

농용트랙터의 자동조향을 위한 퍼지제어와 적응제어의 비교

Comparison between Fuzzy and Adaptive Controls for Automatic Steering of Agricultural Tractors

노광모*

정희원

K. M. Noh

Automatic guidance of farm tractors would improve productivity by reducing operator fatigue and increasing machine performance.

To control tractors within $\pm 5\text{cm}$ of the desired path, fuzzy and adaptive steering controllers were developed to evaluate their characteristics and performance. Two input variables were position and yaw errors, and a steering command was fed to tractor model as controller output. Trapezoidal membership functions were used in the fuzzy controller, and a minimum-variance adaptive controller was implemented into the 2-DOF discrete-time input-output model. For unit-step and composite paths, a dynamic tractor simulator was used to test the controllers developed.

The results showed that both controllers could control the tractor within $\pm 5\text{cm}$ error from the defined path and the position error of tractor by fuzzy controller was the bigger of the two. Through simulations, the output of self-tuning adaptive controller was relatively smooth, but the fuzzy controller was very sensitive by the change of gain and the shape of membership functions. Contrarily, modeling procedure of the fuzzy controller was simple, but the adaptive controller had very complex procedure of design and showed that control performance was affected greatly by the order of its model.

주요 용어(Key Words) : 트랙터(Tractor), 조향제어(Steering Control), 퍼지제어(Fuzzy Control), 적응제어(Adaptive Control), 자가튜닝(Self-Tuning)

1. 서론

근래에 있어서 농업의 기피현상으로 인한 농촌 노동력의 고령화와 UR 라운드 협상의 타결로 인한 농산물 개방정책은 생산비 절감을 위한 농작업기계의 자동화를 절실히 요구하고 있다. 전자산업의 발달과 더불어 농업기계의 분야에서도 농작업기의 자동화에 많은 관심을 기울이고 있고, 이는 미래의 농업기계 산업의 주류를 이루게 될 것이다. 농업기계의 자동조향 시스템은 비속

런 운전자에게 조작을 용이하게 하고 피로를 크게 덜어줄 뿐 아니라 농기계의 효율적인 사용을 증진시킬 수 있으며, 운전자는 기계의 조작보다는 작업기의 성능을 최대로 유지하는데 집중할 수 있다. 특히 농약살포 등과 같이 인체에 유해한 작업을 할 때는 미리 예정된 순서대로 농기계를 자동 운전시킬 수도 있다.

이상적인 자동조향 시스템은 신뢰성이 있어야 하고, 유지하기에 편리하여야 하며, 쉬운 조작성과 다양성을 가져야 할 뿐 아니라 적절한 가격

+ 이 연구는 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음

* 건국대학교 농업기계공학과

으로 공급되어야 한다. 신뢰성이 있는 시스템이란 기계의 작동불량으로 일어날 수 있는 인명피해를 예방할 수 있는 충분한 안전장치를 가져야 하고, 서로 다른 농작업 유형에 따른 여러가지 농작업 기계를 사용할 수 있는 다양성을 제공하여야 한다. 또한 자동운전으로부터 수동운전 혹은 그 반대로 쉽게 변환이 이루어져야 한다.

자동조향의 목적은 농작업기계가 예정된 궤도를 따라 움직이게 하는 것으로, 토양의 상태에 따라 작업기에 작용하는 힘과 토양표면의 불균일성 등에도 크게 좌우됨이 없어야 한다. 이러한 제어를 위한 페루프 시스템은 다음과 같은 세가지 필수요소를 가지고 있어야 한다. 첫째는 농작업기계의 현재와 미래의 위치를 결정할 수 있도록 작업기계에서 측정가능한 신호를 보내는 기준 시스템(reference system)이다. 기준 시스템의 선정은 작업기의 위치를 검출하는 센서의 형태에 따라 달라진다. 밭의 높낮이를 검출할 수 있는 간단한 기계적인 센서는 트랙터나 작업기를 안내할 수 있도록 이미 상업용으로 시판되고 있다(Vogt, 1990; Johnson, 1988). 이러한 시스템은 조작이 간단하고 가격이 싼 장점이 있으나, 다양성과 신뢰성이 떨어지고 정확하게 작물의 열을 감지하기에 곤란하다. 특수한 농작업이나 작물상태에 좌우되지 않고 작업기계를 허용오차의 범위 안에서 반복되는 궤도로 정확하게 움직여야 하는 자동조향의 목적을 감안한다면, 비접촉식 센서를 가진 절대좌표계 위치감지 시스템(global position sensing system)은 이러한 요구를 만족시킬 수 있을 뿐만 아니라, 광센서의 사용과 함께 작물의 성장상태를 좌표계내에 기록할 수 있는 지도를 만드는 데도 사용될 수 있다. 최근 이 위치감지 시스템을 이용하여 포장에서 작업기를 제어하는 방법들이 많이 연구되고 있다(Shmulevich 등, 1987; Choi 등, 1989). 또한 이 시스템은 빠른 응답속도를 가지고 있고 장거리 측정이 가능하기 때문에 농작업기의 운동을 신뢰도 높게 제어할 수 있다.

