한국농업기계학회지 제22권 제4호. pp. 487~496. 1997

DGPS와 퍼지제어를 이용한 스피드스프레이어의 자율주행(Ⅰ)
- 그래픽 시뮬레이션 -

Autonomous Speedsprayer Using DGPS and Fuzzy Control(Ⅰ)
- Graphic Simulation -

조 성 인* 이 재 훈* 정 선 옥**
정회원 정회원 정회원
S. I. Cho J. H. Lee S. O. Chung

ABSTRACT

A fuzzy logic controller(FLC) was developed for the autonomous travel of speedsprayer in an orchard. The autonomous travel with the FLC was graphically simulated under the conditions of an ordinary standard orchard. Differential global positioning system(DGPS) was used to find the direction of running and four ultrasonic sensors were used to detect obstacles during the running.

The simulation results showed that the speedsprayer, by the FLC combined with DGPS and the ultrasonic sensors, could overcome the turning problem at corners which could not be solved with such a system as machine vision and might be operated autonomously.

주요용어(Key Words): 스피드스프레이어(Speedsprayer), 시뮬레이션(Simulation), 퍼지논리제어(Fuzzy Logic Control), DGPS(Differential Global Positioning System), 초음파센서(Ultrasonic Sensor)

1. 서 론

우루과이 라운드 협상의 타결 및 WTO 체제 출범 이후 성립된 세계경제의 자유 경쟁 체제로 인한 외국산 농산물의 국내유입은 아직 영세한 수준인 국내 농업에 큰 타격을 주고 있다. 이런 상황에서 국내 농산물의 경쟁력을 향상시키기 위해 농산물의 품질 향상 및 생산비 절감을 위한 연구가 다양하게 진행 중이다. 그 중 농업기계 분야에서는 농업기계의 자동화와 지능화에 대한 연구가 활발히 진행중이며 요소기술로는 각종 센서와 신경회로망, 퍼지이론 등 인공지능 기술이 응용되고 있다.

이러한 시점에 농산물의 생산 단계에서 병충해를 감소시켜 농산물의 품질과 생산성을 향상시키고 농민과 자연환경을 농약피해로 부터 보호하기 위한 정밀 방제 및 무인방제 시스템이 최근 연구과제로 부각되고 있다. 특히, 방제에 의해 병해충의 피해를 줄이면 30~35%의 손실을 방지할 수 있다고 한다

* 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과 농업기계전공
** 농촌진흥청 농업기계화연구소

(Rama, 1991).

방제 작업의 경우 노동 투여 시간이 다른 작업보다 상대적으로 크며(41시간/10a), 작업시기도 특정 시기에 집중적으로 이루어지는 적기성이 있다. 이러한 이유로 방제 노동력의 심각한 부족현상이 발생하고 있으며 더욱이 유해한 작업환경은 이를 더욱 더 가중시키고 있다. 따라서 농민을 농약피해로 부터 보호하고 작업환경을 개선할 수 있는 무인방제시스템이 시급히 필요한 실정이다.

이러한 무인방제시스템은 과수원내에 시설물을 설치하는 것과 방제기 자체를 자율 주행하게 하는 것으로 나눌 수 있는데 과수원내에 시설물을 설치하는 것은 설치비와 더불어 타작업에 방해요소가 되는 문제점이 있다. 또한 과수원내에 유도장치를 설치하여 방제기가 그것을 따라가게 하는 시스템(장 등, 1995)도 유도장치가 설치된 과수원내에서만 자율 주행이 가능하다는 단점이 있다. 따라서 현재는 과수원내에 어떠한 설치물도 없이 방제기 자체를 자율주행하게 하는 시스템의 개발을 목표로 많은 연구가 진행중이며 그러한 목표로 개발된 시스템이 영상처리나 근접센서, 지자기 센서 등을 이용한 자율 주행 시스템이다. 그러나 영상처리 기법만을 이용하여 농용차량을 제어한 경우(조 등, 1996; 기 등, 1996; Li 등, 1994; Klassen 등, 1994) 작업기의 회전은 고려하지 않았으므로 포장 전체의 자율 주행은 불가능하며 지자기 센서와 이동거리 측정 센서를 이용한 시스템도 오차가 누적되므로 어느 한계 이상의 자율 주행은 불가능하다고 할 수 있다.

