

Precise Tracking Control of Automated Guided Vehicle System

申 科 眞* · 許 旭 烈**
(Doo-Jin Shin · Uk-Youl Huh*)

Abstract - This paper proposed a fuzzy logic cross coupled controller which can enhance the path tracking performance of optically guided AGV(Automated Guided Vehicle). The AGV is differential drive type and has front-side optical sensors which can identify the guiding path. When AGV follows the guide path, it cannot be avoid the deviation from the path due to the inevitable error and the deviation must be corrected. Optically guided AGV used in industrial area is controlled by On-Off controller generally. the experimental AGV has three optical sensors in front body. In this structure, we could not know the leaving distance accurately and steering angle from the guided line, so AGV could not be controlled properly with conventional controller in the case of increasing or decreasing velocity. If we mount additional sensors th the AGV, we could know the leaving distance and steering angle from the guided line and proper error compensating methode cam be applied. But because cost of sensors are high, the cost of total system is increasing. So, in this paper, to improve the tracking performance of AGV which has the minimum number of sensors and fuzzy logic cross coupled controller is proposed. Some simulations and experimental results are presented to illustrate the performance of the proposed controller.

Key Words : PI controller, Fuzzy logic cross coupled controller, On-off controller, AGV

1. 서 론

현대 산업계에서 생산 합리화를 위하여 여러 방면에서의 자동화를 추구하고 있다. 이러한 추세에서 생산공정의 유연성이 필요함에 따라 고정된 반송경로를 벗어나 보다 유연하고 다목적인 운반수단이 요구되고 있다. 현재 실용화되고 있는 무인 반송차는 작업장 바닥 표면에 자기 유도선 또는 광학 테이프등을 설치하여 연속적 고정 궤도를 따라 운행되는 방식이 주류를 이루고 있다. 이 방식은 궤도를 정확히 추적해 갈 수 있다는 점과 위치제어가 간단하고 신뢰성이 높은 장점을 갖고 있다. 이들 중에서 광 유도식 무인 반송차는 타 방식의 무인 반송차에 비해 저비용으로 제작할 수 있다는 장점이 있다[1]. 무인 반송차의 유도 방식에 따라 유도(Guide)식과 비유도(Guideless)식으로 분류되며 실제 실용화되어 있는 유도식이 주류를 이루고 있다. 또한무인 반송차의 조향방식은 Tricycle Steering 방식, Multi-Wheel steering 방식, Differential Steering 방식으로 분류할 수 있다[2]·[4]. 기존 실용화된 유도식 무인반송차의 제어알고리즘은 On-Off 제어가 일반적이다. On-Off 제어는 제어알고리즘이 간단하여 구현하기 쉽지만 주행시에 발생하는 다양한 오차를 효과적으로 보상하지 못하고 추적오차가 항상 존재하며 주행속도를 높일 경우 경로를 이탈할 가능성이 크다. 이러한 오차 문제를 해결하기 위하여 Koren은 상호결합

제어기를 제안하였으며, Kulkarni, Srinivasan 등은 이후 여러 오차 모델 및 제어방법을 사용하여 다양한 형태의 상호결합제어기를 제안하였다[5][6][7]. 이러한 오차를 효과적으로 보상하기 위해서는 정확한 오차의 계산이 필요하고 마찰력, 백래쉬, 부하변화 등의 여러 비선형 요소에 강인하며 높은 궤적정밀도를 유지할 수 있는 상호결합제어기가 설계되어야 한다[8]. 그러나 상호 결합된 시스템은 다변수, 비선형 시스템이기 때문에 기존의 비례 및 비례-미분제어 등의 선형 제어기법으로는 효과적인 오차의 보상을 보장하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 속도 제어를 위해 PI 제어기를 사용하고 유도선 이탈시 오차보상을 위해 퍼지 논리에 의한 상호 결합 제어기를 설계하여 보상하는 방법을 제안하였으며 실용화에 적합한 Differential Steering 방식의 무인 반송차에 적용하여 검증하였다.

2. 무인반송차의 운동해석

무인반송차의 운동해석은 주행성능평가를 위해 필요하며 절대좌표상에서 차체의 위치를 계산하는 방정식을 유도한다. 해석은 무인반송차에 작용하는 관성, 중력, 바퀴에 작용하는 마찰력이나 미끄러짐 등은 고려하지 않았고 실험에 의해 모터의 엔코더로 측정된 데이터만으로 차체의 좌표상에서의 움직임만을 표시하였다. 사용된 모델은 Differential Steering 방식으로 사각형의 형상을 가지며 전륜으로 구동된다.

