Proceedings of the 12th
KACC, October 1997

이동로봇을 위한 퍼지로직 제어기
A Fuzzy-Logic Controller for a Differential-Drive Mobile Robot

°박영민*, 김대영*, 길진수*, 한상완*, 홍석교**
* 아주대학교 제어계측공학과(Tel:+82-331-219-2489; E-mail:chopin@madang.ajou.ac.kr)
** 아주대학교 전기전자공학부(Tel:+82-331-219-2476; E-mail:skhong@madang.ajou.ac.kr)

Abstracts This paper describes the design of a fuzzy-logic controller for a differential-drive mobile robots. This controller uses absolute position information to modify control parameters to compensate the orientation error. CC-Control method is compensted for the internal error by wheel encoders and the fuzzy-logic control provides compensation for external errors. The validities of the proposed scheme is evaluated using simulation.

Keywords Mobile Robots, Encoder, Orientation Error, CC-Controller, Fuzzy-Logic

1. 서론

로봇 매니퓰레이터는 자신이 도달할 수 있는 범위내에서만 작업을 할 수 있기 때문에 대부분의 작업영역은 로봇의 각 관절을 폈을때의 공간으로 한정된다. 그러나 이동 로봇은 임의의 작업 공간에서 원하는 위치로 이동이 가능하기 때문에 원자력 발전소, 무인 우주탐사, 지하갱도 작업등 인간이 작업하기 힘든 환경에서도 광범위하게 사용되고 있다. 이동 로봇의 연구는 로봇의 제어 및 동작 분석과 하드웨어 설계보다 장애물 회피 및 지형 지물의 인식등의 응용 분야에 초점을 두고 있다. 그러나 이동 로봇의 정확한 제어는 미지의 환경에서도 정확한 경로 추종을 가능하게 한다.

기존의 수학적인 모델로 만족스러운 결과를 얻지 못하는 복잡한 시스템을 다루거나 제어대상의 파라메터가 시간에 따라 변할때는 기존의 방법을 적용하기 어렵다. 그러나 퍼지 제어기는 복잡한 수학적 모델링 과정을 거치지 않고도 기존의 제어기법으로는 다루기 힘든 잘 정의되지 않는 시스템을 다루기에 적합하기 때문에 퍼지 제어기법이 많이 연구 되고 있다.[1] 본 논문에서 사용된 퍼지로직 제어기는 이동 로봇이 동작중에 발생하는 회전 오차(e_θ)를 보상하기 위하여 실시간에서 보상이득을 변경하는 역할을 한다.

로봇의 움직임 오차에는 내부오차와 외부오차가 있다. 본 논문에서 도입된 Cross-Coupling Control(CC-Control)은 두 구동 바퀴의 엔코더를 사용해 내부오차를 최소화하기 위한 것이며 퍼지로직 제어기는 외부오차를 보상하는데 사용한다.

본 논문을 통해서 CC-Controller의 구조와 기능을 설명할 것이며 퍼지 로직 제어기에 의해서 어떻게 동작 제어 성능이 향상되는지 보일 것이다. 2장에서는 이동 로봇의 오차 및 기구학을 분석한다. 3장에서 CC-controller의 분석 다음에 동작 제어기를 설계할 것이다. 4장에서는 외부오차를 제어하기 위한 퍼지로직 제어기를 설계하고 5장에서 모의 실험과 실험 결과를 제공한다.