이러한 이유로 DGPS의 사용이 신중히 고려되고 있는데 Vetter(1996)는 DGPS를 이용한 농용차량의 자율주행 가능성을 평가하였다. DGPS를 이용하여 주행한 차량을 비디오카메라로 녹화한 후 정확도를 분석한 결과 1m이하의 편차로 자율주행 할 수 있음을 제시하였다. 또한, Stafford 등(1994)은 농작업장에서 위치정보 취득에 GPS가 기존의 다른 시스템보다 우수하다는 것을 보이고 포장실험을 통해 그 응용 가능성을 제시하였으며, 많은 연구자들이 DGPS의 정밀도를 분석하여 그 응용성을 제시하였다(Clark 등, 1994; Rupert 등, 1994; Larsen 등, 1994; Borgelt 등, 1996). 또한 항공방제시 DGPS를 이용하면 작업자의 안전과 비용 감소를 도모할 수 있다는 연구결과도 발표되고 있다(Ardila, 1996).

스피드스프레이어는 방제 작업의 효율화를 위해 과수원에서 널리 사용되는 농약살포기계이다. 과수원에서 스피드스프레이어가 자율 주행을 하기 위해서는 주행 경로의 파악이 반드시 필요하며, 주행경로를 신속히 판단하여 스피드스프레이어가 자율 주행할 수 있도록 제어기를 설계하여야 한다. 본 논문은 DGPS와 퍼지제어기를 이용하여 스피드스프레이어의 자율주행이 가능함을 시뮬레이션으로 확인하는 것을 목적으로 한다.

2. 재료 및 방법

가. 자율주행시스템의 구성

본 연구에서는 스피드스프레이어의 자율주행 시

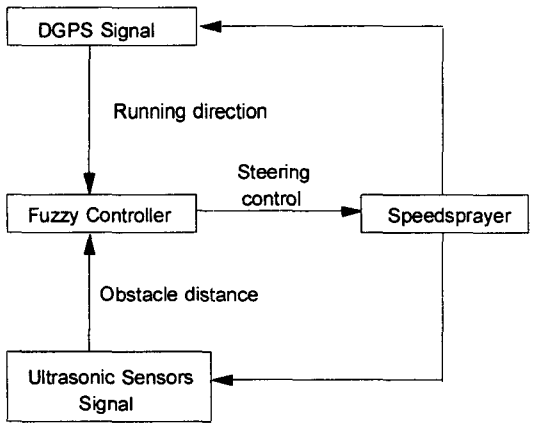

Fig. 1 A schematic of autonomous speed-sprayer.

스템을 DGPS와 초음파센서를 사용하여 구성하였으며 전체 구성은 그림 1과 같다. 스피드스프레이어의 조향은 퍼지제어기가 담당하며, DGPS 수신기로부터 얻어지는 주행방향과 초음파센서 신호로부터 입력받은 장애물과의 거리를 퍼지제어기의 입력으로 사용하였다.

나. DGPS 수신신호 생성 알고리즘

DGPS는 GPS의 오차요인을 많이 상쇄시켜 줄 수 있지만 몇 가지만은 보정해 줄 수 없는 오차 요인이 있다. 위성들의 배치관계로 생기는 오차와 DGPS의 안테나에 직접 수신되는 신호와 다른 물체에 맞고 반사되어 오는 신호가 중첩되어 유발되는 다중경로 오차가 그것이다. 이러한 요인으로 인해 DGPS수신기에는 약간의 오차를 포함하게 되는데 그림 2는 실제 DGPS 수신기의 수신 신호에서 나타난 위치 측정 오차 분포를 보여준다.

그림 2의 오차분포는 1997년 9월 1일 농촌진흥청 기계화연구소(위도:37.27403985, 경도:126.98296461)에서 획득되었으며 모두 275개의 데이터를 사용하였다. 사용된 DGPS 수신기는 NovAtel사의 RT-20™으로 제작회사에서 주장하는 2d RMS 오차는 20cm 이내로 상당히 정밀한 제품이다. 그림 2에서 보이듯이 대부분 데이터의 수신오차는 20cm 이내에서 정규분포를 이루었으며(위도는 5.54cm, 경도는 1.83 cm의 표준편차를 갖는다.) 가장 큰 오차도 40cm를 넘지 않았다.

본 연구에서는 이와 비슷한 정도의 오차를 갖고 정규분포를 보이는 신호를 발생시키는 알고리즘을 개발하여 그림 3과 같은 신호 분포를 얻었다. 그림 3에서 보여지는 점들은 난수를 발생시켜 정규분포를 나타내도록 하였으며 시뮬레이션 수행 시마다 그 분포의 모습은 다르게 되도록 하였다. 실제 수신기의 신호오차는 위도와 경도에 따라 다르므로 시뮬레이션에서는 보다 큰 오차인 위도오차를 기준으로 오차의 범위를 확대 조정하였다. 이는 주행방향이 어떠한 방향이더라도 위도와 경도의 오차 차이를 극복할 수 있기 때문이다.