둘째로 작업기의 운동을 비교적 정확하게 결

정하거나 예측하기 위해서는 보조 센서의 사용이 필수적이다. 일반적으로는 작업기의 위치, 속도, 방향 등이 그 계측 대상이다. 그러나, 어떤 변수들은 서로 종속적이고 작업환경 또한 동적이기 때문에 이들을 정확하게 감지할 수 있는 센서는 드문 실정이다. 셋째는 자동조향에 있어서 결정적인 역할을 하는 자동조향 알고리즘이다. 안정된 자동조향 제어기를 디자인하기 위하여 많은 이론적이고 실험적인 방법들이 자동조향 시스템에 영향을 미치는 변수를 결정하기 위하여 행하여져 왔다(Ellis, 1969; Cormier와 Fenton, 1980; Rehkuger, 1982; Furukawa와 Nakaya, 1985). 그러나, 이러한 연구에서는 종래의 제어이론을 사용했으나, 대부분 고정된 이득을 사용하기 때문에 속도에 따른 적응력이 떨어지는 단점이 있다. 현재의 센서 기술과 예기할 수 없는 잡음(noises)을 고려한다면, 자동조향 알고리즘은 적응력이 좋아야 하며 측정오차를 줄이거나 보상해줄 수 있는 방법을 필요로 하고 있는 실정이다.

본 연구의 주목적은 절대좌표계 또는 상대좌표계를 사용하는 비접촉식 위치감지 시스템하에서 농용트랙터를 예정된 궤도의 5cm이내에서 제어할 수 있도록 기본적인 퍼지제어기와 자가튜닝방식의 적응제어기를 각각 개발하고 시뮬레이션을 통하여 그 특성 및 성능을 비교 검토하는데 있다.

2. 연구 방법

주어진 진행경로를 따라 트랙터를 자동조향할 때 고려해야 할 주요 요인은 트랙터의 속도, 진행경로로부터 트랙터의 상대위치 및 트랙터의 진행방향과의 각도라고 여겨진다. 본 실험에서는 트랙터 속도의 변화가 조향에 미치는 영향보다 제어방법에 의한 조향의 특성을 연구하는 데 주요 목적이 있으므로 트랙터의 속도를 일정하게 고정하고 진행경로로부터 각각 트랙터의 위치오차와 진행각오차를 입력변수로 사용하였고,

출력변수로 핸들의 조향각을 설정하였다.

가. 퍼지모델

퍼지모델의 입력변수는 위에서 설명한 바와 같이 각 입력변수는 표 1과 같이 3가지의 멤버십함수로 구성하였다. 즉 트랙터가 진행경로에 가까이 있거나 진행각오차가 작을 때는 CT, 진행경로의 우측으로 멀리 있거나 진행각 오차가 시계방향으로 클 때는 RT, 또 진행경로의 좌측으로 멀리 있거나 진행각오차가 반시계방향으로 클 때는 LT에 의해 주로 지배받게 된다. 각 입력변수에 대한 멤버십 함수는 그림 1에서 보여주는 바와 같이 일반적인 사다리꼴형 퍼지 변수를 기본으로 각 함수의 상단과 하단의 좌표를 조절하여 삼각형 퍼지 변수도 혼합하여 사용할 수 있도록 하였다. 그림 1의 횡축은 진행경로에 대한 위치오차와 진행각오차를 나타내며 궤도로부터 각각 좌우로 위치오차 10cm, 진행각오차 20°를 0에서 100까지의 수치로 설정하였다.

Table 1. Linguistic expressions for input variables

Expression	LT	CT	RT
Variable			
Position error & yaw-angle error	LefT	GenTer	RighT

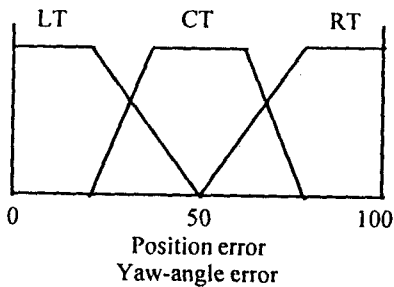


Fig. 1. General shape of membership functions.

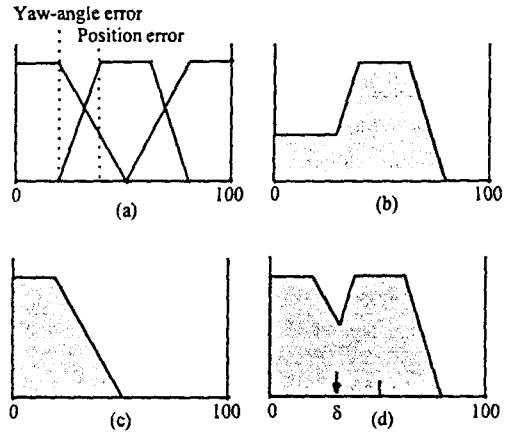


Fig. 2. Method of fuzzy inference by position and yaw-angle errors.

