$$

ρ : 최종적으로 결정되는 오프셋

ρ_c : 변환 후의 오프셋

ρ_b : 기준직선의 실제 오프셋

나. 트랙터 자율주행 포장실험

포장실험은 농생대 부속농장에서 비 내린지 4일 후 1차 실험을 하였고 지반이 건조한 때 2차 실험을 실시하였다. 포장실험에서는 주행 시뮬레이션 실험과 마찬가지로 퍼지 제어를 쓴 것과 퍼지 제어를 쓰지 않은 것 두 가지로 나누어 실험하였다. 실험에 사용된 트랙터의 출력이 약하고 로타리 작업을 수행하면서 실험을 하게 될 때 컴퓨터 등 시스템이 불안하게 되는 등의 문제가 있었으므로 포장에 먼저 직선으로 로타리 작업을 한 후 실제 실험 시에는 트랙터에 부착된 DGPS수신기를 이용하여 deviation을 측정하였다. 직선주행 경로의 길이는 40m였다. 1차 실험에서 퍼지 제어를 사용하지 않고 5회의 실험을, 2차 실험에서는 퍼지 제어를

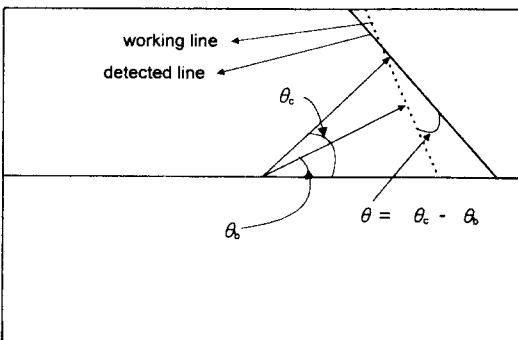


Fig. 17 Determination of steering angle.

Table 4 Experimental results 1 without the FLC

Trial	RMS(cm)
1	28.3
2	34.7
3	25.4
4	29.6
5	32.4

Table 5 Experimental result 2 without the FLC

Trial	RMS(cm)
1	25.5
2	23.9
3	25.3
4	22.4
5	28.5

Table 6 Experimental result 2 with the FLC

Trial	RMS(cm)
1	18.6
2	23.2
3	19.7
4	18.3
5	21.2
6	19.3
7	20.8
8	18.4
9	19.6
10	22.1

사용하여 10회, 퍼지 제어를 쓰지 않고 5회씩을 실시하였다. 초기 위치는 25cm의 오프셋을 주었고 차량의 방향(heading)은 주행경로와 평행이 되도록 하였다. 이러한 방식으로 수행한 1, 2차 실험결과는 표 4, 5, 6에 나타내었으며 그림 18, 19, 20은 각각의 조건에서의 주행 실험 결과를 보여준다.

실험결과 평균 약 20~30 cm 사이의 오차를 보였으며 퍼지 제어를 사용한 경우 동일한 포장조건에서 퍼지제어를 사용하지 않은 경우보다 오차가 적은 것으로 나타났다. 또한 건조한 포장에서의 주행이 약간 젖어있는 포장보다 주행성능이 좋은 것으로 나타났다. 이는 젖은 포장에서의 저항이 건조한 포장에서보다 크기 때문으로 판단된다.

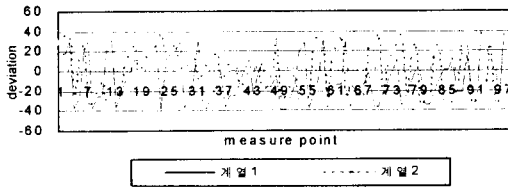


Fig. 18 Deviation of tractor travel without the FLC(experiment 1).

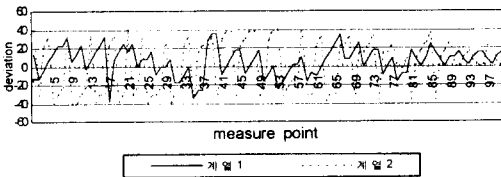


Fig. 19 Deviation of tractor travel without the FLC(experiment 2).

