

Observer를 이용한 무인 반송차의 경로 추종 제어

이원경*, 임일선, 허욱열
인하대학교 전기공학과

Tracking control of AGV with Observer.

Won-Kyung Lee*, Il-Sun Im, Uk-Youl Huh
Department of Electrical Engineering, Inha University

Abstract - This thesis deals with study and implementation of Fuzzy controller with observer which can enhance the path-tracking performance of optically guided AGV(Automated Guided Vehicle). The AGV in this thesis is differential drive type and has front-side and rear-side optical sensors, which can identify the guiding path. This controller has excellent disturbance rejection and therefore is advantageous when it is instructed to follow straight paths. This fuzzy controller with observer enhances transient performance of the controller is demonstrated by simulation and is compared with that of individual loop controller

1. 서론

최근 산업 현장에서 공장 자동화 즉, 유연 생산 체계의 개념이 산업 현장에 확산되고 생산 체계 또한 다품종 소량 생산으로 변화하고 있다. 이러한 현황으로 볼 때 생산 공장 내에서 생산에 필요한 자재들의 운반이 다양하고 복잡해졌다. 이에 따라 공장 내에서 자재 및 생산품의 운반을 수월하게 하는 AGV(Automated Guide Vehicle)의 활용 범위가 넓어지고 있으며, 이 AGV는 작업 공간 내에서 임의의 위치 이동이 가능하기 때문에 메뉴플레이터가 할 수 없었던 작업 공간의 제약을 줄이고 더 많은 작업 능력을 가지고 있어서 많이 연구되어지고 있다.

AGV는 주행 방식에 따라 일정한 경로만을 따라 주행하는 고정 경로 방식과 출발점과 목표점을 주어진 스스로 최단 경로를 찾아서 이동하는 자율 주행 방식으로 분류할 수 있다. 현재 산업 현장에서 주로 이용되는 AGV는 작업장 바닥 표면에 자기 유도선 또는 광학 테이프등의 연속적인 고정 궤도를 따라 운행되는 방식으로 궤도를 정확하게 추적해 갈 수 없다는 점과 위치 제어가 비교적 간단하다는 점에서 신뢰성이 높으며 그 중 광유도식 AGV는 다른 방식에 비해 저렴한 비용으로 제작할 수 있다는 장점이 있다.

이러한 AGV는 기존의 수학적 모델로는 만족스러운 결과를 얻지 못하는 복잡한 시스템을 다루거나 제어 대상이 시간에 따라 변화하는 시스템일 경우에는 기존의 방법을 적용하기 어렵다. 그러나 Fuzzy 제어기는 복잡한 수학적 방법을 거치지 않고도 잘 정의 되지 않는 시스템을 다루기에 적합하기 때문에 Fuzzy 제어 기법이 많이 연구되어지고 있다. 기존의 실용화된 AGV는 구현이 간단한 On-Off제어 알고리즘을 사용하였지만 주행시에 발생하는 다양한 오차를 충분히 보상하여 주지 못하고 추종오차가 항상 존재하며 주행 속도를 높일 경우 경로를 이탈할 가능성이 크다. 이를 해결하기 위해 본 논문은 Fuzzy제어기에 Observer를 이용하여 방향 오차와 윤곽오차를 줄이는 것은 물론 방향 오차를 더욱 효과적으로 줄이는 방법을 제안한다

2. 본론

2.1 AGV의 오차 분석

오차는 크게 나누어 내부 오차와 외부 오차로 분류할 수 있다. 내부 오차는 모터의 엔코더로부터 측정할 수 있는 오차이고, 외부 오차는 바퀴의 반지름의 차이나 바닥 면의 굴곡, 바퀴의 미끄러짐 현상 등이 있다. 이런 외부 오차는 센서만으로는 측정할 수 없으며 이러한 경우는 대부분 고가의 장비를 이용하여야 한다. 내부 오차의 주된 원인중의 하나는 구동 바퀴의 동력원으로 사용되는 모터의 시정수가 다른 경우에 본체 양쪽 축의 모터 속도 응답이 달라지는 경우인데 이것은 양쪽 모터에 같은 값의 속도를 주어도 원하는 직선 주행을 할 수 없게 된다. 이런 기계적인 오차는 입력되는 속도 값을 다르게 주어진다면 보정할 수 있다. 또한 AGV가 주행도중 부하가 변경되거나 부하가 한 방향으로 편중되는 경우에 모터의 마찰력을 증가시키므로 외란으로 규정할 수 있다.