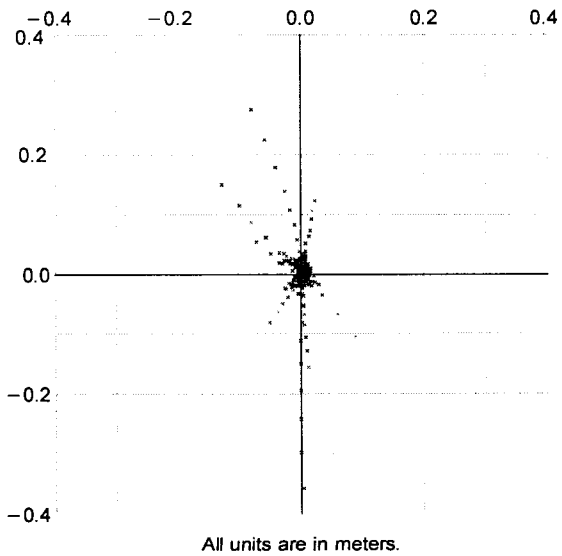

Fig. 2 Error distribution of DGPS receiver.

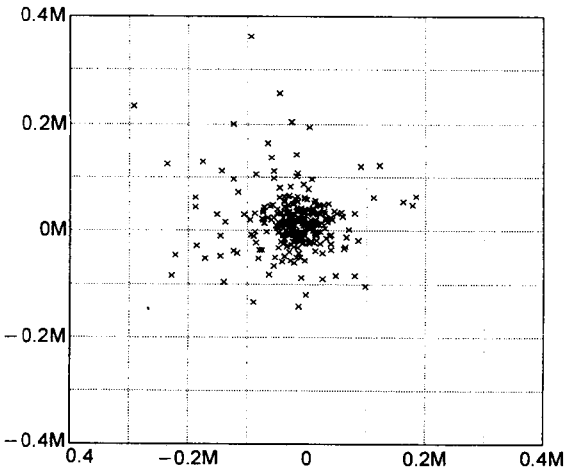

Fig. 3 Error distribution of DGPS receiver obtained by simulation algorithm.

다. 시뮬레이션 방법

시뮬레이션을 위해 그림 4와 같이 스피드스프레이어의 진행방향을 기준으로 폭 6m, 재식간격 5m인 과수원 표준 재식분포를 설정하였다. 그리고 스피드스프레이어의 속도는 저속 2단인 1.6km/hr로 하였으며 제어간격은 1초로 하였다. 또한 실제상황과는 다소 상이하지만 시뮬레이션의 편의를 위하여 과수원 지면의 상태는 경사가 없는 평평한 상태이고 스피드스프레이어의 바퀴와 지면사이의 슬립은 없다고 가정하였다.

DGPS 수신기와 네 개의 초음파센서는 그림 5와 같이 스피드스프레이어에 장착하였다고 가정하였다. 초음파센서의 방향은 그림 5에서 보이는 바와 같고 센서의 감지거리는 보유하고 있는 초음파센서

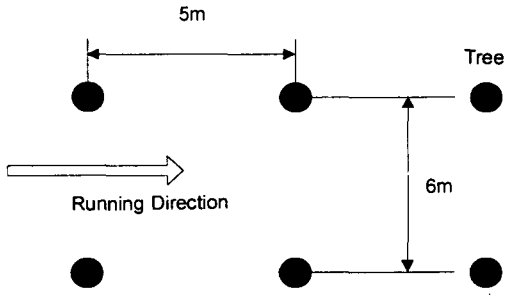

Fig. 4 Allocation of trees.

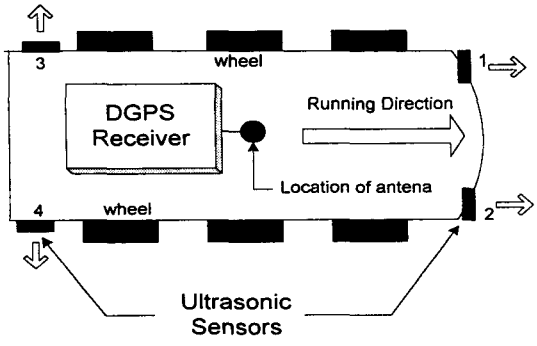

Fig. 5 Arrangement of DGPS receiver and ultrasonic sensors.