2.1 무인반송차의 주행특성

실험에 사용된 무인 반송차의 특징은 앞부분에 장치된 3

* 正會員 : 仁荷大 工大 電子電氣컴퓨터工學部 博士課程
 ** 正會員 : 仁荷大 工大 電子電氣컴퓨터工學部 教授 · 工博
 接受日字 : 2000年 7月 10日
 最終完了 : 2001年 7月 3日

개의 광센서만으로 유도되며 모터의 토크에 비해 차체의 중량이 크고 주행환경이 실내이므로 바닥이 미끄러워 바퀴의 미끄러짐이 나타난다. 이러한 구조에서는 차체가 유도선에 진입 또는 이탈할 때의 각도를 알 수 없고, 기존의 제어기에 의해 추적오차가 보상되어도 관성에 의해 다시 재이탈 하게 된다. 진입 또는 이탈 각도를 측정하기 위해서는 추가의 센서가 필요하며 이는 무인 반송차의 제작 원가를 높이는 요인이 된다. 따라서 본 논문에서는 오차보상 방법은 퍼지 논리형 상호결합제어기(Cross Coupled Controller)를 사용하였다. 따라서 회전반경 R을 퍼지 제어기에 의해 변화시킴으로써 바퀴의 속도를 가변하여 차체의 회전이 이루어져 유도선으로 진입하도록 하거나 자세를 변경시킬 수 있다.

2.2 주행운동의 기하학적 해석

실험에 사용되는 무인 반송차는 Differential Steering 방식으로 샘플링 시간사이의 좌,우 바퀴 속도의 변화량을 알면 유도된 방정식에 의해 차체의 조향각(Heading angle)을 구할 수 있고 이를 이용하여 위치추정이 가능하다. 그림 2.1에서 보는 바와 같이 무인 반송차가 절대 좌표상에 놓여 있을 때 바닥의 굴곡이 심하지 않다고 가정하면 절대위치는 평면 좌표 (x_c, y_c) 와 조향각 θ_c 의 3개의 변수로 표시된다. 무인 반송차의 운동은 조향각 θ_c 방향으로의 선속도 v_c 와 중심점 O_c 에서의 회전각속도 ω_c 의 2개의 변수를 가지며 이 두 개의 변수로써 기구학적인 모델이 표현된다.

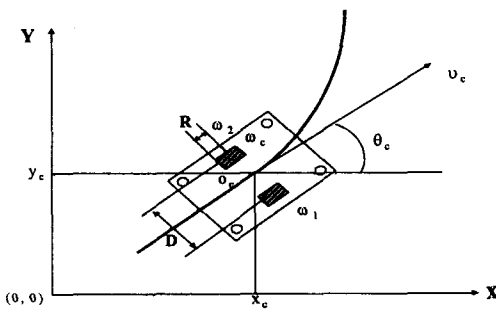


그림 2.1 무인반송차의 경로추적
Fig 2.1 AGV kinematics in steering

- ω_1 : 우측 구동바퀴의 각속도
- ω_2 : 좌측 구동바퀴의 각속도
- v_c : 중심에서의 선속도
- ω_c : 차체의 회전 각속도
- D : 양 바퀴 사이의 거리
- R : 바퀴의 반지름
- θ_c : 조향각도
- O_c : 중심점
- r : 회전반경

두 바퀴가 그린 궤적은 반지름이 다른 원호의 길이이고 그 비는 $r : r - D$ 이므로

$$(\omega_1 R_1 - \omega_2 R_2) \cdot \frac{\omega_1 R_1}{\omega_c} = \omega_1 R_1 D$$

$$\omega_c = \frac{\omega_1 R_1}{D} - \frac{\omega_2 R_2}{D}$$

$$= \frac{1}{D}(\omega_1 R_1 - \omega_2 R_2) \tag{2.1}$$

$R_1 = R_2 = R$ 라고 한다면

$$\omega_c = \frac{R}{D}(\omega_1 - \omega_2)$$

선속도 v_c 를 x 축과 y 축의 성분으로 분해하고 조향각 θ_c 와 함께 미분방정식으로 표시하면 식 2.2, 2.3, 2.4 와 같이 된다.