AGV가 유도 경로를 주행하면서 발생하는 위치 오차의 원인은 그림1에서와 같이 궤적 오차 e_c 와 추적 오차 e_t , 방향 오차(Orientation error) e_θ 의 세 가지 성분으로 고려할 수 있다. 궤적 오차는 방향 오차로 인하여 발생하므로 이 방향 오차가 AGV의 동작에 가장 큰 영향을 미치게 된다. 이 방향 오차를 제거하여 차체가 원하는 경로와 평행하게 주행하도록 한다면 궤적 오차는 수렴될 수 있다.

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

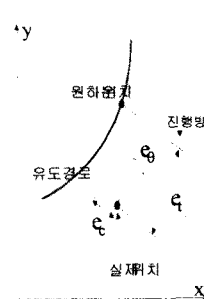


그림 1. AGV의 오차 분석

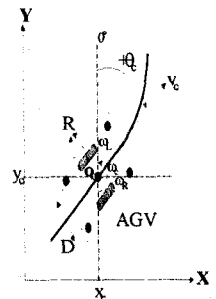


그림 2. 절대 좌표상의 AGV

3. AGV의 기하학적 해석

이동 공간 내에서 AGV의 절대 위치는 3개의 공간좌표와 3개의 회전각으로 표시되어야 하지만, 이동하는 바닥면의 굴곡이 심하지 않다는 가정에서 AGV의 중심점

은 평면 좌표 (x_c, y_c) 와 조향각 θ_c 의 3자유도로 표시된다.

AGV는 실제로 2차원 평면을 주행하고 있으며, 절대 좌표값 (x_c, y_c) 와 AGV의 길이 축과 Y축 사이의 각도 θ_c 로 결정된다.

AGV의 추정 경로 각도를 w_c 라하고 회전 반경 r 을 구하면

$$r = \frac{w_l}{w_c} R \quad (1)$$

로 표시되고 두 바퀴가 그런 궤적의 비는 $r : r-D$ 이므로

$$w_R R : w_L R = r : r-D \quad (2)$$

$$r w_L R = w_R R r - w_R R D \quad (3)$$

이고 다음과 같다.

$$\omega_c(t) = \frac{\omega_L(t) - \omega_R(t)}{D} R \quad (4)$$

$$v_c(t) = \frac{\omega_L(t) + \omega_R(t)}{2} R \quad (5)$$

$$\frac{dx_c(t)}{dt} = v_c(t) \sin \theta_c(t) \quad (6)$$

$$\frac{dy_c(t)}{dt} = v_c(t) \cos \theta_c(t) \quad (7)$$

$$\frac{d\theta_c(t)}{dt} = \omega_c(t) \quad (8)$$

$$x_c(t) = x_0 + \frac{R}{2} \int_0^t [(\omega_L(t) + \omega_R(t)) \sin \theta_c(t)] dt \quad (9)$$

$$y_c(t) = y_0 + \frac{R}{2} \int_0^t [(\omega_L(t) + \omega_R(t)) \cos \theta_c(t)] dt \quad (10)$$

$$\theta_c(t) = \theta_0 + \frac{R}{D} \int_0^t (\omega_L(t) - \omega_R(t)) dt \quad (11)$$