(Polaroid사 모듈제품)를 기준으로 4m 이하로 설정하였다.

DGPS를 이용하여 경로를 설정하게 되면 기지국(base station)을 원점으로 3차원 x, y, z 좌표를 얻을 수 있다. 이때 x와 y의 좌표면을 이용하여 스피드스프레이어가 따라가야 할 주행 경로를 일련의 (x, y) 좌표점들의 집합으로 나타내었다. 설정된 점들을 이용하여 스피드스프레이어가 주행할 때 DGPS 수신기로부터 받은 현재의 좌표와 바로 이전의 좌표를 이용하여 기체를 조향할 조향각을 결정하였다.

그림 6은 이러한 조향각을 설정하는 방법을 보여준다. 그림 6에서 $T_{-1}(x_{-1},\ y_{-1})$은 DGPS에서 얻은 바로 이전의 좌표이고, $T_{-0}\ (x_0,\ y_0)$은 DGPS에서 얻은 현재의 스피드스프레이어의 좌표이며, $T_{+1}\ (x_{+1}, y_{+1})$은 주행경로 설정시 좌표화한 가야할 곳, 즉 목표점이다. 이때, 이러한 좌표로 얻을 수 있는 벡터

$\vec{V}_{next} = (x_{+1} - x_0\ ,\ y_{+1} - y_0)$와

$\vec{V}_{prev} = (x_0 - x_{-1},\ y_0 - y_{-1})$을 이용하여 조향각 θ를 식 (1)과 같은 벡터 내적 공식으로 구하였다.

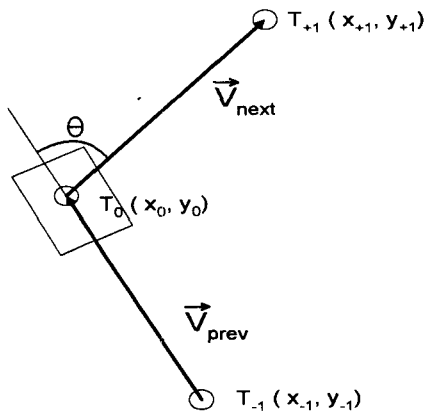

Fig. 6 Determining of steering angle.

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{\vec{V}_{next} \cdot \vec{V}_{prev}}{|\vec{V}_{next}||\vec{V}_{prev}|}\right) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

여기서,

$$\vec{V}_{next} \cdot \vec{V}_{prev} = (x_{+1} - x_0)(x_0 - x_{-1}) + (y_{+1} - y_0)(y_0 - y_{-1})$$

$$| \vec{V}_{next} | = \sqrt{(x_{+1} - x_0)^2 + (y_{+1} - y_0)^2},$$

$$| \vec{V}_{prev} | = \sqrt{(x_0 - x_{-1})^2 + (y_0 - y_{-1})^2}$$

식 (1)에서 구한 θ는 퍼지제어기의 입력으로 사용되었으며, 이러한 방식으로 $| \vec{V}_{next} |$ < 설정값 (0.5m)이 될 때까지 DGPS를 통해 새로운 $T_0(x_0, y_0)$ 점을 갱신한 후 이전의 $T_0(x_0, y_0)$ 점을 $T_{-1}(x_{-1}, y_{-1})$로 설정하여 새로운 θ를 구하였다. 만약 $| \vec{V}_{next} |$ < 설정값이면 일련의 미리 설정된 목표점 중 다음 목표점을 새로운 T_{+1} (x_{+1}, y_{+1}) 점으로 하여 위와 같은 알고리즘을 반복하였다.

본 논문에서는 시뮬레이션을 위해 그림 7과 같이 목표점을 정하였다. 즉 직선 주행시에는 회전하기 시작하는 점을 목표점으로 잡았고, 회전하는 경우에는 30° 간격으로 목표점을 설정하였다. 퍼지제어기는 이 목표점과 DGPS 입력인 현재 위치를 가지고 계산된 조향각을 입력받아 적절한 조향을 수행하게 하였다.

그림 8은 전체적인 시뮬레이션 알고리즘 구성도이다.

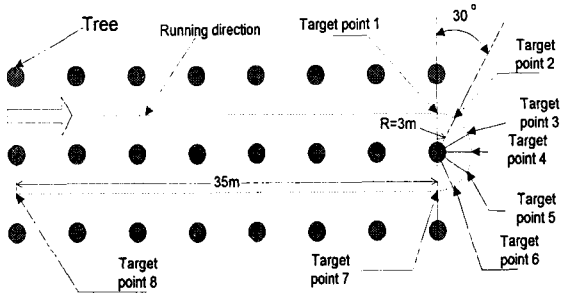

Fig. 7 Travel path consisted of target points.