$$\frac{dx_c}{dt} = v_c \cos(\theta_c(t)) \tag{2.4}$$

$$\frac{dy_c}{dt} = v_c \sin(\theta_c(t)) \tag{2.5}$$

$$\frac{d\theta_c}{dt} = \omega_c(t) \tag{2.6}$$

3. 제어기의 구성

3.1 PI 제어기의 구성

무인 반송차의 성능은 기준속도에 빠르게 수렴하고 정상 상태에서 기준치와의 오차를 작은 값으로 유지하는 것, 즉 기준속도로 주행하도록 하는 것에 있으므로 이에 합당한 PI 제어기를 사용하였다. 모터의 전달함수와 PI 제어기의 전달함수를 곱하여 전체 전달함수 $G(s)$ 를 구하면 식 3.1과 같이 된다.

$$G(s) = \frac{K_p K_T s + K_i K_T}{J s^2 + (B + K_E K_T) s} \tag{3.1}$$

여기서, K_T : 토크상수, J : 모터의 관성모멘트, B : 모터의 점성 마찰력, K_E : 모터의 역기전력 상수

여기서 J, B, K_E, K_T 는 모터 고유의 상수값이므로 이미 정해져 있는 파라미터이다. 결국 K_i 값에 따라 응답특성이 결정된다. 식 3.1의 전달함수를 갖는 시스템에 단위계 단입력을 인가하였을 때 K_p 값에 따른 응답특성은 그림 3.1과 같다.

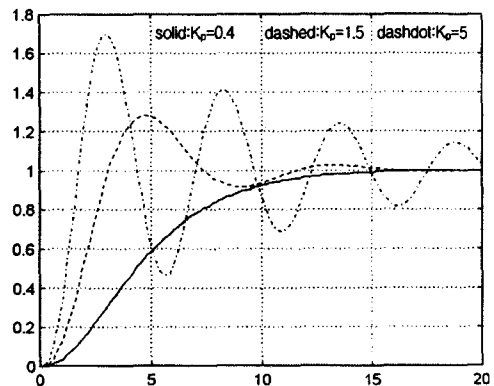


그림 3.1 K_p 값에 따른 응답 특성
Fig 3.1 Char. of response according to K_p

각 제어기의 이득값은 무인 반송차 시스템의 기계적인 파라

미터를 모두 알 수 없기 때문에 실험 및 사양서를 참조하여 설정하였다. 즉 모터에 단위계단 입력을 가한 후 응답속도를 측정하여 가장 적합한 값을 이득값으로 선정하였다. PI 제어 알고리즘은 10[ms] 마다 한 번씩 수행되도록 프로그램 하였다.

3.2 상호결합 제어기(Cross Coupled Controller)

상호결합 제어기(Cross Coupled Controller)는 일반적으로 다축 서보 시스템의 추적성능을 향상시키기 위하여 연구 되어 왔다[5][6]. 본 논문에서는 이를 무인 반송차의 방향제어에 적합하게 변형하여 적용하였다. 전체시스템의 블록선도는 그림 3.2와 같다. 좌측 바퀴의 속도를 V^L , 우측바퀴의 속도를 V^R , 양 바퀴사이의 거리를 D , 바퀴의 각속도를 ω , 차체의 중심점에서의 회전반경을 R 이라고 했을 때 식 3.2와 식3.3과 같이 표현된다.