퍼지추론방법은 퍼지제어에서 일반적으로 사용하는 Max-Min규칙을, 비퍼지화의 과정에는 무게중심법을 채택하였다. 그림 2에 본 퍼지모델에 사용한 추론법을 나타내고 있다. a)에서 보면 트랙터는 진행경로의 좌측(position error=LT)에 있고 진행각은 경로에서 반시계방향(yaw-angle error=LT)일 때를 나타내며, 각 입력에 대하여 입력변수의 멤버십함수에서 적합도를 구하면 위치오차에 대한 추론결과는 b), 진행각오차에 대한 추론결과는 c)와 같은 그림이 되며, 이들을 합성한 종합출력은 d)와 같이 나타나고, 무게중심법을 사용하면 출력으로서의 조향각(δ)을 계산할 수 있다. 시뮬레이션의 단위시간당 핸들의 최대조향각은 60°로 하여 0~100의 수치를 -60°~+60°의 각으로 환산하여 사용하였다. 또한 효율적인 제어를 위하여 궤도로부터 트랙터의 상대위치와 차체진행각의 오차에 대한 멤버십 함수를 각각 다르게 사용하였다.

나. 적응제어모델

적응제어에서 적절한 모델의 선정은 시스템의 특성이나 모델에 대한 解의 존재유무에 큰 영향을 미친다. 고무타이어를 장착한 차량의 제어모

델은 일반적으로 자유도가 다수에서 2까지로 목적에 따라 다양하다. 농업용 트랙터는 정상적인 작업에서 속도가 낮고 좌우운동이 크지 않기 때문에 자유도가 2인 단순한 모델을 선택하였다.

1) 이산시간(discrete-time) 모델

일정한 속도의 트랙터 모델은 다음과 같이 상태(state-space)방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + B\delta \quad (1)$$

여기에서,

$$x = [\beta, \dot{\phi}]^T,$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{K_f + K_r}{Mv} & -\frac{Mv^2 + K_{l_f} - K_{l_r}}{Mv_2} \\ -\frac{K_{l_f} - K_{l_r}}{I_z} & \frac{K_{l_f}^2 + K_{l_r}^2}{I_z v} \end{bmatrix},$$

$$B = \left[\frac{K_f}{Mv}, \frac{K_{l_f}}{I_z} \right]^T.$$

- b = 트랙터 무게중심의 사이드슬림각(rad),
- $\dot{\phi}$ = 트랙터 yaw 속도(rad/sec),
- δ = 트랙터 조향각(rad),
- K_f, K_r = 전 · 후 타이어의 조향계수(N/rad),
- l_f, l_r = 무게중심에서 전 · 후축까지의 거리(m),
- M = 트랙터 질량(Kg),
- v = 트랙터 전진속도(m/sec),
- I_z = 트랙터 yaw 관성모우멘트(kg · m²).

이 연속 모델은 1개의 입력(핸들조향각)과 2개의 출력(사이드슬림각과 yaw속도), 그리고 2차 미분방정식의 형태를 취하고 있다.

입출력이 동시에 샘플링되어지고 표본화주기가 h 인 이산제어 시스템에서 모든 신호를 무한 급수 $\{f(k) : k = \dots -1, 0, 1, \dots\}$ 로 생각하면 백워드 시프트(backward-shift) 연산자(q^{-1})는 다음과 같이 정의된다.

$$q^{-1}f(k) = f(k-1)$$

트랙터 무게중심의 횡방향 속도 $\dot{x} \approx \beta v$ 의 기구

학적인 관계에 의한 식과 Tustin의 근사식(Åström과 Wittenmark, 1984) $\frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{2(1-q^{-1})}{h(1+q^{-1})}$

을 이용하면 다음과 같은 이산상태방정식을 얻을 수 있다.

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})\delta(k-1) \quad (2)$$

여기서,

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + a_3q^{-3} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B(q^{-1}) = \begin{bmatrix} b_{11} + b_{12}q^{-1} + b_{13}q^{-2} \\ b_{21} + b_{22}q^{-1} + b_{23}q^{-2} \end{bmatrix}.$$

적용제어 방식에서는 차분방정식의 차수만이 시스템 제어에 영향을 미치고 계수는 매 샘플링시 추정되어지기 때문에 각 계수값의 표기는 생략한다.