2. Error Sources and System modeling

이동로봇에 발생하는 오차는 내부오차와 외부오차의 두가지로 분류할 수 있다. 내부오차는 바퀴의 움직임 정보에 의해 찾아낼 수 있는 오차이다. 외부 오차는 로봇 바퀴가 외부 환경에 의해 서로 영향을 미칠 때 나타나는 오차이다. 즉 외부오차는 절대적인 로봇 움직임 측정에 의해 찾아낼 수 있는 오차이다. 또한, 외부 오차에는 장시간 동안 오차의 성격이 변하지 않는 시스템적인 오차와 매 순간마다 불규칙하게 변하는 비시스템적인 오차가 있다.[3]

2.1 Motion Error Source

이동 로봇에서 발생하는 주된 내부오차의 원인은 다음과 같다. (1) 서로 다른 구동 루프 변수들. 같은 모터 드라이브를 사용해도 실제로 두바퀴를 위한 드라이브의 이득은 같지 않다. (2) 다른 구동 루프에 유입되는 서로 다른 외란. 실제로 두바퀴에서 작용하는 베어링 마찰력은 서로 다르다.

시스템에 의해 발생하는 주된 외부 오차의 원인은 다음과 같다. (1) 다른 바퀴지름. 두 개의 구동바퀴의 지름이 서로 다른 경우 같은 각속도를 가지면 로봇은 곡선으로 움직일 것이다. 바퀴 지름의 차이는 부하에 의해 바뀔수 있으며 외란 변화와 바퀴의 불규칙한 표면에 의해 발생할 수 있다. (2) 바퀴의 부정렬(misalignment). 구동바퀴의 부정렬의 효과는 한쪽 방향으로 로봇을 밀게 된다. (3) 접촉 면적. 바퀴가 바닥과 접촉하고 있을 때 이것은 접촉점이라기 보다 접촉 면적이다. 이것은 바퀴의 사이 거리에 대한 불확실성에 의한 것이다.

비시스템적인 오차에 의한 것은 다음과 같은 것이 있다. (1) 바퀴 미끄러짐. 미끄러짐은 dead-reckoning에서 심각한 문제이다. 그러나 미끄러짐은 보통 로봇이 곡선을 움직일때나 가감속할 때 발생한다. (2) 바닥 표면의 불균일. 로봇이 거친 바닥을 주행할 때 바퀴는 충돌보다 위 또는 아래로 움직인다. 바퀴의 충돌에 의해 엔코더 값이 부정확하여 실제 거리보다 주행거리가 짧아지게 된다. 보통상태에서 동작오차는 주로 외부오차에 의한 것이다. 외부의 비시스템적인 오차는 불규칙하고 이 오차를 예상하는데는 적당한 방법이 없으나 INS를 사용하

면 해결 가능하다.

2.2 Error Decomposition

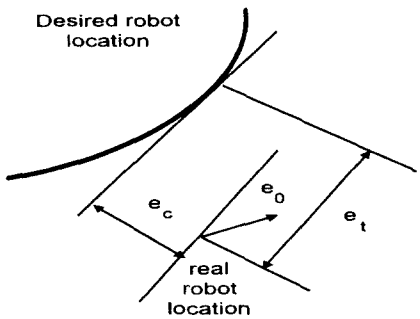

Fig1. Motion error decomposition

이동로봇의 동작오차는 그림에 보는 것처럼 재배치할 수 있다. 첫째는 실제 로봇의 회전과 원하는 로봇회전차이로 정의되는 회전 오차 e_θ이다. 회전오차는 제한없이 주행된 거리에 의해 커지는 궤적 오차이기 때문에 굉장히 중요한 것이다. 궤적 오차는 회전오차의 직접적인 결과이다. 세 번째 오차는 주행 방향으로 실제 위치와 원하는 위치사이의 거리로 정의되는 추종 오차 e_l이다. 추종 오차는 로봇 주행의 정확도 측면에서 중요한 영향을 미치지 않는다. 로봇의 동작에서 주요 관심사는 오차가 회전오차의 축적 때문에 무한히 커질 수 있다는 것이다. 따라서 중요한 점은 회전오차의 증가를 제어하는 것이다.