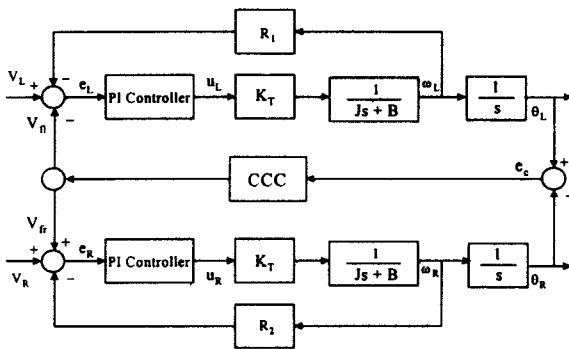


그림 3.2 상호결합 제어기의 블록선도
Fig 3.2 Block diagram of CCC

$$V^L = \omega(R - \frac{D}{2}) = V(1 - \frac{D}{2R}) \quad (3.2)$$

$$V^R = \omega(R + \frac{D}{2}) = V(1 + \frac{D}{2R}) \quad (3.3)$$

$$\frac{V^R}{V^L} = \frac{1 + \frac{D}{2R}}{1 - \frac{D}{2R}} \quad (3.4)$$

3.3 무인반송차의 퍼지 제어기 설계

퍼지 제어기는 시스템의 정확한 모델링이 필요하지 않으므로 무인 반송차 시스템과 같이 기계적인 파라미터를 알기 힘들거나 입·출력의 관계가 비선형성을 가지는 시스템에 적합하다. 무인 반송차의 주행 실험에서 관찰된 주행 특성에 근거하여 전진부 변수를 센서의 변화로 하였으며 차체의 이탈시간은 3개의 센서 중에 좌, 우측 센서중에 하나 이상이 유도선을 이탈하는 시점에서부터 카운팅 된다. 센서의 변화는 매 샘플링 시간마다 모니터링 하였으며 센서의 상태가 변화했을 경우만을 퍼지 제어기의 입력신호로 규정하였다. 발생 가능한 센서의 변화는 모두 12가지 이며 이탈시간과의 조합은 모두 60가지 이다. 이탈시간의 범위는 1~6초로 정하였다. 계산된 값은 후진부 변수의 퍼지 멤버십 함수를 이

용하여 center average defuzzifier 의해 비퍼지화 된다[10]. 비퍼지화된 제어입력은 무인반송차의 각 모터에 인가된다. 후진부 변수의 멤버십 함수로 표현하면 그림 3.3과 같다.

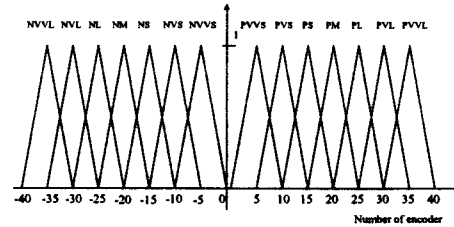


그림 3.3 퍼지 멤버십함수
Fig 3.3 Membership function for output

4. 실험 및 결과

4.1 무인반송차 시스템의 구성

무인반송차 시스템의 전체적인 구성은 차체와 이를 구동할 수 있는 모터와 감속기로 구성되는 구동부, 제어프로그램을 수행하고 모터를 구동하는 중앙처리장치, 유도선을 감지하고 입력된 데이터를 중앙처리장치에 전달해 주는 센서부로 나눌 수 있다. 차체의 형상은 그림 4.1에 나타내었다. 크기는 700 mm x 600 mm 크기의 사각형으로 되어있다.

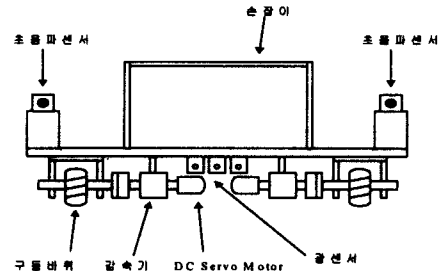


그림 4.1 무인반송차 차체의 전면도
Fig 4.1 Front view of AGV

그림 4.1에 나타낸 바와 같이 앞바퀴에 구동 모터를 장착하고 감속기와 구동바퀴를 커플러로 연결하였다. 전면 중앙에 3개의 광센서를 장착하였고 좌,우 양단에 초음파 센서를 설치하였다. 뒤바퀴에 자유회전 바퀴를 장착하여 회전시 차체의 원활한 움직임을 확보하였다. 구동 토크를 확보하기 위하여 25:1의 기어비를 갖춘 감속기를 부착하였으며 40[W]급의 DC Servo 모터를 사용하였다.

4.2 실험 결과

데이터는 각각 개루프(open loop) 응답, on-off 제어기 응답, 논문에서 제안한 제어기의 응답을 측정하였다. 개루프 응답의 경우 기계적인 파라미터 차이와 제작상의 오차로 인해 양바퀴의 속도 차이가 컸다. 무인 반송차를 6[m] 정도 주행시킨 후 모터의 엔코더로부터 얻은 데이터로 전절에서의 유도 방정식에 의해 조향각과 x 좌표, y 좌표를 구하여 Matlab을 이용하여 이동궤적 파형에 대하여 나타내었다.