위 식 (2)는 풀어쓰면 다음과 같이 된다.

$$y(k) = -a_1y(k-1) - a_2y(k-2) - a_3y(k-3) + b_1\delta(k-1) + b_2\delta(k-2) + b_3\delta(k-3)$$

여기서 $y(i) = [x(i), \dot{\phi}(i)]^T$, $b_i = [b_{i1}, b_{i2}]^T$ 이다. 위 이산시간 모델도 입력 1개, 출력 2개의 2차원의 형태를 취하고 있다. 자가튜닝 제어방식은 다차원의 모델도 다룰 수 있으나, 계산식이 상당히 복잡해지고 시간이 많이 걸려 실용적이지 못하다. 따라서, 시스템의 동적인 특성이나 페루프 시스템의 안정성을 손상시키지 않고 간단히 1차원 모델로 변환하기 위하여 (3)식의 양변에 b_i^T 를 곱하면 다음과 같다.

$$y(k) = -a_1y(k-1) - a_2y(k-2) - a_3y(k-3) + b_1\delta(k-1) + b_2\delta(k-2) + b_3\delta(k-3) \quad (6)$$

$$\text{여기서, } y_e = b_i^T [x_r - x, \dot{\phi}_r - \dot{\phi}]^T = b_i^T [x, x\dot{\phi}]^T.$$

트랙터의 전륜축의 중심이 궤도의 오른쪽에 있으면 Δx 를 양으로 하고, 궤도로부터 트랙터의 중심축각(yaw angle)이 시계방향일 때 $\Delta\psi$ 를 양

으로 규정하면 출력 조향신호는 이득 b_1 을 갖는 비례제어기가 된다. 이 이득을 트랙터의 속도에 따라 조정함으로써 궤도오차를 최소화할 수 있다.

2) 회귀변수추정(Recursive parameter estimation) 위에서 기술한 변수 시스템에서 변수의 추정법으로 회귀변수추정법을 사용하였다. 실시간에서 모든 계측은 순차적으로 이루어지고 k 번째 얻어진 계측의 결과가 $k+1$ 번째의 변수값을 추정하는데 사용되기 때문이다. 변수추정에는 여러가지 방법이 사용되고 있으나, 여기서는 안정성이 있고 쉽게 사용할 수 있는 회귀최소제곱법(recursive least-squares)를 사용하였다. Ljung과 Söderström(1984)에 의한 회귀최소제곱법의 알고리즘은 다음과 같다.

$$\hat{\alpha}(k) = \hat{\alpha}(k-1) + L(k) (y(k) - \phi^T(k) \hat{\alpha}(k-1))$$

$$L(k) = \frac{P(k-1) \phi(k)}{1/\lambda + \phi^T(k) P(k-1) \phi(k)}$$

$$P(k) = (I - L(k) \phi^T(k)) P(k-1)$$

여기서, $\hat{\alpha}$ 는 추정되어질 변수벡터, ϕ 는 지연된 입력력 벡터, L 은 이득행렬, P 는 추정오차의 공분산에 비례하는 행렬, 그리고 λ 는 시간에 따라 변화하는 변수의 추정을 가능하게 하는 가중치인 forgetting계수로서 1보다 작으며, λ 가 1일 경우 변수의 값은 항상 일정하다.

3) 자가튜닝 조향제어기

위에 서술한 회귀변수의 추정법들은 기본적으로 회귀최소제곱법에 근거하고 있다. 그러나, 제어알고리즘의 경우에는 그 선택에 따라 다른 특성과 성능을 나타낸다. 주로 사용되는 방법은 극점배치(pole-placement)법 (Zarrop와 Fischer, 1985), 선형2차 가우시안(linear quadratic Gaussian, LQG)제어법(Clarke와 Gawthrop, 1975), 최소분산(minimum variance)제어법(Aström과 Wittenmark, 1973)등이다. 이 중 최소분산제어는 선형2차 가우시안 함수를 최소화함으로써 얻어지며 출력을 가능하면 작게 하는 특성상 자가튜

닝제어에 널리 사용된다. 본 연구에서는 최소분산제어법을 사용하였다.

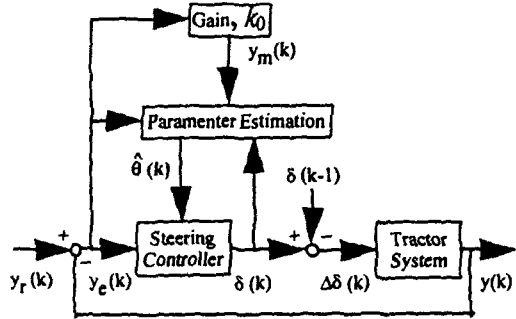


Fig. 3. Block diagram of self-tuning steering controller .

그림 3에 트랙터의 자가튜닝 조향제어기의 블록선도를 나타내었다. y_r 은 기준 궤도의 좌표, y 는 트랙터 무게중심의 실제 좌표, 그리고 y_r 은 궤도오차이다. 그리고 본 연구에 사용한 제어알고리즘은 다음과 같다.

