

MR센서를 이용한 실외형 자율이동 로봇의 퍼지 조향제어기에 관한 연구

Fuzzy Steering Controller for Outdoor Autonomous Mobile Robot using MR sensor

김정희 · 손석준 · 임영철 · 김태곤 · 김의선* · 유영재**

Jeong-Heui Kim, Seok-Jun Son, Young-Cheol Lim, Tae-Gon Kim, Eui-Sun Kim* and Young-Jae Ryo**

전남대학교 전기공학과 & RRC
*서남대학교 전기전자멀티미디어 공학부
**목포대학교 제어계측공학과

요 약

본 논문은 MR(magneto-resistive)센서를 이용한 실외형 자율 이동 로봇의 퍼지 조향 제어기에 대한 연구이다. 2개의 MR 센서를 이용한 지구자기장의 제거방법을 제안하고, 각각의 센서에서 측정된 자기장 차이값(dBy, dBz)을 입력변수로 사용한 퍼지 조향 제어기를 설계하였다. 자율 이동 로봇 시뮬레이션 프로그램을 개발하기 위해 MR센서의 모델링, 이동로봇의 동적 모델링, 좌표변환 등을 하였다. 컴퓨터 시뮬레이션은 퍼지 로직을 이용한 이동로봇 제어기의 주행성능을 검증하기 위해 사용되었고 그 시뮬레이션을 통하여 제안한 퍼지 조향제어기의 강인성을 검증하였다.

Abstract

This paper describes a fuzzy steering controller for an outdoor autonomous mobile robot using MR(magneto-resistive) sensor. Using the magnetic field difference values(dBy, dBz) obtained from the MR sensor, we designed fuzzy logic controller for driving the robot on the road center and proposed a method to eliminate the Earth magnetic field. To develop an autonomous mobile robot simulation program, we have done modeling MR sensor, mobile robot and coordinate transformation. A computer simulation of the robot including mobile robot dynamics and steering was used to verify the driving performance of the mobile robot controller using the fuzzy logic. So, we confirmed the robustness of the proposed fuzzy controller by computer simulation.

Key words: Fuzzy controller, Autonomous mobile robot, MR sensor, Simulation

1. 서 론

지난 몇 년간 이동 로봇의 제어에 관한 많은 연구가 이루어졌으며 특히, 최근 이동 로봇 중 실제 자동차의 무인 자동화를 위한 연구로 인하여 자동차형 이동 로봇의 자율 주행을 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 로봇이 자율 주행을 하기 위해서는 주위 환경에 대한 인식능력을 갖추어야 하며 출발점에서 목표점까지의 안전하게 도달할 수 있어야 한다.[1] 이동 로봇의 자율 주행을 위해 조향 제어는 이동 로봇시스템에서 가장 기본이 되는 기능이라고 할 수 있으며 로봇의 이동을 위해 로봇은 현재 사

용되는 방식으로는 적외선센서, 레이저 거리 센서, 초음파 센서 등을 이용하는 방식과 비전센서를 이용한 방식이 있다[2-7]. 적외선 센서나 레이저 센서, 초음파 센서의 경우는 벽면과 같은 기준면을 따라 이동하기 때문에 실내에서는 적용하기가 용이하나, 반사체가 없거나 멀리 있는 실외에서는 이동 로봇에 적용하기가 어렵다. 또한 비전 센서의 경우 실내외에서의 사용이 가능하고, 획득된 영상의 품질과 처리를 위한 하드웨어의 성능에 따라 좋은 결과를 나타내지만 조명의 변화에 적용이 어렵고 또한 조향 제어를 위해 영상으로부터 기하학적인 변환을 통해 로봇의 위치를 계산해야 하므로 많은 양의 데이터 처리를 위한 고속 프로세서나 전용 장비를 구축해야 한다[7].

본 논문에서는 조명이나 기후의 변화에 무관하고 저가의 프로세서만으로도 로봇의 위치를 인식하여 자율 주행할 수 있는 방법을 연구하였다. 이동하고자 하는 경로에 일정간격으로 영구자석을 설치하고 로봇에 자기장을

접수일자 : 2001년 5월 11일
완료일자 : 2001년 12월 17일

검출하는 센서를 장착하여 로봇의 위치를 계산하고 로봇의 진행 방향을 제어하도록 하였다. 로봇의 조향 제어를 위해 자석에 의한 자계(dB_y, dB_z)를 입력으로 하는 퍼지 제어기를 설계했으며 설계된 제어기의 효과와 유효성을 검증하기 위하여 자율 이동로봇의 자율 주행 시뮬레이터를 제작하여 설계된 제어기의 동작을 확인하였으며 PD 제어기에 의한 자율 주행과 주행 성능을 비교하였다.