그림 4.2 ~ 그림 4.4의 실험결과 파형에서 (+)는 좌측, (-)는 우측방향을 나타낸다. 개루프일 경우 차체의 중량에 의한 관성으로 기준 속도에 도달하는 시간이 매우 길어짐을 알 수 있다. 실험 결과 기준 속도 0.06[m/s]에서 제안된 제어를 사용하였을 경우의 속도 응답은 on-off제어를 사용했을 경우보다 약 47[%]의 속도 편차가 작아짐을 볼 수 있다. 그림 4.2는 양쪽의 구동륜의 속도 차이에 대한 결과이다. 개루프일 경우 영점에서 우측으로 급격하게 편차가 발생하였다. 즉 제어가 없을 경우 기계적인 오차로 인해 양 바퀴의 속도차이가 크다는 것을 알 수 있다. on-off제어의 경우 한쪽으로 치우치지는 않지만 속도 차이가 제안된 제어를 사용하였을 경우보다 크게 나타났다. 양바퀴의 속도차는 방향오차를 유발시키는 주요인이므로 가능하면 작게 하여야 한다. 그림 4.3은 조향각의 변화를 나타낸 것으로 무인 반송차가 실제 한 샘플링 시간동안 향하고 있는 방향각을 적분한 결과를 나타내었다. on-off제어를 사용하였을 경우 조향각이 점차 커졌고 결국 경로를 이탈하였다. 반면 제안된 제어기는 조향각이 제한된 오차범위를 가지고 있음을 볼 수 있다. 그림 4.4는 실제 이동궤적을 2차원 평면상에 나타낸 것으로 개루프의 경우 처음부터 경로를 완전히 이탈하였고 on-off제어를 사용하였을 경우 약 5[m] 지점에서 유도선을 완전히 이탈하였음을 볼 수 있다. 반면 제안된 제어기는 on-off제어기보다 작은 추적오차를 가지며 경로의 끝까지 이탈하지 않고 주행하는 것을 볼 수 있다. 이상에서 제안된 제어기가 on-off 제어기보다 성능면에서 우수함을 확인하였다.

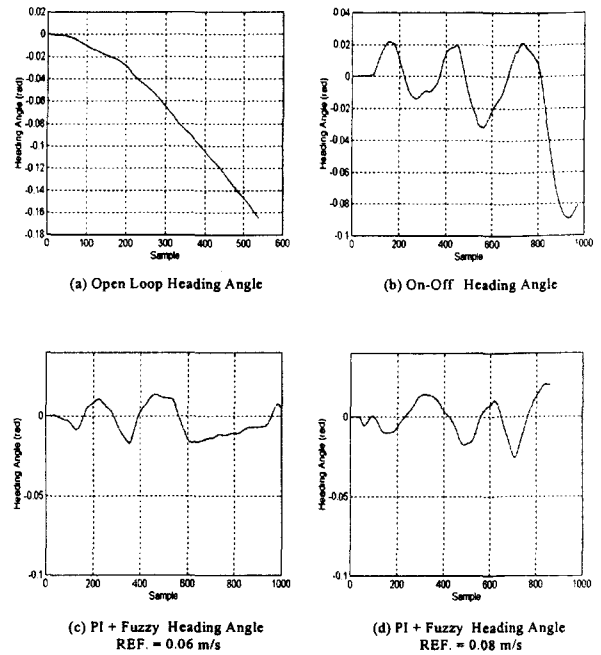


그림 4.3 조향각에 따른 실험결과파형
Fig 4.3 Experimental results according to head angle

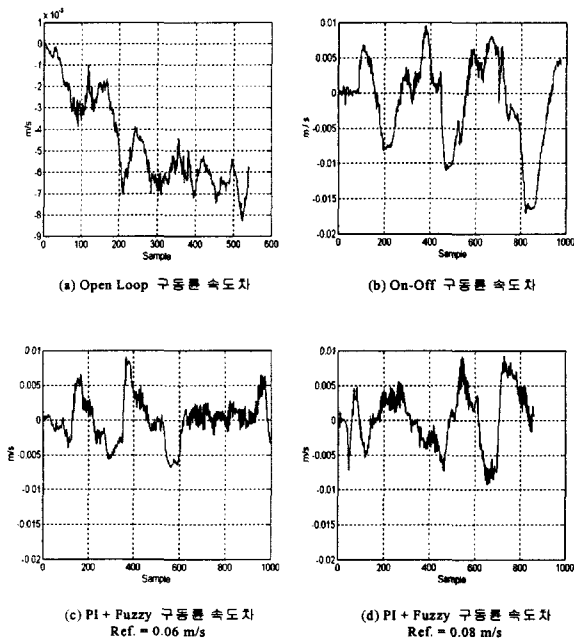


그림 4.2 구동 바퀴의 속도에 따른 실험결과파형
Fig 4.2 Experimental results according to steering speed