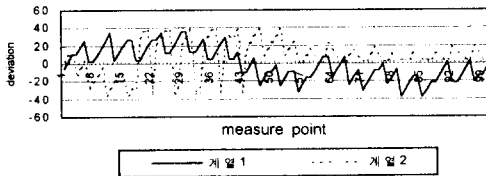


Fig. 20 Deviation of tractor travel with the FLC(trial 6-7).

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 트랙터의 자율주행을 위하여 기계시각과 지자기센서를 이용한 퍼지제어기를 개발하였다. 퍼지제어기는 기계시각에서의 영상처리 결과인 주행방향과 지자기센서의 방향각(heading)의 평균을 취하여 트랙터의 방향각으로 결정하여 하나의 입력으로 받고 영상처리 결과 도출되는 오프셋을 또 다른 입력으로 받았다. 이것을 이용하여 퍼지추론을 한 후 조향각을 퍼지제어기의 결과로 가진다. 이를 위하여 영상처리 알고리즘을 개발하였고 지자기 센서를 장착하였다.

영상처리를 위해서는 한 대의 color CCD 카메라와 color frame grabber를 사용하였다. 영상처리 알고리즘은 카메라를 통해 영상을 획득하고 처리 시간을 단축하기 위해 압축을 하였다. 그리고 획득한 영상으로부터 히스토그램을 구성한 후 이치

화를 위한 문턱값을 반복적 선택법으로 결정하였다. 결정된 문턱값으로부터 이치화를 수행하고 sobel operator를 사용하여 경운영역과 비 경운영역의 작업선 경계 검출을 하였다. 그리고 검출된 작업선 경계의 정보를 알아내기 위해 Hough transform을 이용하여 방향각과 오프셋을 구하였다.

포장에서 실제 실험결과 영상처리와 지자기센서를 이용하여 자율주행이 가능함을 알 수 있었다. 더욱 향상된 트랙터의 자율주행을 위해서는 조향에 필요한 제어간격을 1초 이내로 줄이고 외란에 강한 지자기센서를 사용할 필요가 있다. 트랙터의 회전을 포함한 완전한 자율주행은 향후의 과제로서 간단한 회전을 위해서는 엔코더와 지자기센서를 이용하여도 가능할 것이지만 측정오차가 큰 문제가 된다. 그래서 근래에 측정오차가 대단히 정밀한 DGPS와 기계시각을 결합하면 회전을 포함한 더욱 정밀한 자율주행을 수행할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Hata, S., Takai, M., Kobayashi, T. and Sakai, K. 1993. Crop-row detection by colour line sensor. Proceedings of the International Conference for Agricultural Machinery & Process Engineering. The Korean Society for Agricultural Machinery. Seoul(Korea). pp 353-362.
2. Kehtarnavaz, N. and Griswold, N. C. 1991. Visual Control of an Autonomous Vehicle (BART) - The Vehicle - Following Problem. IEEE Trans. on Vehicular Tech. 40(3):654-661.
3. Klassen N. D., Wilson R. J. and Wilson J. N. 1994. Guidance Systems for Agricultural Vehicles. Proceedings of XII World Congress on Agricultural Engineering, International Commission of Agricultural Engineering, CIGR. pp 1136-1142.
4. Li, Y. and Wilson, J. N. 1994. Development of An Intelligent Steering Control Algorithm for Vision-Based Agricultural Vehicle Guidance. ASAE Paper No. 943513, Winter Meeting.
5. Li, Y. and Wilson, J. N. 1994. Simulation Study of A Vision-Based Agricultural Vehicle Guidance System. ASAE Paper No. 943608., Winter Meeting.
6. Toda, M., Kitani, O., Okamoto, T. and Tori, T. 1993. Studies on Autonomous Vehicles for Agricultural Robotics. ASAE Paper No. 933091, Summer Meeting.