2.3 Robot Kinematics

2차원 공간에서 시간 n에서 이동로봇의 위치는 다음처럼 나타낼수 있다.

$$U_n=(X_n, Y_n, \theta_n)^t \quad (1)$$

시간 n-1에서 로봇의 상태를 알고 있다고 가정하면 로봇의 위치는 (X_{n-1}, Y_{n-1})이다. 만약 시간 n에서 로봇의 이동거리의 변화량과 회전의 변화량은 $\triangle D_n, \triangle\theta_n$으로 주어지면 새로운 회전 θ_n은 $\theta_{n-1}+\triangle\theta_n$으로 주어진다. 그러나 시간 n에서 로봇의 위치는 알려지지 않았다. 시간 n-1에서 출발한 로봇이 가지는 경로는 전체 원호의 길이가 $\triangle D_n$이고 전체회전은 $\triangle\theta_n$이다. 로봇의 위치를 결정하기 위하여 경로의 형태에 대하여 가정이 필요하다. 시간 n과 n-1사이에 움직이는 경로가 직선이라고 하면 다음과 같은 근사식을 얻을 수 있다.

$$\triangle X_n \approx \triangle D_n \cos(\theta_{n-1}+\triangle\theta/2) \quad (2)$$

$$\triangle Y_n \approx \triangle D_n \sin(\theta_{n-1}+\triangle\theta/2) \quad (3)$$

시간 n에서 로봇의 위치는 다음과 같이 근사 시킬 수 있다.[8]

$$X_n = X_{n-1}+\triangle X_n \approx X_{n-1}+\triangle D_n \cos(\theta_{n-1}+\triangle\theta_n/2) \quad (4)$$

$$Y_n = Y_{n-1}+\triangle Y_n \approx Y_{n-1}+\triangle D_n \sin(\theta_{n-1}+\triangle\theta_n/2) \quad (5)$$

$$\theta_n = \theta_{n-1}+\triangle\theta_n \quad (6)$$

식 (4)(5)(6)은 비록 모델이 간단하여도 좋은 결과를 얻을 수 있다는 것을 입증했다.[4]

3. Cross-Coupling Control

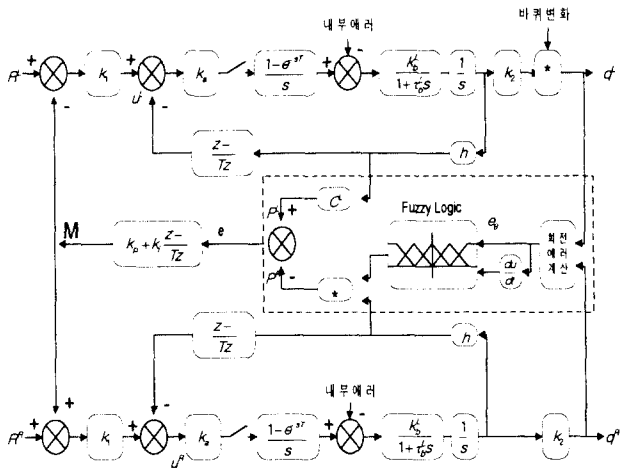

Fig2. Corss-Coupling motion controller

CC-Control은 밀링기계나 선반에서 궤적 추종을 위해 제안된 제어기이며 Borenstein과 Koren에 의해 이동 로봇에 적용되었다.[3] 기존의 제어기는 한축에서의 부하 외란은 자신의 루프에서만 정정된다. 그러나 이동로봇에서 한쪽루프의 오차는 다른 루프에 영향을 주기 때문에 Cross-Coupling에 의해 개선할 수 있다.

CC-Control의 목적은 두 구동 루프가 동일한 속도를 갖도록 제어함으로서 회전 오차를 줄이는 것이다. 예를 들어 이동로봇이 직선을 따라 이동한다면 두 바퀴의 속도는 같아야 한다. CC-Control(그림2)은 각 구동 루프에서 제어 입력에 대한 오차가 PD제어기에 의해 실시간으로 계산되고 로봇의 회전 오차에 비례하는 제어 오차(e_θ)를 사용한 PI 제어기가 있다. 만약 회전 오차가 존재하면 수정신호가 발생하여 각 구동 루프에 입력으로 들어간다. Cross-Coupling방법은 아래와 같다.