2. 데이터 획득

2.1 영구 자석에 의한 자기장

영구자석에 의한 자계는 그림 1과 같이 x, y 그리고 z 축 방향의 성분을 갖는다. 페라이트 영구자석을 자기쌍극자로 가정하면 공간상의 한 점 $P(x,y,z)$ 에서의 자계는 식 (1)과 같이 표현된다[8].

$$B = \frac{M}{4\pi r^3} (3xz a_x + 3yz a_y + (2z^2 - x^2 - y^2) a_z) [Wb/m^2] \quad (1)$$

여기서, M : 자기 쌍극자 모멘트

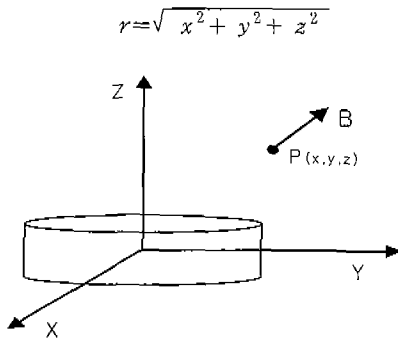


그림 1. P점에서의 자기장.

Fig. 1. Magnetic fields at point P.

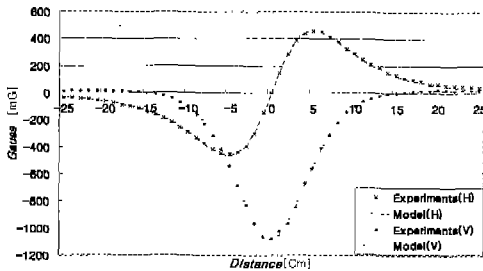


그림 2. 모델식과 검출된 데이터 비교

Fig. 2. Comparison model equation with experimental sensing data.

그림 2는 x축을 0으로 고정하고 y축을 따라 센서를 이동했을 때 측정되는 B_y 와 B_z 의 값을 모델식에 의해서 얻어진 데이터와 실험에 의해서 얻어진 데이터를 비교한 그래프를 나타낸다. 페라이트 영구 자석은 원통형으로 지름 0.025[m], 높이 0.01[m]이다. 수평성분의 자계 크기는 원점에서 0이고 중앙에서 멀어짐에 따라 증가하다가 다시 감소하고, 수직성분의 자계는 원점에서 최대 값을 나타내고 거리가 멀어짐에 따라 감소한다.

2.2 지구 자기장 보정

자기 센서에서 측정되는 자기장 값에는 자석에 의한 값뿐만 아니라 지구자기장 값이 포함되어 있는데, 지구 자기장은 각축 당 200~300[mG]의 크기를 나타내고, 이것은 제어기에 외란으로 작용하게 된다. 기존에는 자석을 여러 개 적층하여 자석에 의한 자계를 상대적으로 크게 하여 지구자기장을 무시하는 방법이 사용되었다. 그러나 이 방법은 자석의 개수가 많아져 설치비용이 증가하고, 센서도 넓은 범위를 측정할 수 있어야 하는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 두 개의 센서를 이용하여 지구 자기장을 제거하는 방법을 제안한다. 동일한 평면상에 두 개의 센서를 적당한 간격으로 평행하게 설치하면, 각각의 센서에서 측정되는 지구자기장 성분은 모든 축에 대해서 동일하다. 따라서 두 센서에서 측정된 값들의 차이를 각 축에 대해서 구하면 지구자기장이 제거된 새로운 변수 dB_x, dB_y, dB_z 를 얻을 수 있다.

그림 3은 자석을 2개씩 적층하여 20cm간격으로 배치하고 x, y 위치를 변화시키면서 얻은 dB_x, dB_y, dB_z 를 나타낸 것이다. 여기서 x는 경로의 진행 방향, y는 경로의 측방향의 좌표를 나타낸다. 그래프들의 형태는 축에 따라 동일하나, x좌표의 변화에 따라 크기의 차이를 볼 수 있다. 자석부근에서는 값이 크고 자석과 자석의 사이에서는 작은 값을 나타낸다. 하나의 센서에 의한 그림 2의 경우와 비교하면 B_y 와 dB_y 가, 그리고 B_z 와 dB_z 가 비슷한 형태를 보인다.