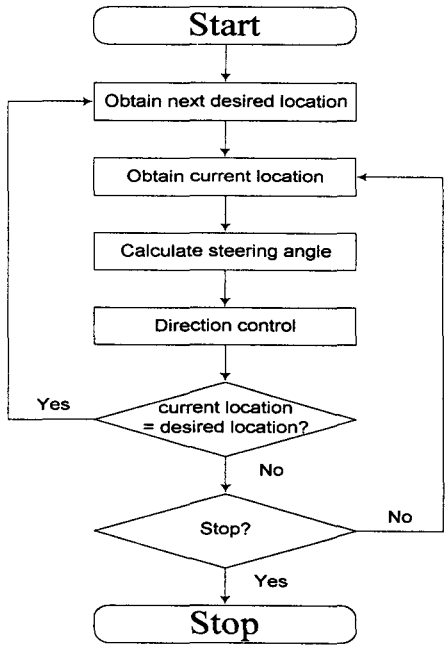

Fig. 8 Simulation Algorithm.

라. 퍼지제어기

퍼지제어의 입력 변수로는 DGPS 신호 처리 결과인 주행방향과 초음파센서 신호 네 개가 사용되었다. 출력 변수는 유압 조향장치의 유압 실린더 이동시간으로 설정하였다. 유압 실린더는 왼쪽과 오른쪽 실린더가 각각 독립적으로 작동하도록 하여 서로 다른 언어 변수를 갖도록 하였다. DGPS 신호 결과와

Table 1 Linguistic variables of "Direction"

MD	LT	RT
Middle	Left	Right

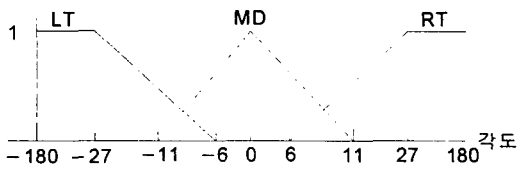

Fig. 9 Membership function of "Direction"

Table 2 Linguistic variables of "Ultrasonic input"

SH	MD	FA
Short	Middle	Far

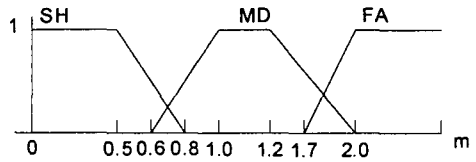

Fig. 10 Membership function of "Ultrasonic input"

Table 3 Linguistic variables of "Operation time of hydraulic cylinder"

LL	LM	LS	NP
Left Long	Left Medium	Left Short	No Operation
RS	RM	RL	
Right Medium	Right Long	Left Short	

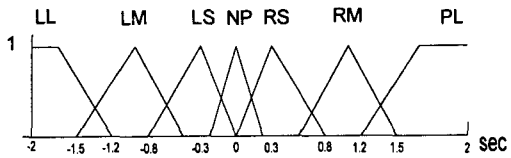

Fig. 11 Membership function of "Operation time of hydraulic cylinder"

```
IF
        [Direction          = LT ] and
        [US_Input_1         = DC ] and
        [US_Input_2         = SH ] and
        [US_Input_3         = DC ] and
        [US_Input_4         = DC ] ,
THNE
        [Cylinder_ time_    = LL ]
```

초음파 신호, 유압 실린더의 작동 시간에 대한 언어 변수는 표 1, 표 2, 표 3에 나타내었고, 각각에 해당하는 귀속도 함수는 그림 9, 그림 10, 그림 11로 나타내었다. 그림 11에서 양수는 오른쪽 실린더를, 음수는 왼쪽실린더를 의미한다.

본 연구에서 사용된 퍼지제어 규칙의 예는 다음과 같다.

If 절의 조건들은 퍼지제어에 사용되는 언어 변수를 의미하며, DC (Don't Care)는 입력 값에 상관없다는 것을 나타낸다. 이 규칙의 경우, DGPS 신호 처리 결과 주행 경로가 왼쪽에 위치하고, 그림 5의 2번 초음파센서와 가까운 곳에 장애물이 있을 때, 왼쪽 유압 실린더를 오랫동안 잡아당겼다가 놓으라는 것을 의미한다. 이 경우 스피드스프레이어는 왼쪽으로 조향하게 된다.