1. CC-Control은 두 구동 제어루프의 속도를 일치시키는 것에 의해 회전 오차를 줄이거나 제거하는 것이다.

Cross-Coupling Control의 중요한 장점은 기존 제어기들이 각각 루프안에서 각 오차를 줄이려고 시도하는동안 중요한 회전 오차를 제어한다.

2. 연속적인 외란이 발생할 때 정상 상태 회전 오차는 제거된다.

연속적인 내부 외란이 발생하면 오른쪽 바퀴의 주행거리와 왼쪽 바퀴의 주행거리가 달라지게 된다. 이때 발생하는 오차를 이용하여 이동로봇의 회전오차를 산출할 수 있으며 회전오차가 CC_Controller의 PI제어기를 거쳐 정정 신호가 발생하게 된다. 이 결과 두 바퀴의 속도는 일치하게 하기 때문에 정상상태에서 회전오차는 제거된다.

3. CC-control과 CC-Gain의 조합.

곡선 주행을 위해 이중의 보상 이득은 로봇의 알려진 외부 오차를 보상한다. CC-Gain C^L_1, C^R_1은 로봇이 곡선을 주행할 수 있도록한다. 로봇을 위해 복잡한 곡선을 직선과 곡선의 조합으로 만들 수 있다. CC-Gain C^L_2, C^R_2은 알려진 외부 오차를 보상하기 위하여 사용한다. 만약 왼쪽 바퀴 지름 d^L이 오른쪽보다 큰 경우 두 제어 루프에 같은 속도 명령을 내렸다면 결과는 곡선이다. 만일 $C^L_2=1$, $C^R_2=d^L/d^R$이면 오차는 보상된다. 그러나 대부분의 경우 바퀴의 지름변화와 같은

외부오차를 정확히 측정하는 것이 불가능하다.

퍼지로직 제어기는 CC-Gain을 출력 변수로 사용한다. 동작오차의 영향에는 많은 요소들이 있고 그들중 대부분은 로봇이 동작중에 변한다. CC-Gain을 고정시키면 동작중에 넓은 범위에서 만족한 수행 성능을 얻을 수 없다. 퍼지로직 제어기는 동작중 발생하는 회전오차(e_θ)를 보상하기 위하여 CC-Gain을 변경하는 것이 필요하다. CC-Gain은 $C^L = C^L_1\ C^L_2$ $C^R = C^R_1\ C^R_2$이다.

4. Fuzzy Logic Controller

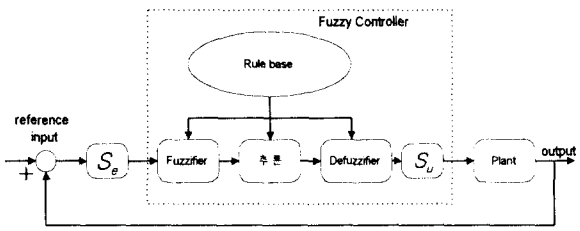

Fig3. Fuzzy Logic Control System

퍼지 로직의 수가 많아지면 제어정책의 기술능력이 우수하고 결과적으로 좋은 성능의 제어기를 구현할 수 있으나, 제어규칙의 수가 증가하여 제어기의 계산 부담이 커지므로 9개의 언어값을 사용한다. 언어값의 소속함수는 퍼지수의 표현이 간단하고 연산이 비교적 간단한 삼각 퍼지수를 사용하였으며 입출력 변수들의 대집합, 스케일 계수는 폐루프 시스템이 원하는 제어 성능을 발휘하도록 trial error방법으로 조정한다.