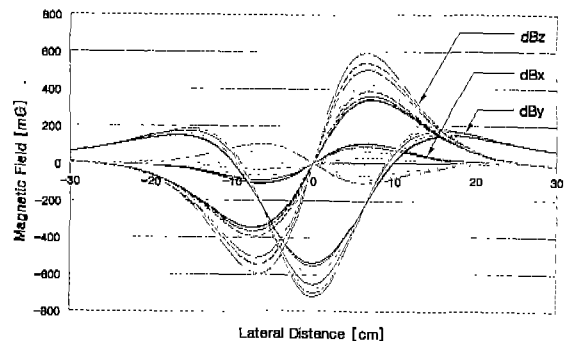


그림 3. 측방향 거리에 따른 자기장의 차이값

Fig. 3. The difference value of magnetic field according to lateral distance

2.3 변수의 선택 및 정규화

그림 3에서 보는 것처럼 dB_x 는 인접한 자석간의 자기장 상쇄로 크기도 작을 뿐 아니라 하나의 형태로 간주하기 쉽지 않기 때문에 제어변수에서 제외하고 dB_y 와 dB_z 를 제어변수로 선택한다.

또한 경로 중앙으로부터 측방향으로 동일한 거리만큼 떨어져 있다고 할지라도 x좌표에 따라서 자기장 값의 차이는 최대 수백 [mG]에 이른다. x좌표에 따라서 dB_y 와 dB_z 의 값을 함께 커지거나 작아지므로 식(2)를 이용하여 정규화 시킨다. 정규화 시킨 dB_y', dB_z' 의 그래프는 그림 4와 같다.

$$dB_y' = dB_y / \sqrt{dB_y^2 + dB_z^2} \quad (2)$$

$$dB_z' = dB_z / \sqrt{dB_y^2 + dB_z^2}$$

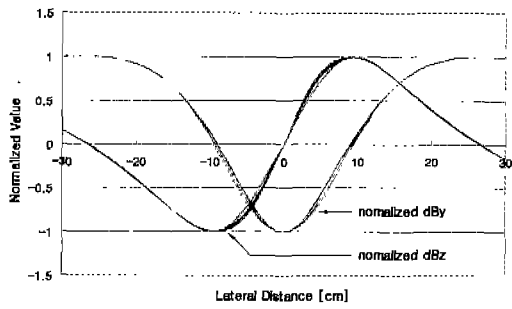


그림 4. 정규화된 dBy와 dBz
Fig. 4. Normalized dBy and dBz

3. 퍼지 제어기 설계

3.1 제어기의 구조

제어기의 입력은 두 센서 값의 차에 의해 얻어진 자기장값(dB_y , dB_z)이고 그에 따른 출력은 조향각(δ)이다. 퍼지화 도입부에서 제어기의 입력인 dB_y 의 언어변수를 NB, NM, NS, NZ, PZ, PS, PM, PB로 정의했고 dB_z 의 언어변수는 NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB로 정의했다. 그림 5는 각 변수에 따른 퍼지 소속도를 나타낸다.

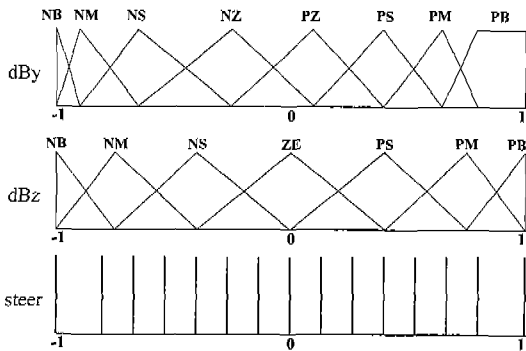


그림 5. 퍼지 변수의 형태.
Fig. 5. Shape of Fuzzy variables.

지식베이스에서는 퍼지데이터의 조작과 언어적 제어 규칙을 생성했다. 제어 규칙은 If~then 규칙을 사용하였고, 제어규칙은 Table.1로 나타내었다. 퍼지추론은 그 방식에 있어서 본 논문은 Mamdani의 Max-Min방식을 이용하여 추론을 하였다. 비퍼지화는 singleton법을 이용하였다.

