

AGV용 퍼지 상호 결합 제어기 설계

정갑균, 허옥열, 김진환
 인하대학교 전기공학과, 두원전문대 컴퓨터 응용제어과

A Design of Fuzzy-Cross Coupling Controller for AGV

Kab-Kyun Jeong, Uk-Youl Huh, Jin-Hwan Kim

Dept. of Electrical Eng., Inha University, Dept. of Computer Applied Control, Doowon Technic

Abstract - In this paper, the cross-coupling controller with fuzzy logic for AGV is developed. Cross-coupling control directly minimizes orientation error by coordinating the motion of the two drive wheels and uses PI controller for compensation. But, the transient response of PI controller results in deviation from trajectory. The Fuzzy Cross-coupling controller enhances transient performance without steady-state error. The performance of the above controller is demonstrated by simulation and is compared with that of PI controller.

1. 서 론

무인 반송차는 생산 공정의 합리화를 기하기 위한 공장 자동화에서의 유연성 있는 다목적 운반 수단이고 또한 임의의 작업 공간에서 원하는 위치로의 이동이 가능하기 때문에 매니플레이터가 할 수 없었던 작업을 수행함으로써 군사 분야, 핵발전소의 유지보수, 무인 우주탐사 등의 분야에서 다양하게 활용할 수 있어 많이 연구되고 있다. 이러한 무인 반송차의 정확한 제어는 미지의 환경에서도 정확한 추종을 가능하게 한다.

무인 반송차의 조향방식은 삼륜구동방식(Tricycle Steering), 다륜구동방식(Multi-Wheel Steering) 과 구동방식(Differential Steering)으로 분류할 수 있다. 중 차륜구동방식은 양 바퀴의 속도 차를 이용하여 조향하는 방식으로 조향과 구동을 동일한 모터로 수행하므로 기계적인 부분이 간단하고 제작이 간단하여 실용화하기에 적합하다. 일반적인 차륜구동방식의 무인 반송차는 각 구동 루프가 자체의 내부 센서(엔코더)의 정보에 의해 독립적으로 제어되기 때문에 한 쪽 루프에만 외란이 인가될 경우에 발생하는 오차를 두 루프가 동시에 보상할 수 없다. 이러한 두 구동 루프는 무인 반송차의 차체를 통하여 커플 되어 있기 때문에 경로오차를 유발하는 원인이 된다.

상호 결합 제어기는 각 루프에서 발생하는 오차를 서로 공유하여 이러한 단점을 극복하기 위하여 사용한다. 즉, 경로 추종 성능에 가장 큰 오차를 유발하는 주된 요인을 자체의 방향 오차라 규정하고 각 구동 루프의 엔코더로부터 방향 오차를 계산하여 이를 보상하는 제어 전략을 갖는 제어기이다[1]. 이 방향 오차가 누적되어 큰 경로 오차를 유발하므로 기존의 상호 결합 제어기는 PI 제어기를 사용하여 정상상태 오차인 방향 오차를 제거함으로써 오차의 누적을 보상하였다. 그러나 PI 제어기는 과도 상태 응답 특성으로 인하여 정상상태에 도달하는 시간만큼의 경로 오차를 필연적으로 수반하게 된다. 이러한 경로 오차는 외란이 인가되는 횟수에 비례하여 그 오차가 더욱 증가된다.

본 논문에서는 PI 제어기의 정상상태 특성을 가지면서 경로 오차를 최소화하는 퍼지 논리 제어기를 제안한다.

2장에서는 상호 결합 제어기의 구조를 분석하고 3장에서 퍼지 논리 제어기를 설계한다. 4장에서는 모의 실험을 통하여 제안된 제어기의 성능이 향상됨을 보이고 5장에서 결론을 맺는다.

2. 상호 결합 제어기의 분석

오차를 유발하는 원인은 엔코더와 같은 내부 센서로부터 감지할 수 있는 내부 오차와 외부 계로부터 발생하는 외부 오차로 분류할 수 있다. 이 중에서 상호 결합 제어기는 내부 오차에 대한 제어만을 다루고있다.