차체의 속도입력 $V_s(s)$ 와 조향 속도입력 $V_d(s)$ 로부터 좌·우 모터의 속도 지령값 $V^L(s) \cdot V^R(s)$ 을 구하면

$$V^L(s) = K_s V_s(s) + \frac{K_d}{2} V_d(s) \quad (12)$$

$$V^R(s) = K_s V_s(s) - \frac{K_d}{2} V_d(s) \quad (13)$$

이 되고, 좌·우 모터의 토크 입력값 $u^L(s), u^R(s)$ 은 다음과 같다.

$$u^L(s) = K_a (K_L V^L(s) - \omega^L(s)) \quad (14)$$

$$u^R(s) = K_a (K_R V^R(s) - \omega^R(s)) \quad (15)$$

또한 모터의 각속도 $\omega^L(s) \cdot \omega^R(s)$ 를 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\omega^L(s) = \frac{u^L(s)}{J^L s + B^L} \quad (16)$$

$$\omega^R(s) = \frac{u^R(s)}{J^R s + B^R} \quad (17)$$

이 식으로부터 오차 분석에서 언급한 것처럼 두 모터의 시정수가 다름으로 인해서 발생하는 기계적 오차를 보정하기 위하여 모터에 인가되는 속도 지령값을 다르게 하여야 한다. 즉, 이것은 좌·우 구동모터의 정상 상태에서의 속도를 같게 하기 위한 속도 지령값을 찾아내는 문제로 규정할 수 있다. 따라서 원하는 모터 속도를

$W_{ss}^L \cdot W_{ss}^R$ 라 하고 식16,식17에 최종값 정리(Final-Value Theorem)을 적용하면,

$$W_{ss}^L = \lim_{s \rightarrow 0} \omega^L(s) = \frac{U^L_{ss}}{B^L} \quad (18)$$

$$W_{ss}^R = \lim_{s \rightarrow 0} \omega^R(s) = \frac{U^R_{ss}}{B^R} \quad (19)$$

그리고, 식14와 식15를 식18과 19에 대입하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$W_{ss}^L = \frac{K_a K_L K_s}{B_L + K_a} V_s + \frac{K_a K_L K_d}{B_L + K_a} V_d \quad (20)$$

$$W_{ss}^R = \frac{K_a K_R K_s}{B_R + K_a} V_s - \frac{K_a K_R K_d}{B_R + K_a} V_d \quad (21)$$

위 식에서 W_{ss}^L 와 W_{ss}^R 가 같아야 하고 그 때 $V_d=0$ 이므로 다음의 관계를 만족한다.

$$\frac{K_a K_L K_s}{B_L + K_a} V_s = \frac{K_a K_R K_s}{B_R + K_a} V_s \quad (22)$$

$$\frac{K_L}{K_R} = \frac{B^L + K_a}{B^R + K_a} \quad (23)$$

이와 같은 방법으로 K_L 과 K_R 의 비율을 선정하면 두 모터의 시정수가 다름으로 인하여 발생하는 오차를 보상할 수 있다.

4. observer를 포함한 퍼지 제어기

퍼지 제어기의 성능은 퍼지화 방법, 규칙기반, 비퍼지화 방법, 입출력 언어 변수의 모양에 관계된다. 특히 퍼지 제어기의 설계에 많은 영향을 미치는 것은 제어기의 전건부와 후건부의 언어변수의 소속 함수의 모양과 규칙기반이다. 이들은 경험과 시행착오를 거쳐서 최적값으로 조절된다. 그 중에서 규칙기반을 구성하는 과정은 프로세서의 수학적 모델보다는 설계자의 경험이 중심이 되는데 규칙기반을 정하는 방법으로는 전문가의 지식·경험에 의한 방법, 조각자의 조각모델에 의한 방법, 플랜트의 퍼지모델에 의한 방법, 학습규칙에 의한 방법 등이 있다. 본 논문에서는 첫 번째 방법을 선택하여 실제 AGV의 주행 실험을 한 후 언어적 결과와 운전자의 경험을 토대로 규칙기반을 작성하였다.