4. 시뮬레이터의 개발

4.1 시뮬레이터의 구성

제안된 퍼지 제어기의 강인성을 검증하고 실제 제작할 로봇의 자율주행 실험의 시행착오와 조정시간을 단축하기 위해 시뮬레이터를 제작하였다. 제작된 시뮬레이터의 구성은 그림 6과 같고, 주행을 위한 경로생성부와 자기장 측정을 위한 센서부, 그리고, 로봇의 이동을 위한 로봇의 동적 모델 및 좌표변환과 조향각 제어를 위한 퍼

지 제어부로 구성되어 있다. 시뮬레이션에서 사용된 로봇의 폭은 0.62[m], 길이 1[m], 이동경로의 폭은 1.2[m]로 하였다. 센서는 지상으로부터 0.15[m] 위치에 로봇의 중앙을 중심으로 좌우 0.04[m]의 위치에 각각 장착하였다. 시뮬레이션 프로그램은 win98 환경에서 비주얼 베이직으로 작성하였다.

표 1. 퍼지 룰 베이스.
Table 1. Fuzzy rule base.

	dBy	dBz	Steer
R1	NB	ZE	ZE
R2	NM	PS	ZN
R3	NS	PM	NS
R4	NZ	PB	NM
R5	PZ	PB	NH
R6	PS	PB	NB
R7	PM	PM	NL
R8	PB	PS	NL
R9	NB	NS	ZP
R10	NM	NM	PS
R11	NS	NB	PM
R12	NZ	NB	PH
R13	PZ	NB	PB
R14	PS	NM	PL
R15	PM	NS	PL

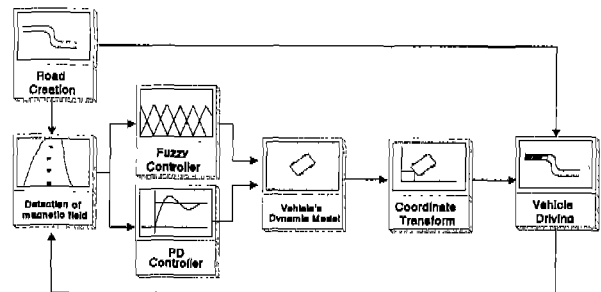


그림 6. 시뮬레이션의 블록도.
Fig. 6. Block diagram of Simulation.

로봇의 이동로가 결정되면 이동로의 중앙에 자석을 일정 간격으로 설치하고 로봇의 초기위치와 방향을 설정하고 주행을 시작하게 된다. 이때 자석열에서 얻어진 자기장 값은 모델식에 의해 얻어지게 되고 이 때 얻어진 dB_y , dB_z 값이 퍼지제어기의 입력으로 들어가게 되면 퍼지 조향제어기는 조향각을 출력한다. 조향각과 로봇의 좌표변환과 동적 모델에 의하여 로봇의 다음 위치가 결정되면 시뮬레이터는 다음 위치로 로봇을 이동시킨다. 이런 과정을 반복하여 로봇은 이동경로를 따라 이동하게 된다.

4.2 4륜 이동로봇의 모델

4륜 로봇의 동력학적 특성을 모델링하기 위해서는 일반적으로 2륜 로봇과 동일하게 취급하는데 로봇의 모델

에 대한 절대 좌표계는 그림 7과 같다.

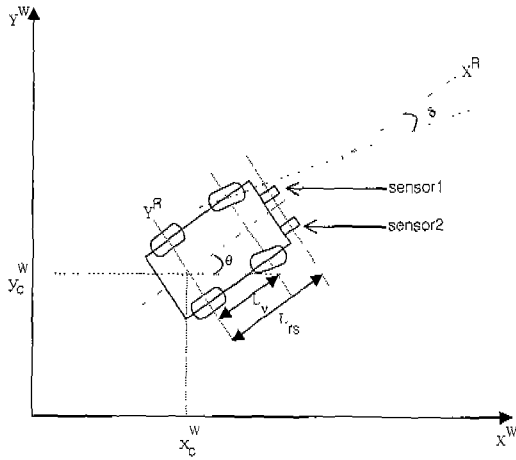


그림 7. 로봇의 동적모델.
Fig. 7. Dynamic model of the Robot.