2.1 위치 오차의 분석

무인 반송차의 위치 오차는 궤적 오차 e_c 와 추적 오차 e_t , 방향 오차 e_θ 로 나눌 수 있다. 추적 오차는 속도를 증가시킴으로써 보상할 수 있다. 궤적 오차는 방향 오차로 인하여 발생하므로 이 방향 오차가 무인 반송차의 동작에 가장 큰 영향을 미치게 된다. 이 방향 오차를 제거하여 차체가 원하는 경로와 평행하게 주행하도록 한다면 궤적 오차는 수렴될 수 있다.

2.2 상호 결합 제어기

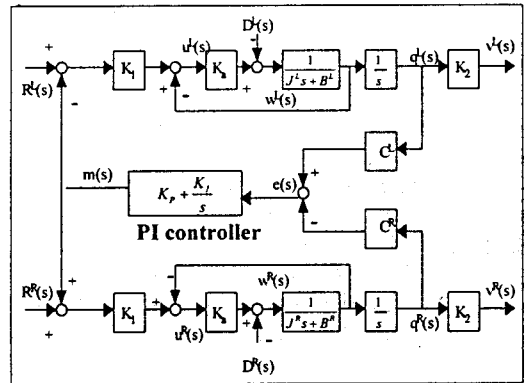


그림 1 상호 결합 제어기

상호 결합 제어기의 제어 개념은 각 루프의 오차를 개별적으로 수행하는 것이 아니라 각 루프의 오차로부터 계산된 자체의 오차를 보상하도록 서로의 되먹임 신호를 이용하여 제어신호를 생성하는 것이다. PI 제어기를 사용하는 상호 결합 제어기의 구조로부터 왼쪽 바퀴의 움직인 거리 q^L 을 구하면 다음과 같다. 그림1을 참조한다.

$$q^L(s) = \frac{1}{s(J^L s + B^L)} (K_a u^L(s) - D^L(s)) \quad (1)$$

또한 오차 성분 $e(s)$, 제어기의 출력 $m(s)$ 과 $u^L(s)$ 를 구하면,

$$e(s) = C^L q^L(s) - C^R q^R(s) \quad (2)$$

$$m(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) e(s) \quad (3)$$

$$u^L(s) = (R^L(s) - m(s))K_1 - s q^L(s) \quad (4)$$

이고, 만약 외란이 없다고 가정하면

$$v^L = \frac{K_a(R^L + R^R)}{K_a(C^L + C^R) + B^R C^L + K^L C^R} \quad (5)$$

을 얻을 수 있다.

원하는 정상 상태에서의 속도를 v_0^L 과 v_0^R 이라 하고 C^L 과 C^R 을 다음과 같이 선정하면

$$\frac{C^L}{C^R} = \frac{v_0^R}{v_0^L} \quad (6)$$

식(5)와 (6)으로부터

$$R^L + R^R = \frac{B^R + K_a}{K_a} v_0^L + \frac{B^L + K_a}{K_a} v_0^R \quad (7)$$

를 얻을 수 있고 이 식으로부터 R^L 과 R^R 를 구할 수 있다. 따라서 각 루프의 시정수는 같다고 할 수 있고 시스템 외란의 크기를 각각 D^L 과 D^R 이라고 가정하면 정상 상태에서의 속도를 식 (8)과 (9)와 같이 얻을 수 있다.

$$v^L = \frac{C^R}{C^L + C^R} \frac{1}{B + K_a} \left[K_a(R^L + R^R) - \frac{K_2 B}{J} (D^L + D^R) \right] \quad (8)$$

$$v^R = \frac{C^L}{C^L + C^R} \frac{1}{B + K_a} \left[K_a(R^L + R^R) - \frac{K_2 B}{J} (D^L + D^R) \right] \quad (9)$$

위의 식에서 식(6)의 관계가 만족함을 알 수 있다. 즉 외란이 존재하더라도 결국 양 바퀴의 속도 비는 영향을 받지 않는다는 것을 보여준다[1].