퍼지 제어기를 설계한 후 오프라인으로 추론을 행하여 퍼지 제어기의 입출력 매핑(mapping)을 나타낸 룩업 테이블을 작성한 후 이를 저장하여 온라인 상태에서 제어를 수행한다. 룩업 테이블 방식을 사용하면 계산 시간을 많이 줄일 수 있으나 퍼지 제어기의 입·출력 관계를 실제 추론에 가깝게 구현하기 위해서는 많은 기억 공간을 필요로 하게 되지만 본 논문에서 제안한 AGV 시스템의 특성상 광 센서의 상태 정보로부터 오차를 계산하여 얻은 값은 연속적인 값이 아닌 제한된 수의 이산 데이터이므로 퍼지 제어기의 입력 멤버십 함수는 퍼지 상글론 방법을 이용한 것과 같기 때문에 비교적 적은 양자화 레벨을 갖는다.

먼저 유도 경로를 추종하기 위해 필요한 정보인 계산된 방향오차 e_θ 와 윤곽오차 e_c 를 전건부 변수로 결정하였다. 또한 규칙기반을 설정하는데 있어서 실제 운전자의 경험을 충분히 언어적 표현으로 반영시켜야 하는데 차를 구동형 AGV의 입력은 좌·우 구동 모터의 속도입력이므로 경험상의 물리적 의미를 부여하기 어렵다. 따라서 물리적 의미를 갖는 규칙기반을 작성하기 위하여 후건부 즉, 출력변수로는 삼륜 구동형 AGV의 차체 입력으로 사용되는 조향 각도 V_d 와 차체 속도 V_s 로 결정하였다. 이 조향 각도, 차체 속도와 좌·우 모터의 속도 입력값 (V_L, V_R) 의 관계는 다음과 같다.

$$V_d = V_L - V_R \quad (24)$$

$$V_s = \frac{V_L + V_R}{2} \quad (25)$$

퍼지화 방법으로는 삼각형법을 사용하였고 AGV의 주행 실험에서 관찰된 주행 특성으로부터 입출력 변수의 support를 정하였다. 그리고, 입력이 θ_c 인 Observer를

추가하였다.

Observer의 dynamic은 y, u 그리고 observer의 출력인 state에 의존하는 식이 된다. 따라서

$$\frac{d}{dt} \hat{x}(t) = A_c \hat{x}(t) + Ly(t) + z(t) \quad (26)$$

$z(t), A_c$ 와 L 을 적절하게 선정하여, $\hat{x}(t)$ 은 $x(t)$ 를 approximation할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \hat{e}(t) &= \dot{x}(t) - \frac{d}{dt} \hat{x}(t) \\ &= Ax(t) + A_c \hat{x}(t) - Ly(t) + Bu(t) - z(t) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \hat{e}(t) &= (A - LC)x(t) - A_c \hat{x}(t) \\ &= A_c x(t) - A_c \hat{x}(t) = A_c e(t) \end{aligned} \quad (28)$$

$$[e(t) = x(t) - \hat{x}(t)]$$

$$[z(t) = B_u(t)]$$

만일 A_c 의 모든 고유치가 음의 실수 축에 있다면 estimating error의 dynamic은 asymptotically stable하다. 즉, $t \rightarrow \infty$ 이면 $e(t) \rightarrow 0, \hat{x}(t) \rightarrow x(t)$ 이다.

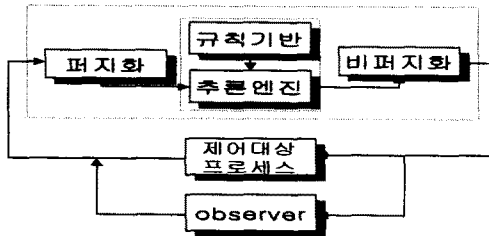


그림 3. 시스템 블록선도

5. 모의 실험

본 논문에서의 모의 실험은 Fuzzy 제어기만을 이용하여 시뮬레이션 한 결과는 그림4, 그림5,에 시뮬레이션 결과를 나타내었고, 그림6, 그림7은 Fuzzy 제어기에 Observer를 추가한 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 그림에서와 같이 Observer를 이용하였을 때 추종 성능이 향상됨을 볼 수 있었다.