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \frac{1}{L_v} v \sin \delta \\ \dot{x}_c^W &= v \cos \theta \cos \delta \\ \dot{y}_c^W &= v \sin \theta \cos \delta \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 (x_c, y_c) 는 로봇의 뒷바퀴 중심을 기준으로 하는 점이며, L_v 는 앞바퀴와 뒷바퀴간의 거리, θ 는 방향각(heading angle), 그리고 δ 는 조향각(steering angle)을 나타낸다.

4.3 실세계 좌표에서 로봇 좌표로 변환

로봇의 뒷바퀴 중심점을 로봇의 기준 위치점 (x_c^W, y_c^W) 으로 가정한다. 실세계 좌표에서 로봇의 진행방향각 θ 와 조향각 δ 를 그림 7과 같이 정의한다. 실세계 좌표의 (x_c^W, y_c^W) 는 로봇 좌표로 변환하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} X^R \\ Y^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^W - x_c^W \\ Y^W - y_c^W \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 (X^R, Y^R) 는 로봇 좌표에 있는 점이며, (X^W, Y^W) 는 실세계 좌표에 있는 점이다.

4.4 로봇좌표에서 센서좌표로 변환

로봇에 부착되는 자기센서는 실험에 의해서 가장 적합한 곳을 택하였으며 그 위치는 로봇의 앞 범퍼 밑에 설치하였다. 따라서 로봇의 중심에서 센서의 중심으로 좌표변환을 해야하며 식(5)로 나타내어진다.

$$\begin{bmatrix} X^S \\ Y^S \\ Z^S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X^R \\ Y^R \\ Z^R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{rs} \cos \theta \\ L_{rs} \sin \theta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 (X^S, Y^S, Z^S) 는 센서간의 중심 좌표를 나타내고, (X^R, Y^R, Z^R) 는 로봇의 좌표를 나타낸다. L_{rs} 는 로봇의 기준점과 자기저항 센서의 기준점 사이의 전후방향 차이를 나타낸다.

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

시뮬레이션에서 자석은 0.2[m]의 동일한 간격으로 경로의 중앙에 설치하였고, 로봇의 속도는 1[m/s]이며, 샘플링 시간은 33.3[ms]이다.

그림 8은 경로 중앙으로부터 좌측으로 0.2[m] 이탈한 상태에서 출발하여 경로의 중앙으로 추종하여 중심을 따라 이동하는 궤적을 보여준다. 그림 9는 6[m]와 9[m]의 반경으로 오른쪽과 왼쪽으로 굽은 경로에서의 주행 궤적을 나타냈다. 이상의 두 경우 모두 경로의 중앙으로 잘 주행하는 것을 볼 수 있다.



그림 8. 직선경로 주행시 궤적.
Fig. 8. Trajectory during straight road driving.

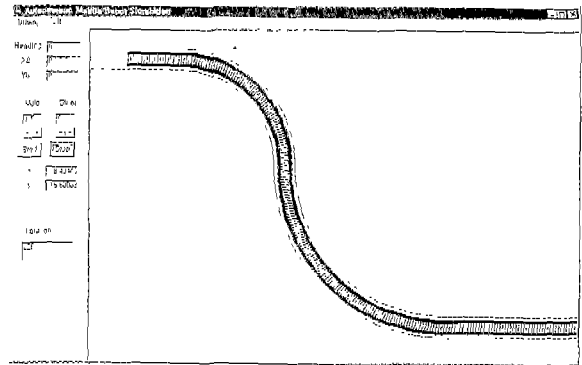


그림 9. 곡선경로 주행 시 궤적
Fig. 9. Trajectory during straight and curved section driving.