이러한 해석으로부터 상호 결합 제어가 정상 상태에서 항상 $C^L/C^R = v^R/v^L$ 의 관계를 만족하고 외란을 제거함으로써 정상 상태의 방향 오차가 영이 됨을 알 수 있다. 따라서 상호 결합 제어기는 두 루프가 다른 시정수를 가지거나 양 바퀴의 반지름이 다른 경우 R^L 과 R^R , C^L 과 C^R 을 이용하여 원하는 형태의 궤적을 수행케 하고 비대칭 부하나 루프의 계수값 변동과 같은 외란에도 항상 방향 오차를 영으로 수렴시킨다.

그러나 이처럼 상호 결합 제어기에서 방향 오차 성분을 PI 제어기를 이용하여 보상할 경우 정상 상태에 도달하기까지의 과도 상태가 반드시 존재하며 결과적으로 이 과도 상태에서의 진동에 해당하는 경로 오차가 발생하게 된다. 따라서 정밀한 위치 제어를 위하여 이러한 정상 상태 위치 오차가 없는 동시에 과도 응답의 성능을 향상시키는 것은 대단히 중요하다.

3. 퍼지 논리 제어기

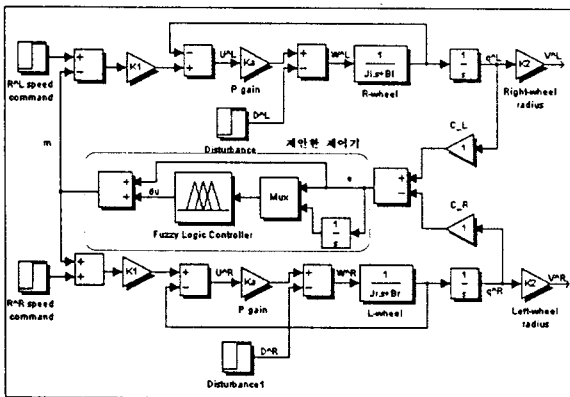


그림 2 제안된 시스템의 블록 선도

3.1 제어기의 구조

퍼지 논리 제어기의 기본 구조는 수치적 변수 값을 퍼지 집합의 변수 값으로 변환하는 퍼지화(Fuzzifier)와 규칙 기반을 바탕으로 입력 퍼지 집합으로부터 출력 퍼지 집합으로 사상시키는 퍼지 추론 엔진(Fuzzy implication engine), 퍼지 변수 값을 수치적 변수 값으로 재 변환하는 비퍼지화(Defuzzifier)로 이루어진다[2].

일반적으로 퍼지 논리 제어기의 설계는 시스템의 수학적 모델보다는 입출력 관계에 치중한다. 따라서 퍼지 논리 제어기는 입출력 변수의 형태에 따라 다른 기능을 가진다. 입력 변수로 오차와 오차의 변화율 그리고 출력 변수 값으로 제어 출력량을 선정함으로써 PD 제어기와 유사한 성능을 가진다[3].

그러나 본 논문에서는 2장에서 검토한 바와 같이 정상 상태 오차가 존재하지 않으면서 과도상태의 진동을 줄이기 위하여 입력 변수로써 오차와 오차의 적분값, 출력 변수로써 제어 출력 량의 변화치를 선정한다. 제안한 제어기를 포함한 전체 시스템의 구조는 그림 2와 같다.

3.2 제어기 설계

3.2.1 퍼지화, 퍼지 추론 엔진, 비퍼지화

퍼지 추론 방법은 Mamdani의 product implicatic 사용하는 Product 추론 엔진을 사용하고 계산 량이 적은 삼각형 퍼지화(Triangular Fuzzifier)를 사용하며 비퍼지화 값을 결정하는데 가장 많이 사용되는 무게 중심법 비퍼지화(Center Average Defuzzifier)를 사용하여 다음과 같은 추론 값을 얻는다.