본 논문에서 사용한 퍼지 추론방법은 맘다니 교수가 제안한 mini-operation 방법을 사용하였다. mini-operation는 퍼지암시(A→B)의 구체적 정의가 R=A×B와 같을 때 다음과 같은 수식으로 주어진다.

$$\mu(x,u) = \mu_A \wedge \mu_B \qquad (7)$$

비퍼지화 함수는 숙련자 운전 시스템에서 운전자가 '조작량을 크게 하라'는 언어 명령을 이해하여 '크게'에 해당하는 수치의 조작량을 결정하는 것이다. 전체 규칙에 의한 추론 결과 u의 퍼지값이 B'일 때 비퍼지화값을 결정하는데 가장 많이 사용되는 방법은 무게 중심법이다. 무게 중심법의 정의는 다음과 같다.

$$u^* = \text{defuzzifier}(B') = \frac{\int_U \mu_{B'} u du}{\int_U \mu_{B'} du} \qquad (8)$$

제어대상의 응답특성을 분석하여 제어규칙을 발견하는 방법이 heuristic method이다. 오차가 줄어들고 제어목적이 달성되도록 제어규칙을 작성한다. 이때, 제어규칙의 작성은 발견적(heuristic)이고 프로세스응답특성의 정성적인 정보에 의존한다.

만일 이동로봇이 직선의 제어경로를 주행하도록 되어 있었을 때 여러 가지 외부 외란으로 인해 기준으로부터 0보다 작은 회전오차가 계산된다면 이동로봇은 오른쪽으로 기울어져 주행하는 것이다. 이럴 때 CC-Gain(c^R)을 1보다 작게 만들면 외부 외란은 보상될 것이다. 이와같은 경험적 지식으로부터 퍼지 규칙을 유도해낼 수 있다.

퍼지규칙은 입력(e_θ)과 출력(c^R)에 대해 다음과 같은 9개의 규칙을 따른다.

rule 1 : If e_θ is NB Then c^R is SB

rule 2 : If e_θ is NM Then c^R is SM

rule 3 : If e_θ is NS Then c^R is SS

rule 4 : If e_θ is Z and $\dot{e}_\theta$ is Z Then c^R is REF

rule 5 : If e_θ is PS Then c^R is LS

rule 6 : If e_θ is PM Then c^R is LM

rule 7 : If e_θ is PB Then c^R is LB

rule 8 : If e_θ is Z and $\dot{e}_\theta$ is positive Then c^R is LS

rule 9 : If e_θ is Z and $\dot{e}_\theta$ is negative Then c^R is SS

단, NB(Negative Big), NM(Negative Medium), NS(Negative Small) ,Z(Zero) ,PS(Positive Small), PM(Positive Medium), PB(Positive Big), SB(Small Big), SM(Small Medium), SS(Small Small), REF(1), LS(Large Small), LM(Large Medium), LB(Large Big)

회전오차에 대한 소속함수의 기여도는 그림5에서 나타낸것과 같고 그림5는 회전오차의 변화량 $\dot{d}_\theta$의 소속함수이다.

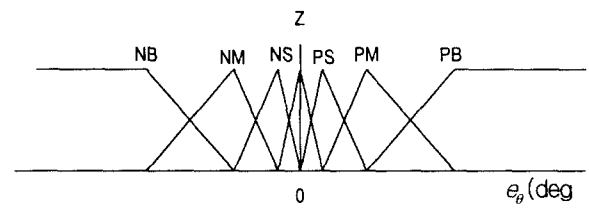

Fig4. Distribution of membership function of orientation error

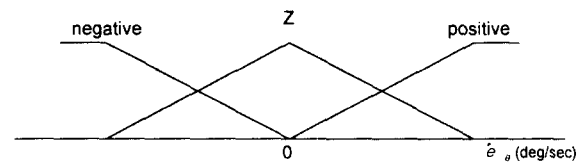

Fig5. Distribution of membership function of orientation error rate

5. 모의 실험

실험에서 cross-coupling제어 방법의 성능을 검사하기 위해 Mathlab프로그램을 사용하였다. 그리고 모든 시스템 상수들은 실험실에서 자작한 로봇을 모델로 사용하였다. 이동로봇은 80cm*50cm의 직사각모양을 갖고, 최대 1.5m/s의 속도를 갖는다. DC 모터는 변속기를 통해 구동바퀴에 연결된다. 모터 바퀴 시스템은 모터만을 모델링하여 모의 실험에서 사용하였다. 이때 모터의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{b}{s(s+a)} \qquad (9)$$