- ① 궤도의 예측오차 $\epsilon(k)$ 를 계산한다.

$$\epsilon(k) = y_m(k) - \phi^T(k-1) \hat{\alpha}(k-1) - \delta_1 \delta(k-1)$$

여기서,

$$y_m(k) = k_0 y_e(k),$$

$$\phi(k-1) = [-y_e(k-1), -y_e(k-2), -y_e(k-3), \delta(k-2), \delta(k-3)]^T,$$

$$\hat{\alpha}(k-1) = [\hat{a}_1(k-1), \hat{a}_2(k-1), \hat{a}_3(k-1), \hat{\delta}_2(k-1), \hat{\delta}_3(k-1)]^T.$$

- ② 이득벡터 $L(k)$ 를 계산한다.

$$L(k) = \frac{P(k-1) \phi(k-1)}{1/\lambda(k-1) + \phi^T(k-1) P(k-1) \phi(k-1)}$$

- ③ 변수 추정벡터를 갱신한다.

$$\hat{\alpha}(k) = \hat{\alpha}(k-1) + L(k) \epsilon(k)$$

- ④ 메모리 시정수 $N(k)$ 를 계산하고, forgetting계수 $\lambda(k)$ 를 설정한다.

$$N(k) = \frac{(1 + \phi^T(k-1) P(k-1) \phi(k-1)) e_0}{\epsilon^2(k)}$$

$$\lambda(k) = 1 - \frac{1}{N(k)}$$

⑤ 공분산 행렬 P 를 갱신한다.

$$P(k) = (I - L(k) \phi^T(k-1)) P(k-1)$$

시스템의 안정을 위하여 행렬 P 가 제로에 근접하는 것을 막기 위하여 다음을 확인한다.

$$\text{If } \frac{\text{trace } P(k)}{\lambda(k)} \leq c_0 \text{ then } P(k) = \frac{P(k)}{\lambda(k)}$$

⑥ 추정된 변수를 사용하여 조향각 $\delta(k)$ 를 결정한다.

$$\delta(k) = - \frac{\phi^T(k) \hat{x}(k)}{\delta_1}$$

다. 컴퓨터 시뮬레이션

위에서 논한 퍼지 조향제어기와 자가튜닝 조향제어기의 특성을 연구·비교하기 위하여 트랙터 시뮬레이터(Noh and Erbach, 1991)를 이용하였다. 2륜구동의 John Deere 4430 트랙터 모델로, 연구의 목적상 차체, 조향암, 좌우 전륜스핀들의 4바다로 단순하게 구성하였다. 본 연구에서 트랙터의 속도는 18km/h(5m/sec)로 일정하게 고정하였으며, 각 제어기의 계단응답특성을 살펴보기 위하여 먼저 직선의 기준궤도로부터 트랙터를 1m 떨어지게 위치시켰다. 두 번째는 그림 4에서 보는 바와 같은 임의의 복잡한 기준궤도로서, 트랙터 시뮬레이터에서 다음과 같이 조향핸들을 조작하여 궤도를 얻었다.

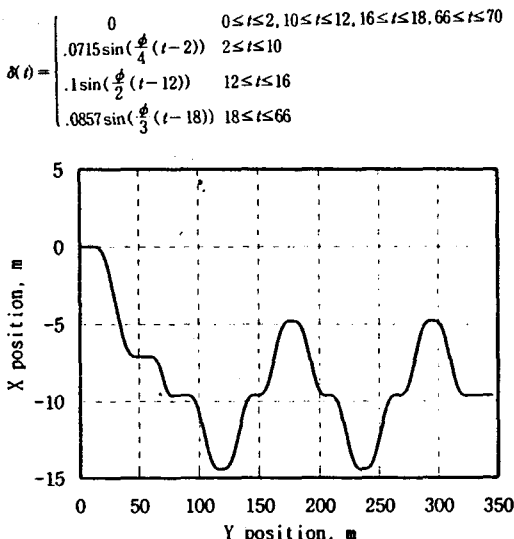


Fig. 4. The composite path used to test steering controllers.

샘플링주기는 현실성을 감안하여 0.1초로 하였고, 조향 명령은 다음과 같은 지수함수에 의하여 샘플링주기 동안에 연속적으로 출력되는 것으로 가정하였다.

$$\delta(t) = \delta(t-1) + \Delta\delta(k)(1 - e^{-50s})$$

여기서, $\Delta\delta(k) = \delta(k) - \delta(k-1)$ 이고, s는 트랙터 시뮬레이터에서 사용되는 시간증분이다.

3. 결과 및 고찰

가. 모델의 선택

퍼지제어에서 진행경로로부터 트랙터의 상대 위치와 차체진행각의 오차에 대한 멤버십함수를 함께 사용하였을 때는 진행경로에서 트랙터가 벗어남에 따라 위치와 각도에 대한 오차가 중첩되어 나타나 제어가 상당히 민감하였다. 따라서 진행경로로부터 트랙터의 위치와 진행각의 오차에 대한 멤버십함수를 다르게 사용하였고, 진행경로의 가까이 트랙터가 있을 때는 위치오차에 대한 출력을 크게 하고 진행각의 오차에 대한 출력을 작게 하여 주행성을 향상시킬 수 있도록 하였다.