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^M \bar{y}' \left(\prod_{j=1}^n \mu_{A_j}(x_j^*) \right)}{\sum_{i=1}^M \left(\prod_{j=1}^n \mu_{A_j}(x_j^*) \right)} \quad (10)$$

3.2.2 규칙 기반

퍼지 규칙은 표 1과 같이 오차와 오차의 적분 항이 영으로 수렴하도록 구성하였다.

제어 변화량	$\int E$							
	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB	
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	
NM	NB	NB	NM	NS	NS	NS	ZR	
NS	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	
ZR	ZR	PS	PS	PS	PM	PM	PB	
PS	ZR	PS	PS	PM	PM	PB	PB	
PM	PS	PS	PS	PM	PM	PB	PB	
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	

표 1 제어 규칙 기반

3.2.3 멤버십 함수

두 전건부 변수의 멤버십 함수의 형태는 그림 3과 같이 동일하고 각각의 범위는 오차변수가 [-0.1 0.1], 오적분항이 [-0.4 0.4]로 하였다.

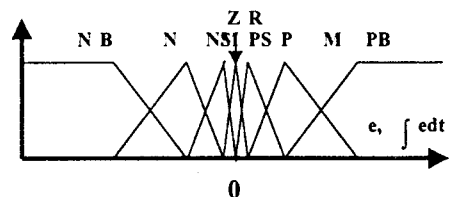


그림 3 전건부 변수의 멤버십 함수

후건부 변수의 멤버십 함수의 형태는 그림 4와 같고

범위는 [-5 5]로 하였다.

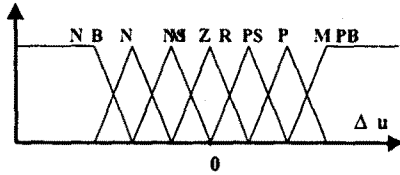


그림 4 후건부 변수의 멤버십 함수

4. 모의실험 및 결과

위에서 설계한 제어기의 성능을 모의실험을 통하여 PI 제어기의 성능과 비교한다. 모의실험은 SIMULINK로 수행하였으며 다음과 같은 가정을 전제로 이루어 졌다.

i) 바퀴의 미끄러짐은 없다. ii) 주행면은 평탄하다.
 각 바퀴에 사용되는 모터의 시정수는 실제를 고려하여 각각 $J^R=0.700420$, $B^R=4.2194$, $J^L=0.733326$, $B^L=4.4444$ 로 하였으며 각 루프의 이득은 $K_1=1$, $K_a=2$ 이다. 또한 바퀴의 반지름은 10cm로 정하였다. $C^L=C^R=1$ 로 하여 직선 주행을 수행하였으며 원하는 차체의 선속도는 0.5m/s로 하였다. 샘플링 주기는 제어기를 실행할 경우의 제어기의 계산량을 고려하여 0.01초로 하였으며 모의실험은 50초 동안 수행하였다. 외란은 비대칭 부하를 고려하여 스텝 외란을 각 루프에 인가하였다. PI 제어기의 이득은 비례 이득과 적분 이득이 서로 상관관계를 가지며 다른 성능을 보이는데 $K_p=5.13$, $K_i=10.22$ 의 비율일 경우 가장 좋은 성능을 나타내었다. 전체적인 제어기의 이득을 크게 하면 응답속도와 정상상태 오차가 줄어들지만 과도 상태에서 양 바퀴의 심한 진동을 보인다. 이러한 진동은 바퀴의 미끄러짐 오차를 유발하여 진행방향이 어긋나는 결과를 초래하게 된다.