CC-controller설계시, 조절이 필요한 4개의 파라미터가 있다. 처음 둘은 CC-Gain c^L과 c^R 이다. 모의실험에서 두바퀴의 원하는 속도가 같기 때문에 $c^L = 1$, $c^R = 1$로 고정하고 폐루프이득 h는 (4*엔코더 분해능*샘플링 주기)이다.

비례 폐루프 이득은 $k_1 = 0.2$, ka=1, cross-coupling 내부

PI 제어기의 이득은 kp=5과 ki=3이다. k_2는 이동로봇의 전달 부분으로 10:1의 기어비와 로봇의 바퀴 둘레(π*12cm)가 포함되어 있다. 양루프를 위한 샘플링 주기는 0.002초이고 양바퀴를 위한 기준속도(R^L, R^R)는 1m/s이다.

모의 실험의 전체 시간은 1초이고 모의실험에서 오른쪽 바퀴의 속도(R^R)와 왼쪽 바퀴의 속도(R^L)를 각 1m/s로 입력하다. 이때 외부 부하의 영향으로 왼쪽 바퀴가 원래의 크기보다 20%가 커졌다고 가정했을때의 모의 실험 결과가 그림6,7,8에 있다. 만일 퍼지로직 제어기가 없으면 CC-Controller가 두바퀴에 같은 속도를 출력하기 때문에 회전오차(e_6)는 계속 증가할 것이다. 결과적으로 이동로봇은 직선을 곡선처럼 주행하게 될 것이다. 이때 퍼지 제어기를 도입함으로서 외부 외란을 효과적으로 제거할 수 있다. 그림6은 로봇의 오른쪽 바퀴와 왼쪽 바퀴의 속도를 원하는 속도(1m/s)를 주었을 때 CC-Gain을 보이고 있다. 외부 외란이 발생하기 전까지는 이득이 1로 고정되어 있음을 볼수 있다. 퍼지제어기에서 CC-Gain이 능동적으로 바뀜으로써 외부오차를 보상함을 보인다. 이때의 두 바퀴의 속도가 그림7에 나타나 있다. 왼쪽 바퀴가 본래의 크기보다 20%가 증가 했기 때문에 두바퀴의 주행 거리를 같게 하기 위해 왼쪽 바퀴의 속도는 기준속도 1m/s보다 작아지고 상대적으로 오른쪽 바퀴는 기준속도보다 커짐으로서 바퀴의 변화에 의한 회전오차를 없애준다. 그림8은 퍼지제어기가 동작할 때 이동 로봇에 발생하는 회전오차를 나타낸다. 처음에는 외부 외란이 없기 때문에 회전오차가 발생하지 않는다. 외란으로 인하여 회전오차(e_6)가 발생하면 퍼지로직 제어기에서 CC-Gain을 변경하여 이동로봇의 회전오차가 제거됨을 볼수 있다.