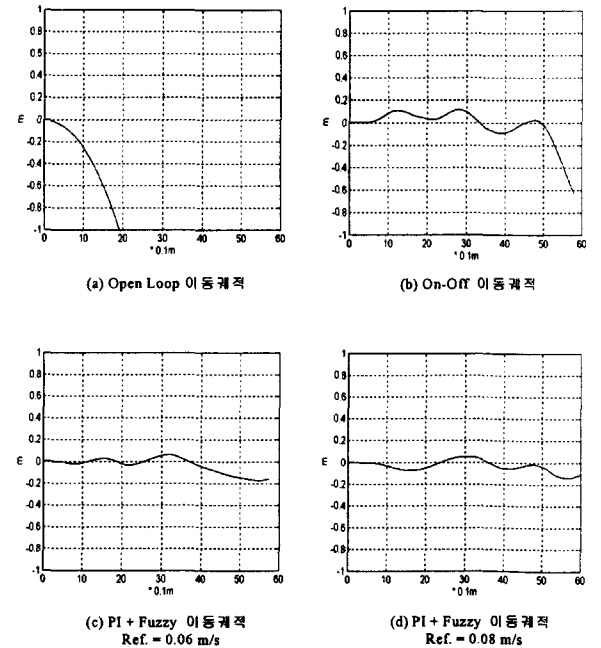


그림 4.4 이동 궤적의 실험 결과 파형
Fig 4.4 Experimental results of moving trajectory

5. 결 론

본 논문에서는 관성이 크고 응답의 시간지연이 존재하고, 센서의 수가 적기 때문에 유도선의 진입·이탈 각도를 알 수 없는 시스템 특징을 가지고 있는 무인 반송차의 퍼지 상호 결합 제어기에 관한 것이다. 센서의 수가 많으면 무인 반송차의 이탈 정도를 수치적으로 알 수 있으므로 제어하기가 용이하나 고가인 센서를 추가하려면 많은 비용이 소요된다. 이는 무인반송차를 제작하는 데 있어 원가 상승의 요인이 되므로 경제적인 면에서 바람직하지 못하다. 따라서 센서의 수가 적은 무인 반송차에 본 논문에서 제안한 제어기가 적용되었을 경우 기존의 on-off 제어기보다 제안된 PI제어기와 퍼지 제어기를 결합한 상호결합제어기가 무인 반송차의 추적성능을 향상시켰음을 실험을 통하여 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] A. Gaillet, "Optical automatic guidance system of a mobile robot for industrial manufacturing", *Proc. 1st Int. Conf. on A.G.Vs*, pp. 79-88, 1981.

[2] M. Tajima, "Computer controlled wire guided vehicle in FMS", *Proc. 1st Int. Conf. on A.G.Vs*, pp. 137-144, 1981.

[3] M.H.E. Larcombe, "Stability of wire guided vehicle in FMS", *Proc. 1st Int. Conf. on A.G.Vs*, pp. 1-10, 1981.

[4] J.Cselenyi, S.Kovacs, L.Pap, "New concepts in the fuzzy logic controlled path tracking strategy of the differential steered AGVs", *Proc. of 5th Int. Workshop on Robotics*, pp. 587-592, 1998.

[5] L. Feng, Y. Koren, J. Borenstein, "Cross-Coupling Motion controller for mobile robot", *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 35-43, Dec. 1993.

[6] Y. Koren, "Cross-Coupled Biaxial Computer Controls for Manufacturing Systems", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 102, No. 4, pp. 265~272, 1980.

[7] K. Srinivasan, P. K. Kulkarni, "Cross-Coupled Control of Biaxial Feed Drive Servomechanisms", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 112, No. 2, pp. 225~232, 1990.

[8] H. Y. Chuang, C. H. Liu, "Cross-Coupled Adaptive Feedrate Control for Multiaxis Machine Tools", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 113, pp. 451~457, 1991.

[9] Electro-Craft Corporation, *DC Motors speed controls servo systems*, Pergamon Press, 1977.

[10] E. H. Mamdani, S. Assilian, "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller", *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 7, No.1, pp. 1~13, 1975.

저 자 소 개



신 두 진 (申 杜 眞)
 1989년 인하대 공대 전기공학과 졸업.
 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
 1990년~1998년 LG전자 선임연구원. 1998
 년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
 Tel : 032-860-7394, Fax : 032-864-6442
 E-mail : djshin@inhavision.inha.ac.kr



허 옥 열 (許 旭 烈)
 1951년 12월 31일 생. 1974년 서울대 공대
 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기
 공학과 졸업(공박). 1985년~1986년 미국
 일리노이대 방문교수. 1981년~현재 인하
 대 전자전기컴퓨터 공학부 교수.

Tel : 032-860-7394, Fax : 032-864-6442
 E-mail : uyhuh@inha.ac.kr