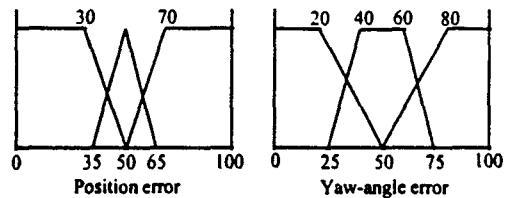


Fig. 5. Membership functions of position and yaw-angle errors used in computer simulation.

그림 5는 함수들의 상단과 하단의 좌표를 여러 차례 변화시켜 조합한 후 진행경로로부터 이탈과 조향성을 검토하여 최적의 주행성능을 나타낸 트랙터의 상대위치와 차체진행각의 오차에 대한 멤버십 함수를 나타내고 있다. 최대의 위치 오차와 진행각오차 10cm와 20°를 벗어날 경우

는 최대 핸들조향각인 60°의 출력을 내도록 프로그래밍하였다. 복합궤도에서 최적의 주행성능을 보인 모델을 계단응답에 그대로 이용했을 때는 시스템이 불안정하여 이득을 다소 낮춘 결과 좋은 주행성능을 나타내었다.

자가튜닝제어기의 경우 초기에는 공분산 행렬을 $P_0=50I$ 로 시작하였고, 이득을 조정하여 가장 안정된 제어성능을 보여주는 모델로부터 초기값을 설정하였다. 설정된 초기값은 $k_0=6$, $P_0=\text{diag}(-2.06, 2.79, -1.02, 1.16, -0.35)$ 로서, 본 연구에서는 고정하여 사용할 수가 있었다. 또한 원래 모델을 기준으로 차수를 늘리거나 줄여서 실험한 결과 제어성능이 크게 저하되어 조향출력이 발산하거나 또는 최대의 위치오차가 5cm이상이어서 사용이 불가능했다.

나. 계단응답특성

트랙터의 중심을 직선궤도로부터 1m 이탈시켜서 각 제어기에 대한 계단응답특성을 조사한 결과가 그림 6으로, 처음 4초 동안 각 제어기에 의하여 진행된 트랙터의 경로이다. 퍼지제어의 경우에는 지연시간 0.8초, 오버슈트시간 1.6초, 최대오버슈트량 2.3%를 나타내었고, 자가튜닝제어의 경우는 과감쇠시스템으로 지연시간 0.5초, 5%이내의 정착시간은 3.2초였다.

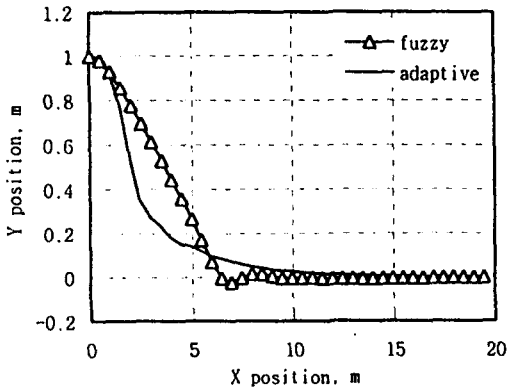


Fig. 6. Unit-step response of fuzzy and self-tuning steering controllers.

공히 정착시간이 늦은 원인은 직선궤도에 대한 좌표가 매 샘플링시 입력되어 트랙터가 직선궤도에 근접하면 기준궤도의 좌표는 이미 트랙터의 전방에 있기 때문이다. 지연시간은 자가튜닝제어시보다 퍼지제어시 짧게 나타났는데, 그 이유로서 퍼지제어에서는 최대조향출력이 멤버십함수에 구속되기 때문인 것으로 보인다. 정착시간은 반대로 자가튜닝제어의 경우가 3.2초로 퍼지제어시보다 2배 정도 길게 나타났다. 이 현상은 자가튜닝제어기의 특징으로서 궤도오차가 큰 초기에는 forgetting계수를 작게하여 공분산행렬을 작게함으로써 변화에 대하여 빠르게 반응하게 하고, 궤도에 근접함에 따라 상대적으로 오차가 작게 되었을 때는 반대의 현상이 일어나기 때문이다. 퍼지제어의 경우는 과거의 궤도오차에 대한 정보가 없어서 오버슈트가 발생하는 것으로 생각된다. 오버슈트가 문제가 될 때는 퍼지제어에도 학습기능을 추가하거나 퍼지-신경망 회로의 구성으로 보완할 수 있다.