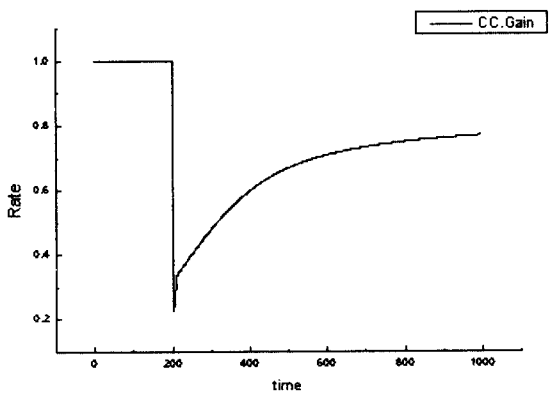

Fig 6. Convergence of the CC-Gain

6. Conclusion and Discussion

이동로봇의 가장 중요한 오차인 회전오차를 최소화하기 위해 기존의 CC-Controller의 단점을 보완하기 위하여 퍼지 로직 제어기를 도입하였다. CC-Controller는 회전오차를 구하는데 오른쪽 바퀴와 왼쪽 바퀴의 거리에 의해 구하게 된다. 그러나 외부오차를 없애주기위하여 CC-Gain을 고정시켜놓는 것은 외란이나 환경이 변할 때 만족할 만한 결과를 얻을수 없다. 만일 모의 실험에서 보인것처럼 바퀴의 크기변화와 같은 외부 외란이 발생하게 되면 이동로봇은 직선경로를 곡선처럼 주행하게 된다. 따라서 퍼지로직 제어기는 이러한 단점을 보완하여 CC-Gain을 적당히 바꾸어 회전오차를 직접제어함으로서 보다 나은 제어기를 구성할 수 있다는 것을 본 논문에서 보여 주었다.

이동로봇을 위한 CC-Control에서 퍼지로직 제어기를 구현하였고 제어기는 연속적인 외란에 대해 정상상태에서 회전오차가 zero로 수렴함을 보였다.

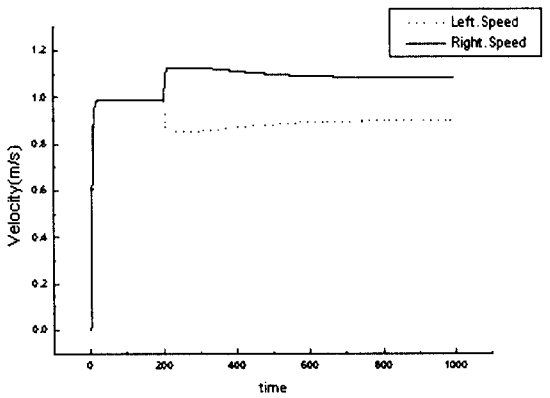

Fig 7. Robot Wheel Speed

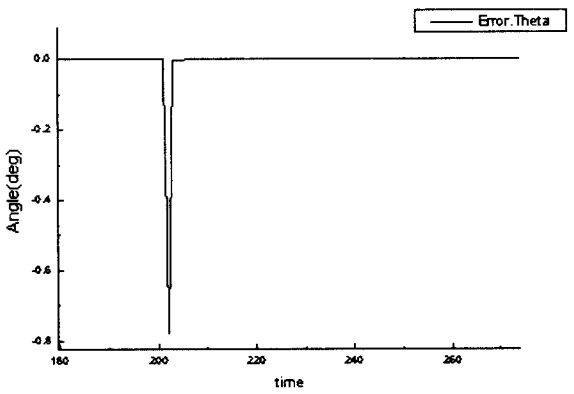

Fig 8. Robot orientation Error with Fuzzy Logic

7. 참고문헌

[1] S.K. Tso, Y.H. Fung and Y.P. Cheung, " Fuzzy-logic Control for Differentail-wheel-drive AGVs Using Linear Opto-densor Arrays" Proc. of the 1996 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2816-2821, 1996.

[2] L. Benta, " A Self Tuning Navigation Algorithm," Proc. of the 1988 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1313-1314, 1988.

[3] L. Feng, Y. Koren and J. Borenstein, "A Cross-Coupling Controller for a Differential-drive Mobile Robot", IEEE Control Systems Magazine, Dec. 1993, pp. 35-43

[4] C. Ming Wang, "LOCATION ESTIMATION AND UNCERTAINTY ANALYSIS FOR MOBILE ROBOT", Proc. of the 1988 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1230-1235, 1988.