

논문 2001-10-2-07

## 자기장을 이용한 자율주행 전기자동차의 조향제어

김태곤\*, 손석준\*, 유영재\*\*, 김의선\*\*\*, 임영철\*

### Steering Control for Autonomous Electric Vehicle using Magnetic Fields

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

#### 요 약

본 논문은 자기장을 이용한 자율주행 전기자동차의 조향 제어에 대한 연구이다. 도로의 중앙에 일정 간격으로 영구자석을 설치하고 차량에 자기 센서를 장착하여 차량의 이동에 따른 자기장의 변화를 측정하여 조향 제어가 되도록 하였다. 단일 자석에 의한 자계 분포로부터 일정한 간격으로 나열된 영구자석에 의한 자계를 분석하였고, 이를 이용하여 자석에 의한 직선 및 곡선 도로를 만들어 주행 시뮬레이션을 하였다. 차량의 조향 제어를 위해 신경회로망을 이용하여 제어기를 구성하고, 자석을 설치하여 만든 실험도로에서 실제 제작한 전기자동차를 이용하여 주행 실험을 하였다. 실제 주행 실험에서 차체와 외부 지자기에 의한 영향을 보상하여 제안된 방법에 의한 자율 주행 차량의 자율 주행이 가능함을 확인하였다.

#### ABSTRACT

This paper describes a method to steer an autonomous electric vehicle using magnetic fields. Magnets are embedded along the center of the road and a magneto-resistive sensor is mounted beneath the front bumper of the vehicle. As the vehicle moves along the road neural network controller controls the vehicle using measured magnetic field variation. Based on a single magnets modeling equation, we analyzed three dimensional magnetic field distributions of embeded magnets in series on the center of the road and performed a computer simulation using this results. In simulation study, straight and curved road was configured. The steering controller for the vehicle was designed using neural network and experiment was performed on the real embeded magnets using real autonomous electric vehicle. At the experiment we compensated the earth's magnetic fields and showed a good result driving an autonomous vehicle using proposed method.

#### 1. 서 론

- 
- \* 전남대학교 전기공학과 & RRC (Dept. of Electrical Eng., & RRC, Chonnam Nat'l Univ.)  
 \*\* 목포대학교 제어계측공학과 (Dept. of Electrical Eng., Mokpo Nat'l Univ.)  
 \*\*\* 서남대학교 전기전자 멀티미디어공학부 (Dept. of Electrical Eng., Seonam Univ.)  
 <접수일자 : 2001년 1월 8일>

운전자의 조작 없이 스스로 주행하는 자율주행 차량은 도로의 차선을 추종하기 위한 조향 제어, 장애물의 충돌에 대한 경고 또는 회피, 원활한 교통의 흐름과 충돌 방지를 위한 속도제어 등을 필요로 한다<sup>1)</sup>. 특히 차선을 추종하기 위한 조향 제어는 자율주행 차량의 가장 기본적인 기능으

로, 자율주행 차량의 조향 제어에 사용되는 방법에는 인간이 도로를 감지하는 것과 같이 시각센서를 이용하여 도로의 영상을 획득하고 영상으로부터 도로의 방향과 차량의 위치를 계산하는 직접적인 방법<sup>[2-3]</sup>과 도로에 시설물을 설치하고 차량이 주행하면서 시설물로부터 도로의 형태에 관한 정보를 얻는 간접적인 방법<sup>[4-9]</sup>이 있다. 전자의 경우 획득된 영상의 품질과 처리를 위한 하드웨어의 성능에 따라 좋은 결과를 나타내지만 조명의 변화나 기후의 변화에 적응하기 어렵고 또한, 조향 제어를 위해 영상으로부터 기하학적인 변환을 통해 차량의 위치를 계산해야 한다. 많은 양의 영상데이터 처리는 고속 프로세서나 전용장비를 필요로 한다. 그러나, 최근 지능형 교통체계의 구축은 차량에는 최소한의 장치를 하고 도로에 주행을 위한 정보를 제공하는 시설을 하도록 추진되고 있다.

본 논문에서는 도로 중앙에 일정 간격으로 영구자석을 설치하고 차량에 자기장을 검출하는 센서를 장착하여 도로 상의 차량의 위치와 방향에 따라 자기 센서에서 검출되는 자계( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ )로 차량의 진행 방향을 제어하는 방법을 연구하였다. 제안된 방법으로 자율 주행 차량의 자율주행이 가능함을 확인하기 위해 주행 시뮬레이션 프로그램을 제작하였고, 지자기에 의한 영향을 보상하고 실제 제작된 차량에 적용하여 동작을 확인하였다. 제안된 방법은 저가의 프로세서로 주행에 필요한 정보를 추출할 수 있으며 기후나 조명의 변화에 무관하게 도로의 정보를 얻을 수 있게된다.