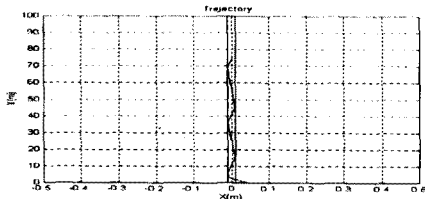


그림 4. Fuzzy 제어기만을 이용한 추종 결과

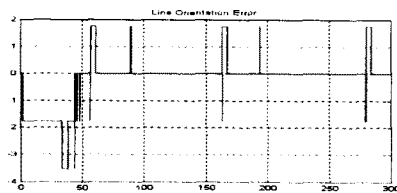


그림 5. Fuzzy 제어기만을 이용한 방향오차

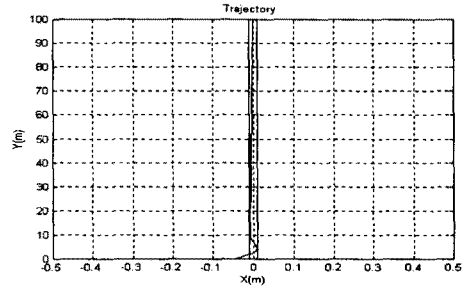


그림 6. Observer를 포함한 Fuzzy 제어기의 추종결과

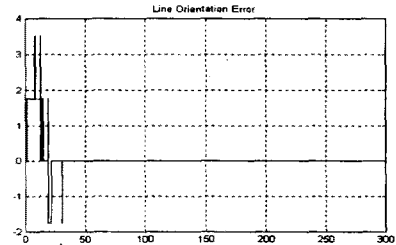


그림 7. Observer를 포함한 Fuzzy 제어기의 방향오차

6. 결 론

본 논문에서는 오차를 정의하고 AGV에 관하여 기하학적인 해석을 하였으며 Fuzzy제어기와 Observer를 이용한 전체 시스템을 구성하였다. 그리고, Fuzzy제어기에서의 방향오차와 추종 성능과 Fuzzy제어기와 Observer를 이용한 방향오차와 추종 성능을 비교한 바 Observer를 이용한 Fuzzy 시스템의 성능이 개선됨을 보였다.

[참고 문헌]

- [1] Xiao-Jun Ma, Zeng-Qi, "Analysis and Design of Fuzzy Controller and Fuzzy Observer", IEEE Transactions on Fuzzy System, Vol.6, NO.1, 41-51, February 1998.
- [2] H. Schneider and P. M. Frank, "Observer-Based Supervision and Fault Detection in Robots Using Nonlinear and Fuzzy Logic Residual Evaluation", IEEE Transactions on Control System Technology, Vol. 4, No. 3, 274-282, May, 1996.
- [3] Bader Alohwi, Hassan K. Khalil and Elias G. Strangs, "Robust Speed Control of Induction Motors Using Adaptive Observer", Proceedings of American Control Conference, San Diego, California, 931-935, June 1999.
- [4] Kwang Sik Jin, Tae sung Yun, "The Position and Heading Estimation System of Mobil Robot Using the Extended Kalman Filter", 대한전기학회 추계 학술대회 논문집, 683-686, 1998.
- [5] Y. Kanayama, Y. Kimuro, F. Miyazai, T. Noguchi, "A stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobil Robot", IEEE Trans. Robotics and Auto., 384-389, 1990.
- [6] Do Yoon Kim, Myung Jin Chung, "Tracking Control of Mobil Robot using Cross-Coupling Motion Controller.", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집 (RAO 1), 2379-2381, 1997.
- [7] Hakyong Chung, Jang Gyu Lee, "Fuzzy Logic Controller for a Mobil Robot Navigation.", 대한전기학회 하계학술대회논문집, 713-716, 1991.