마. 성능평가 방법

스피드스프레이어의 자율주행 성능 평가방법은 이상적인 경로와 퍼지제어에 의한 경로를 비교하여, 그 차이를 RMS값으로 계산하였다.

식 (2)는 RMS값을 계산하는 방법이다.

$$RMS = \sqrt{\frac{\Sigma\ (deviation)^2}{number\ of\ data}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (2)$$

여기서, deviation은 이상적인 경로와 실제 주행과의 차이를 나타내고 number of data는 수집된 데이터의 수를 의미한다.

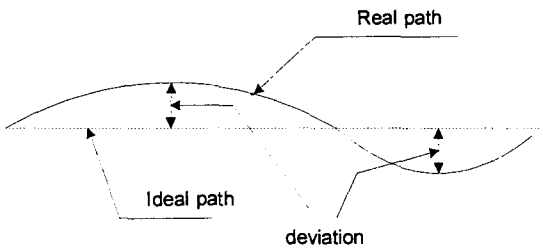

Fig. 12 Deviation of straight path.

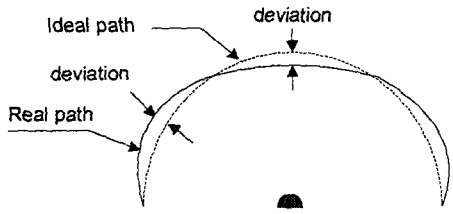

Fig. 13 Deviation of curved path.

그림 12와 그림 13은 이상적인 경로와 실제 주행경로와의 차이를 보여준다. 직선주행시에는 실제 주행경로와 이상적인 경로 사이의 거리로 deviation을 구하고, 회전시에는 회전 반경의 중심으로부터 실제 주행경로까지의 거리에서 반지름(3m)을 뺀 후 deviation을 구하였다

3. 결과 및 고찰

가. 조향각 결정 알고리즘 평가

가상 경로를 설정하여, 개발된 조향각 결정 알고리즘의 경로 추종 성능을 평가하였다. 시험 가상 경로는 그림 14와 같이 직선 경로, 직각 경로, 원호 경로 3가지로 설정하였으며 특히 원호 경로는 90° 와 180° 두 가지 경로를 설정하였다. 각각의 RMS값은 11.5cm, 50.3cm, 18.6cm, 18.9cm 였으며 그림에서 보이듯이 개발된 알고리즘은 설정된 주행경로를 따라 주행할 수 있음을 확인하였다.

나. DGPS만을 이용한 자율주행 시뮬레이션

초음파센서의 영향을 알아보기 위해 DGPS만을 이용하여 그림 7에서 설정한 파수원 환경에서 자율주행 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 10회 실행하였으며 각각의 RMS 값은 표 4와 같다. 특히 첫 번째와 여섯 번째 시뮬레이션은 각 제어단계에서의 deviation을 구해 그림 15에 나타내었다.

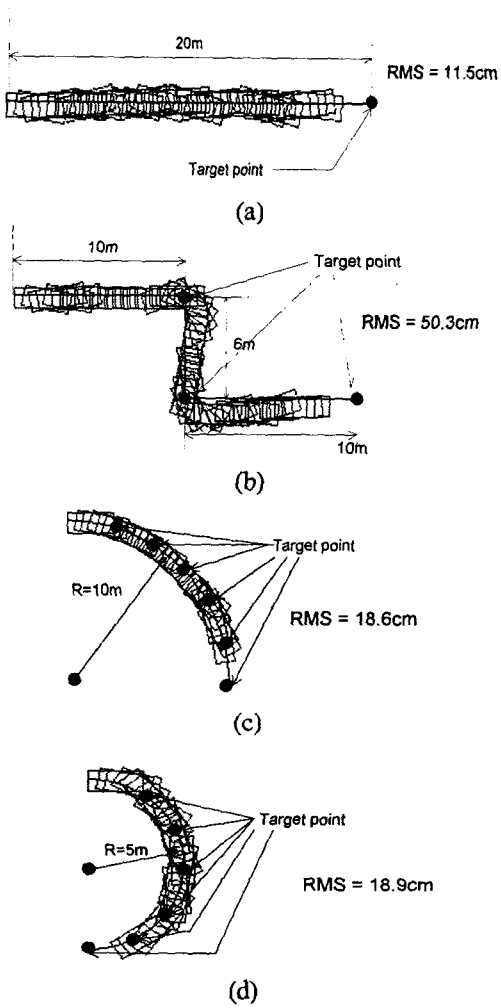

Fig. 14 Evaluation of the method for determining running direction.