## 2. 자기장

### 2.1 영구 자석에 의한 자계

영구자석에 의한 자계는 시분변 자계로 공간상의 분포가 일정하고 x, y 그리고 z축 방향의 성분을 갖는다. 페라이트 영구자석을 자기 쌍극자로 가정하면 공간상의 한 점 P(x,y,z)에서의 자계는 식(1)과 같이 표현되며<sup>[4]</sup>, 그림 1은 x=0으로 고정한 후 y축을 따라 진행할 때 식(1)과 실험에 의한 y와 z축 방향의 자계분포를 비교한 것이다.

$$B = \frac{M}{4\pi r^5} (3xz a_x + 3yz a_y + (2z^2 - x^2 - y^2) a_z) [wb/m^2] \quad (1)$$

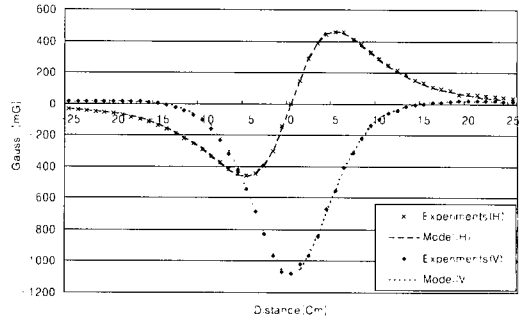


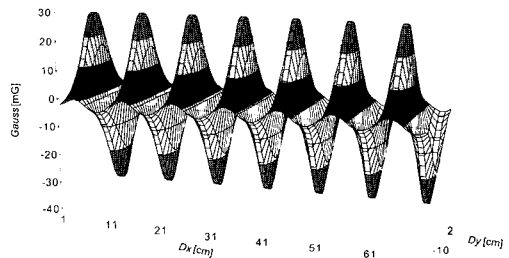
그림 1. 모델식과 실험데이터 비교  
Fig. 1. Comparison model equation with experimental sensing data.

여기서,  $M$  : 자기 쌍극자 모멘트,  
 $r = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}$  이다.

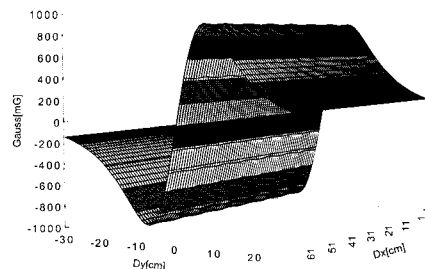
x축 방향의 자계는 원점에서 크기가 0이고 x축 변위가 증가함에 따라 증가하다가 다시 크기가 감소한다. z축 방향의 자계는 원점에서 최대값을 나타내고 거리가 멀어짐에 따라 감소한다. y축 방향의 자계의 세기는 x와 같고 위상은 90도 차이를 나타낸다.

### 2.2 자석 열에 의한 자계

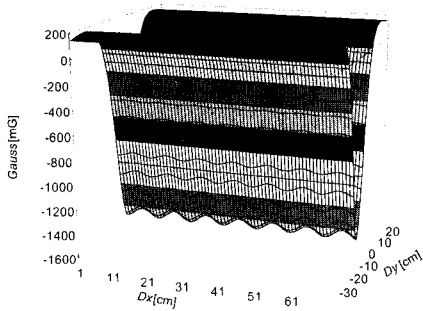
여러 개의 자석으로 만들어진 자기장 도로의 자계 분포는 그림2 와 같다.



(a)  $B_x$



(b)  $B_y$



(c) Bz

그림 2. 자석도로의 자기장 분포.  
Fig. 2. Magnetic fields distribution of magnets road.

차량이 자석열에 의해 형성된 자기장을 벗어나지 않고 자석열을 따라 주행하려면 측정된 3축 방향의 자기장 세기( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ )에 따라서 조향각 제어기는 출력을 내보내야 한다.

### 3. 조향각 제어기의 설계

#### 3.1 제어기의 구조

본 논문에서는 신경회로망의 역 전파 알고리즘을 이용하여 조향각 제어기를 설계하였다. 설계된 제어기의 구조는 그림 3과 같다. 제어기의 입력은 3축방향의 자기장 값이고 그에 따른 출력은 조향각이다. 은닉층의 노드 수는 10개로 하였다.