그림 5에 모의 실험 결과를 비교하였다. 결과에서 알 수 있듯이 제안된 퍼지 논리 제어기는 정상 상태오차를

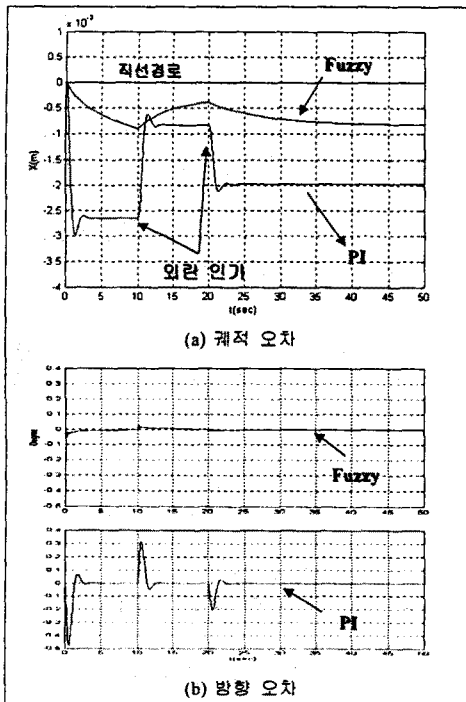


그림 5 $J^R=0.700420$, $J^L=0.733326$

갖지 않으면서 PI 제어기에 비해 우수한 과도 응답 특성을 가짐으로써 궤적 오차를 줄임은 보여 주고 있다. 또한 주행시의 초기 부하가 증가하였을 경우는 양 바퀴 모터의 관성 모멘트가 증가한 것으로 간주할 수 있으므로 제어기의 계수는 동일한 상황에서 관성 모멘트가 3배 증가하였을 경우의 실험 결과를 그림 6에 나타내었다. 이 경우에도 제안된 제어기는 제어기의 계수값 변경 없이도 안정된 성능을 보임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 차륜 구동 무인 반송차의 가장 심각한 오차라 할 수 있는 방향 오차를 제거하기 위해 가장 많이 사용되고 있는 상호 결합 제어의 구조를 분석하고 그 오차를 보상하기 위하여 기존의 PI 제어기 대신에 퍼지 논리 제어기를 사용함으로써 정밀한 위치 제어를 수행할 수 있고 비대칭 부하 등의 외란이나 매 운행 시에 달라지는 부하에도 강인함을 보였다. 이러한 정밀한 위치 제어는 무인 반송차를 기반으로 하는 매니플레이터 등에서 의 정밀도 향상을 기할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] L.Feng, Y.Koren, and J.Brenstein, "Cross-C Motion Controller for Mobile Robots", IEEE Control S Magazine, pp.35-43, December 1993
- [2] C.C.LEE, "Fuzzy Logic in Control Systems: Logic Controller - Part I,II", IEEE Transactions on S Man, and Cybernetics, vol. 20 NO. 2, pp.404-435, April 1990
- [3] S.C.Jee, "Fuzzy logic controls for CNC machine A dissertation submitted in partial fulfillment requirements for the degree of Ph.D. in the Univer Michigan, pp. 23-48, 1996
- [4] L.X.Wang, "A Course In Fuzzy Systems And Control", Prentice-Hall press, pp.89-117, 1997

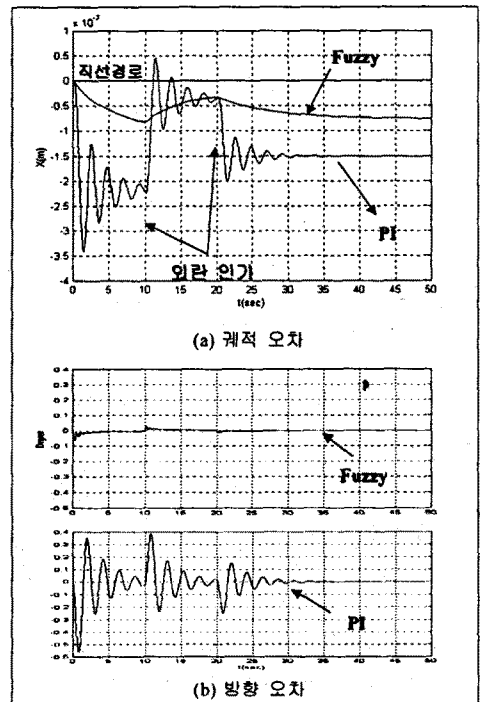


그림 6 $J^R=0.700420*3$, $J^L=0.733326*3$