Table 4 RMS error values with only DGPS signals (10 trials)

Trial	RMS Value (cm)	Trial	RMS Value (cm)
1	46.87	6	30.25
2	22.99	7	47.89
3	23.58	8	30.41
4	42.90	9	36.62
5	35.51	10	33.42

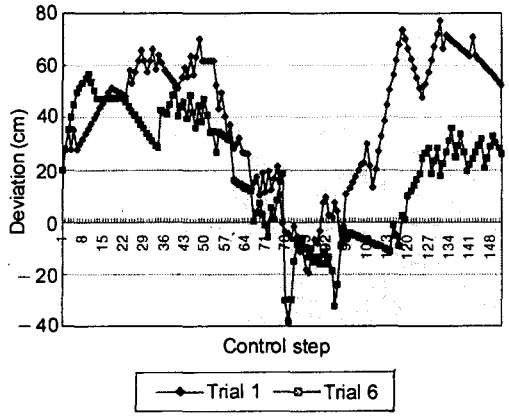

Fig. 15 Sequential deviation for trial 1 and 6.

그림 15에서 종축에는 deviation을 횡축에는 제어 단계를 나타내었다. 제어는 1초에 한 번씩 이루어졌으므로 제어단계는 시간(초)과 같다고 볼 수 있다. 횡축의 75와 100 사이에서 회전이 이루어지는데 그림에서 보이듯이 직선 주행시는 deviation이 크고 곡선 주행시는 deviation이 작은 것을 알 수 있었다. 이것은 목표점 설정시 곡선주행 부분을 좀 더 세밀하게 설정했기 때문으로 분석되며 직선 주행시도 목표점을 좀 더 설정해 주었을 때는 더 나은 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 목표점 설정이 많아지면 그만큼 과수원의 주행경로 설정시 시간이 소요되므로 적정량의 선택이 필요하다고 보며 주행경로 폭이 6m이므로 최대 deviation이 1m 이하라면 자율주행이 가능하다라고 판단되었다. 표 4와 그림 15에서도 보이듯이 현재의 목표점 설정으로도 자율주행은 가능하다는 것을 알 수 있었다.

그림 15에서 deviation이 양수 값으로 치우치는 것은 초기 차체의 위치에 기인하며 특히 직진 주행시 그런 현상이 두드러졌다. 이러한 문제점 역시 목표점의 설정을 추가하면 해결 될 수 있었다.

다. DGPS와 초음파센서를 이용한 자율주행 시뮬레이션

DGPS 신호와 초음파센서 신호 모두를 이용하였을 때의 결과를 표 5와 그림 16에 나타내었다. DGPS만을 이용했을 때의 평균 RMS는 35cm 정도였으나 초음파센서를 함께 이용함으로써 평균 RMS는 27cm으로 낮출 수 있었으며 특히 그림 16에서 보이듯이 직선주행시의 오차가 개선되었다. 초음파센서는 성능 개선에 기여할 뿐 아니라 과수원에서 실제 주행시 DGPS 신호가 문제가 있을 때 과수나 기타 장애물과의 충돌을 막아줄 수 있을 것으로 기대되었다.

Table 5 RMS error values with DGPS signals and ultrasonic sensors (10 trials)

Trial	RMS Value (cm)	Trial	RMS Value (cm)
1	17.79	6	24.79
2	34.06	7	21.24
3	24.99	8	39.26
4	28.12	9	29.59
5	38.82	10	16.55

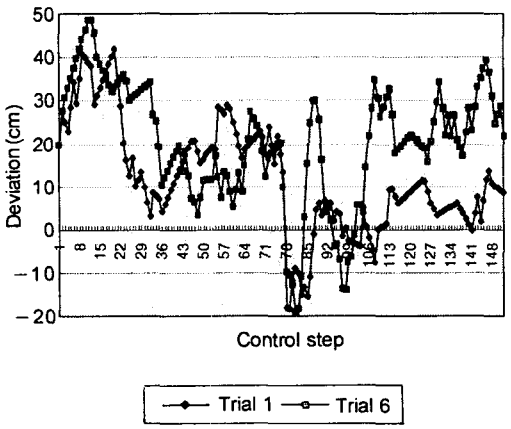

Fig. 16 Sequential deviation for trial 1 and 6.