그림 10은 퍼지 제어기와 PD 제어기를 이용하여 그림 9의 이동경로를 따라 주행했을 때 발생하는 측면 이탈거리를 나타낸 것이다. 여기서 PD제어기는 그림 4에서 보는 것처럼 dB_y는 -1로, dB_z는 0으로 추종하여야 하므로 다음의 식으로 구현하였고, e_R 와 e_B 는 각각 dB_y와 dB_z의 목표치와의 오차이다.

$$steer = K_{P_y} e_R + K_{P_z} e_B + K_{D_y} \frac{de_R}{dt} + K_{D_z} \frac{de_B}{dt} \quad (6)$$

PD제어기의 입력은 B_y에 의한 오차 성분과 B_z에 의한 오차 성분으로 되어 있다. 이와 같이 다중입력의 경우 최적의 제어기 파라미터를 자동으로 동정하기는 매우 어렵다. 따라서 초기 파라미터는 B_y에 의한 오차 성분과 B_z에 의한 오차 성분을 분리하여 단일입력 단일출력 시스템을 구성하여 각각의 파라미터를 동정하였다. 즉 B_y에 의한 단일입력과 조향각 출력으로 구성된 PD제어기의 파라미터를 Zeiglo-Nichols 법에 의하여 초기값을 구할 수 있다. 또한 B_z에 의한 단일입력과 조향각 출력의 PD제어기의 초기 파라미터도 구하여진다. 이렇게 구한 파라미터는 일반적인 제어성을 가지며, 최적의 제어성을 갖지 못한다. 따라서 파라미터를 변경해가는 반복

실험을 통하여 최적의 파라미터를 동정하였다. 이와 같이 동정된 PD제어기를 이용하여 주행 실험에 적용하였다.

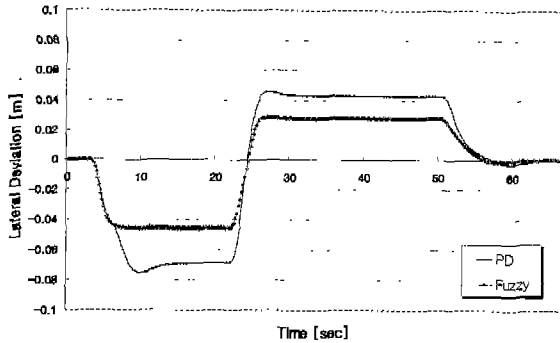


그림 10. 곡선부분 주행 시 측면 이탈 거리
Fig. 10. Lateral distance while driving on the curved section.

그림에서 보는 것처럼 기존의 PD제어기에 비하여 퍼지 제어기의 주행성능이 우수한 것을 알 수 있다. 곡선 경로에서의 이탈거리가 PD제어기에 비하여 작고 마지막의 직선경로에 접근할 때도 오버슈트나 진동이 없이 빨리 중앙에 도달하는 것을 알 수 있다. 표2는 곡선도로에서의 평균 오차를 서로 비교한 것인데 퍼지제어기로 주행한 결과가 PD제어기에 비하여 오차가 63[%] 정도로 감소한 것을 알 수 있다. 이 결과로 인해 제안한 퍼지제어기가 기존의 PD제어기에 비해 더욱 강한 제어특성을 나타냄을 알 수 있다.

표 2. PD제어기와 퍼지제어기의 비교.

Table 2. Comparison Fuzzy controller with PD controller.

Controller	6m반경	9m반경	Unit
Fuzzy	4.5	2.8	cm
PD	6.8	4.3	cm

6. 결 론

MR센서를 이용한 실외형 자율 이동 로봇의 퍼지 조향제어기의 개발에 대한 연구를 수행하였다. 먼저 수학적 모델식을 시뮬레이션 프로그램에서 사용될 수 있도록 실제 센서에서 획득한 데이터와 비교하여 서로 일치함을 검증하였다.

동일한 평면상에 두 개의 센서를 평행하게 설치하고, 각 센서에서 측정된 값들의 차이인 새로운 변수 dBy , dBz 를 제어변수로 이용함으로써 지구자기장을 제거하였다. 또한 자석과 가까운 큰 자기장 영역이나 자석과 자석 사이에서의 자기장이 작은 영역에서도 동일한 물을 적용할 수 있도록 제어변수 dBy , dBz 를 정규화 하였다.

획득되는 자기장과 조향 명령 사이의 관계가 비선형적이므로 비선형제어에 우수한 성능을 갖는 퍼지 조향제어기를 설계하였다. 모델식과 퍼지 조향제어기를 로봇의 동적 모델링, 좌표변환을 이용하여 자율 이동 로봇 시뮬

레이션 프로그램을 제작하였다. 시뮬레이션의 직선 및 곡선 경로의 주행을 통한 다양한 이동경로 조건에 대해 제안한 퍼지 조향제어기의 효용성을 검증하였다. 향후 과제으로써 제안한 퍼지제어 알고리즘을 실제 실외형 이동 로봇에 적용할 수 있음을 검증해야 한다.