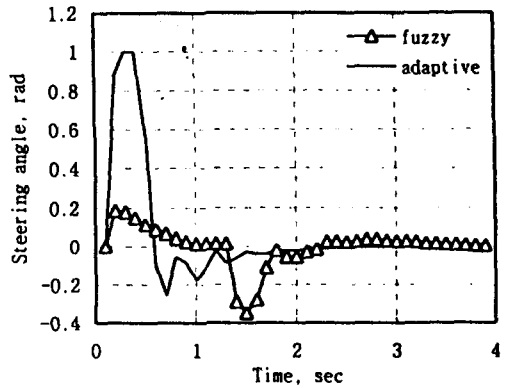


Fig. 7. Steering output of the controllers under unit-step response.

그림 7은 두가지 제어법의 출력에 따른 트랙터의 조향핸들각을 보여주고 있다. 그림 6에서도 예상되는 바와 같이 자가튜닝제어의 경우는 초기에 큰 조향각을 출력하여 궤도에 빠르게 근접하나, 퍼지제어의 경우는 초기의 조향출력은 작으나 직선궤도인 x축을 횡단함에 따라 빠르게

조향핸들을 꺾어 궤도에 진입한다. 퍼지제어에서는 궤도로부터의 상대위치오차에 대한 이득을 높이거나 멤버십함수를 다르게 사용하면 빠르게 진행경로에 근접시킬 수 있으나, 반대로 진행경로의 횡단후 진입은 더 큰 진동을 유발시키거나 위치오차가 커지는 것으로 판명되었다.

다. 복합궤도에 대한 응답특성

복합궤도에 대한 퍼지제어와 자가튜닝제어법의 응답특성을 그림 8과 9에 나타내었다. 그림 8은 복합궤도에서 두 제어법으로 70초 동안 시뮬레이션한 결과중 2초후부터 20초까지만을 0.2초의 샘플링주기로 표시한 것으로, 종축은 진행경로의 수직방향으로 트랙터의 앞차축 중심의 상대위치오차를 나타내고 있다.

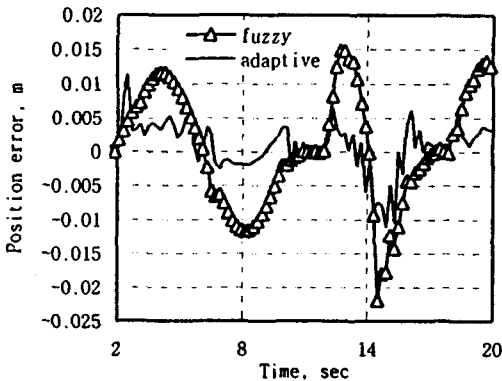


Fig. 8. Position errors of the tractor in the composite path.

표 2에 보여지는 바와 같이 전체 70초 동안에 대하여 퍼지제어의 경우 절대위치오차에 대한 최대오차는 2.25cm, 평균오차 0.76cm, 표준편차 0.46cm, RMS값은 0.88cm이었으며, 자가튜닝제어의 경우에는 최대오차 1.46cm, 평균오차 0.26cm, 표준편차 0.21cm, RMS값은 0.34cm이었다. 자가튜닝제어에서는 출발 2초후 처음의 곡선궤도에서 가장 큰 오차를 나타냈고, 그 후로는 오차가 계속 1cm이내에 머물렀다. 그러나, 곡선궤

도의 반경이 짧아지면 퍼지제어의 경우는 위치오차가 크게 증가하는 경향을 나타냈다.

Table 2. Maximum, mean, standard deviation, and RMS values for position errors of the tractor in the composite path

Controller	Maximum cm	Mean cm	STD cm	RMS cm
Fuzzy	2.25	0.76	0.46	0.88
Adaptive	1.46	0.26	0.21	0.34

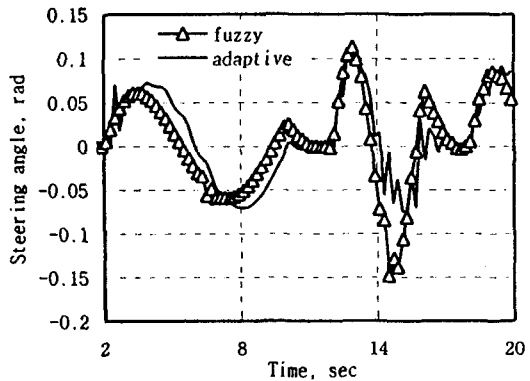


Fig. 9. Steering outputs of the controllers in the composite path.

그림 9는 제어기로부터의 출력에 의한 조향핸들각을 나타내며, 자가튜닝제어의 조향출력은 연속곡선궤도에 빠르게 적응하기 위하여 다소의 진동이 수반되었으며 위치오차에서도 같은 경향을 나타냈다. 이 정도의 진동은 실제 조향시스템에서 제어신호의 전달체계를 통하여 다소 감소되는 것이 일반적이므로 크게 문제가 되지 않을 것으로 생각된다. 진동이 문제가 될 때는 설계의 허용범위안에서 이득을 낮추면 해결될 수 있다. 퍼지제어의 경우 상대위치오차는 자가튜닝제어만큼 궤도의 변화에 빠르게 적응하지 못하여 다소 커지거나 비교적 안정된 조향출력을 나타내고 있다. 이 경우에도 이득을 높이면 위치오차를 줄일 수 있으나 자가튜닝제어시보다 시스템이 불안정해지는 것으로 판명되었다.