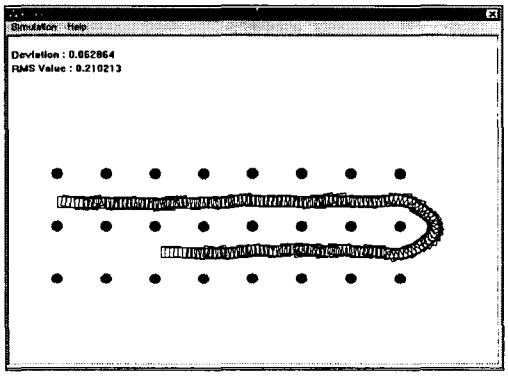

Fig. 17 Simulation of autonomous speed-sprayer.

그림 17에 스피드스프레이어의 자율주행을 시뮬레이션한 모습을 나타내었다. 이 그림은 스피드스프레이어가 과수와 부딪치지 않으면서 이상적인 주행경로를 따라 자율주행할 수 있음을 보여준다.

4. 요약 및 결론

본 논문에서는 DGPS와 퍼지제어기를 이용하여 스피드스프레이어가 자율주행할 수 있음을 시뮬레이션으로 확인하였다. 퍼지제어기의 입력으로는 DGPS 신호와 초음파센서 신호 두 가지가 사용되었는데, DGPS 신호는 주행 경로를, 초음파센서는 장애물과의 거리를 알려준다.

시뮬레이션 결과, DGPS를 이용한 스피드스프레이어의 자율주행은 기존의 영상처리를 이용한 자율주행의 문제점인 회전시의 어려움을 극복할 수 있었으며, 주행 경로 오차가 RMS 값으로 약 27cm 정도로 장애물과의 충돌 없이 이상적인 경로와 근접한 경로로 주행함을 알 수 있었다. 이것으로 DGPS를 이용한 스피드스프레이어의 실제 과수원에서 자율주행이 가능하다고 판단하였다.

참 고 문 헌

1. 기노훈, 조성인, 최창현. 1996. 기계시각과 퍼지논리를 이용한 스피드스프레이어의 자율주행 (II) - 실제 주행 -. 한국농업기계학회지 Vol. 21(2):175~181.
2. 장익주, 김태한, 조명동. 1995. 무인 스피드 스프레이어의 개발(I) - 원격제어 및 유도케이블 시스템 -. 한국농업기계학회지 Vol. 20(3):226~235
3. 조성인, 기노훈. 1996. 기계시각과 퍼지논리를 이용한 스피드스프레이어의 자율주행(I) - 그래픽 시뮬레이션 -. 한국농업기계학회지 Vol. 21(2):167~174.
4. Ardila, M. J. 1996. An Appealing Alternative : Aerial Guidance over Colombia's Banana Fields. Precision Farming, December. pp 10-15.
5. Borgelt, S. C., J. D. Harrison, K. A. Sudduth and S. J. Birrel. 1996. Evaluation of GPS for Application in Precision Agriculture. Applied Engineering in Agriculture, Vol. 12(6):633-638
6. Clark, R. L. and J. W. Worley. 1994. Accuracy of DGPS Position Information from Land Based Moving Vehicles with a C/A Code GPS Receiver. ASAE Winter Meeting. Paper No. 94-3545.
7. Klassen, N. D., R. J. Wilson and J. N. Wilson. 1994. Guidance Systems for Agricultural Vehicles. Proceedings of XII World Congress on Agricultural Engineering, International Commission of Agricultural Engineering, CIGR. pp. 1136-1142.
8. Larsen, W. E., G. A. Nielsen and D. A. Tyler. 1994. Precision navigation with GPS. Computers and Electronics in Agriculture Vol. 11(1):85-95.
9. Li, Y. and J. N. Wilson. 1994. Development of An Intelligent Steering Control Algorithm for Vision-Based Agricultural Vehicle Guidance. ASAE Winter Meeting. Paper No. 94-3513.

10. Li, Y. and J. N. Wilson. 1994. Simulation Study of A Vision-Based Agricultural Vehicle Guidance System. ASAE Winter Meeting. Paper No. 943608.
11. Rama, H. 1991. Sprayer and Crop Protection Magazine. USA/CAN.
12. Rupert, C. and R. L. Clark. 1994. Accuracy of DGPS Position Information Point Data with a C/A Code Receiver. ASAE Winter Meeting. Paper No. 94-3546.
13. Stafford, J. V. and B. Ambler. 1994. In-field location using GPS for spatially variable field operations. Computers and Electronics in Agriculture. Vol. 11(1):23-36.
14. Vetter, A. A. 1996. Quantitative Evaluation of DGPS Guidance for Ground-Based Agricultural Applications. Applied Engineering in Agriculture. Vol. 11(3):459-464.