참 고 문 헌

- [1] T. Lund, H. Hartmut, J. Huser, L. Peters, "A Mixed Analogue/Digital Fuzzy System for Indoor Mobile Robot Navigation", *Intelligent Information System ANZIS-95 Proc. on*, pp. 204-209, 1995
- [2] M. Toda, O. Kiani, T. Okamoto, T. Torii, "Navigation Method for a Mobile Robot via Sonar-based Crop Row Mapping and Fuzzy Logic Control", *J. Agric. Engng Res.* pp 299-309, 1999
- [3] David J. Kriegman, Ernst Triendl, Thomas o. Binford, "Stereo Vision and Navigation in Buildings for Mobile Robots", *IEEE Tran. on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 6, pp 792-803, 1989
- [4] Ishay Kamon, Student Member, IEEE, Ehud Rivlin, Member, IEEE, "Sensory-Based Motion Planning with Global Proofs", *IEEE Tran. on Robotics and Automation*, vol. 13, no. 6, pp. 814-822, 1997
- [5] A. G. karmeta, H. M. Barbera, M. S. Alonso, "A Fuzzy logic Based Language to Model Autonomous Mobile Robots", *IEEE Int. Fuzzy Systems Con. Proc.* pp. 550-555, 1999
- [6] Ching-Chih Tsai, Member, IEEE, "A Localization System of a Mobile Robot by Fusing Dead-Reckoning and Ultrasonic Measurements", *IEEE Transaction and Measurement*, vol. 47, no. 5 pp. 1399-1404, 1998
- [7] Young-jae Ryoo, et al, "Neuro_Fuzzy Control System for Vision-Based Autonomous Vehicle", *IEEE Fuzzy Systems Con. Proc.* pp. 1643-1648 1999
- [8] Seok-Jun Son, et al, "The Lateral Guidance System of an Autonomous Vehicle Using a Neural Network Model of Magneto-Resistive Sensor and Magnetic Fields", *ICEE2K*, pp. 477-480, 2000.

저 자 소 개

김정희(Jeong-Heui Kim)

1998년 : 조선대학교 제어계측공학과 (공학사)

2000년 : 전남대학교 전기공학과 대학원 입학

현재 : 전남대학교 전기공학과 석사과정

관심분야 : 퍼지제어, 이동로봇, 자율주행시스템

손석준(Seok-Jun Son)

1999년: 서남대학교 전기공학과 (공학사)
2001년: 전남대학교 전기공학과 (공학석사)
현재: 전남대학교 전기공학과 박사과정 삼성전자 연구원

관심분야: 신경회로망 및 퍼지이론, 지능제어시스템, 이동로
봇, 자율주행시스템

임영철(Young-Cheol Lim)

1975년: 전남대학교 전기공학과 (공학사)
1977년: 고려대학교 전기공학과 (공학석사)
1990년: 고려대학교 전기공학과 (공학박사)
현재: 전남대학교 전기공학과 교수 전남대학교 고품질전기전
자부품 및 시스템 연구센터 소장

관심분야: 퍼지, 신경망, 지능제어계측, 전력전자

김태곤(Tae-Gon Kim)

1985년: 전남대학교 전기공학과 (공학사)
1991년: 전남대학교 전기공학과 (공학석사)
현재: 전남대학교 전기공학과 박사과정

관심분야: 지능제어시스템, 이동로봇, 자율주행시스템

김의선(Eui-Sun Kim)

1981년: 전남대학교 전기공학과 (공학사)
1987년: 전남대학교 전기공학과 (공학석사)
1999년: 전남대학교 전기공학과 (공학박사)
현재: 서남대학교 전기전자멀티미디어 공학부 조교수

관심분야: 신경회로망, 퍼지제어, 이동로봇, 자율주행시스템

유영재(Young-Jae Ryoo)

1991년: 전남대학교 전기공학과 (공학사)
1993년: 전남대학교 전기공학과 (공학석사)
1998년: 전남대학교 전기공학과 (공학박사)
현재: 목포대학교 제어계측공학과 전임강사

관심분야: 신경회로망 및 퍼지이론, 지능제어시스템, 이동로
봇, 자율주행시스템, 전기자동차 구동시스템