4. 요약 및 결론

농업기계의 자동조향 시스템은 비숙련 운전자에게 조작을 용이하게 하고 피로를 크게 덜어줄 뿐 아니라 농기계의 효율적인 사용을 증진시킬 수 있으며, 운전자는 기계의 조작보다는 작업기의 성능을 최대로 유지하는데 집중할 수 있다. 특히 농약살포 등과 같은 인체에 유해한 작업에서는 미리 예정된 순서대로 농기계를 자동 운전시킬 수도 있다.

본 연구에서는 절대좌표계 또는 상대좌표계를 사용하는 비접촉식 위치감지 시스템하에서 트랙터를 진행경로로부터 5cm 이내에서 제어할 수 있도록 기본적인 퍼지제어기와 자가튜닝방식의 적응제어기를 각각 개발하고 시뮬레이션을 통하여 그 특성 및 성능을 비교 검토하는 데 있다.

그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 설계한 퍼지제어기와 자가튜닝제어기는 모두 진행경로로부터 5cm 이내에서 트랙터를 자동조향할 수 있었으나, 시뮬레이션 과정에 있어서 자가튜닝제어는 비교적 원활한 조향 출력을 내는 반면 퍼지제어의 경우에는 이득의 변화와 멤버십함수에 따라서 상당히 민감함을 나타냈다.
- (2) 사다리꼴 변수를 사용한 퍼지제어에서는 모델의 선정이 불필요하나, 자가튜닝형의 적응제어에서는 시스템의 특성을 감안한 모델화 과정이 상당히 복잡하고 모델의 차수가 제어성능에 큰 영향을 미치는 것으로 판명되었다.
- (3) 트랙터의 중심을 직선궤도에서 1m 이탈시킨 계단응답특성에서는 퍼지제어의 경우가 빠르게 궤도에 진입하나 오버슈트가 발생하였고, 과거의 궤도오차에 대한 정보를 사용하는 자가튜닝 제어기에서는 초기에 빠르게 방향전환을 하나 과거의 궤도오차에 대한 정보를 이용하므로 오버슈트가 발생되지 않아 퍼지제어의 경우보다 2배 늦

게 궤도에 진입하였다.

- (4) 복합궤도에 대한 응답특성에서는 자가튜닝제어시 위치오차는 작으나 조향출력에 다소 진동을 수반하였고, 퍼지제어시 위치오차는 다소 크나 비교적 원만한 조향출력을 보였다.

참고 문헌

1. Aström, K. J. and T. Bohlin. 1966. Numerical identification of linear dynamic systems from normal operation records. Theory of Self-adaptive Control Systems. Plenum Press, NY.
2. Astrom, K. J. and B. Wittenmark. 1973. On self tuning regulators. Automatica 9 : 185-199.
3. Aström, K. J. and B. Wittenmark. 1984. Computer controlled system. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
4. Choi, C. H., D. C. Erbach and R. J. Smith. 1989. Navigational tractor guidance system. ASAE Paper No. 89-1026. ASAE, St. Joseph, MI.
5. Clarke, D. W. and P. J. Gawtho. 1975. Self-tuning controller. IEE proceedings, Part D: Control Theory and Applications 122:929-934.
6. Cormier, W. H. and R. E. Fenton. 1980. On the steering of automated vehicles-a velocity-adaptive controller. IEEE Transactions on Vehicular Thechnology 29(4):375-385.
7. Ellis, J. R. 1969. Vehicle dynamics. London Business Books, Londo
8. Furukawa, Y. and H. Nakaya. 1985. Effects of steering response characteristics on control performance of driver-vehicle system. JSAE Review 7(4):74-83.
9. Johnson, H. M. 1988. New 『robotic driver』

- for farm tractors, combines. Farm Show 12 (3):3.
10. Ljung, L. and T. S. derstr m. 1984. Theory and practice of recursive identification. The MIT Press, Cambridge, MA.
 11. Noh, K. M. and D. C. Erbach. 1991. A Semi-recursive dynamic algorithm using variational vector approach. Transactions of the ASAE 34(4):1566-1574.
 12. Rehkugler, G. E. 1982. Tractor steering dynamics. Transactions of the ASAE 25(6):1512-1515.
 13. Shmulevich, I., G. Zeltzer and A. Brunfeld. 1987. Guidance system for filed machinery using laser scanning method. ASAE Paper No. 87-1558. ASAE, St. Joseph, MI.
 14. Vogt, Willie. 1990. A guide to guidance. Farm Industry News 23(4):6-9, 12.
 15. Zarrop, M. B. and M. Fischer. 1985. Reduced-variance pole-assignment self-tuning regulation. Int. J. of Control 42(5):1013-1033.