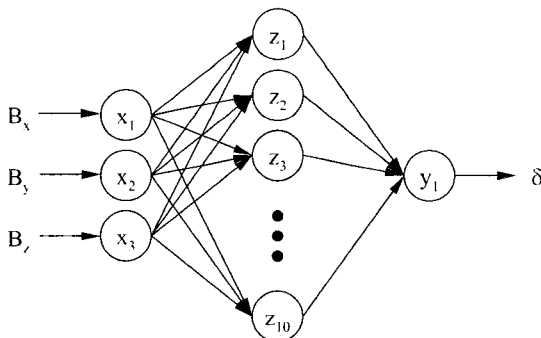


그림 3. 신경회로망 제어기의 구조.  
Fig. 3. Structure of neural network controller.

#### 3.2 학습패턴의 획득 및 학습

신경회로망의 학습을 위한 학습 패턴은 시뮬레이션을 통하여 얻었다. 시뮬레이션에서 도로를

생성하고 차량을 주행하면서 차량이 도로의 측 방향으로 떨어진 거리를 계산하고 도로 방향과 차량방향의 차이를 계산하였다. 그래서 두 가지 변수, 측 방향 오차와 진행 방향 오차를 이용하여 제어하였다.

이와 같이 주행을 하면서 3축 방향의 자기장 값과 그 때의 조향각을 얻어서 학습패턴으로 이용하였는데, 그림 4는 이 과정의 블록다이어그램이다.

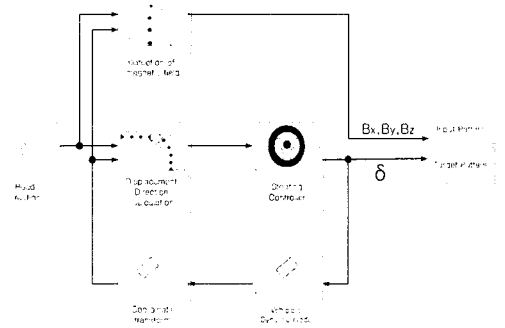


그림 4. 학습 패턴 획득 구조.  
Fig. 4. Construction at acquiring learn pattern.

신경망을 위한 학습패턴은 703개이고, 학습률은 0.025, 40,000회 반복 학습하였다.

### 4. 시뮬레이터

자율주행 시뮬레이터의 블록 다이어그램을 그림 5에 나타냈다. 먼저, 차량의 각종 요소들을 모델링하고, 동적 모델을 구한 다음, 도로와 차량의 관계를 해석하여 좌표변환 모델을 얻는다. 이를 바탕으로 윈도우즈98 환경에서 비주얼 베이직을 이용하여 시뮬레이터를 제작하였다.

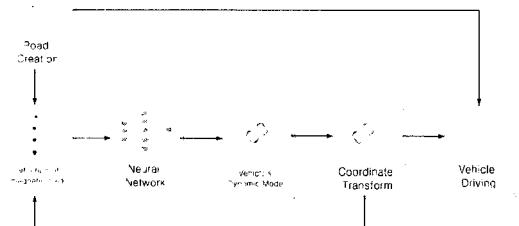


그림 5. 자율주행 시뮬레이션 구조.  
Fig. 5. Construction at autonomous driving simulation.

직선 부분과 곡선 부분이 있는 도로를 생성하고, 도로의 중앙에 자석을 일정간격으로 배치한다. 도로의 폭은 1.20[m]로 하고 자석은 0.10 [m]의 간격으로 설치하였다. 차량의 초기 위치와 방향을 설정하고 주행을 시작하여, 자석열에 의한 3축 방향의 자기장 값은 모델식을 이용하여 얻는다. 얻어진 자기장 값  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ 를 신경회로망 제어기에 입력하면, 제어기는 적절한 조향각을 출력한다. 조향각과 차량의 동적 모델에 의하여 차량의 다음 위치가 결정되고, 화면상의 그 위치에 차량을 그린다. 이상의 과정을 반복하여 차량은 자율 주행하게 된다.

### 5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

차량의 속도는 1[m/s]이고, 샘플링 시간은 50[ms]로 하였다. 차량폭은 0.62[m], 길이는 1[m]로 하였으면 센서는 차량의 맨 앞에 지상으로부터 0.15[m]위치에 장착하였다. 그림 6은 신경회로망 학습 후 왼쪽과 오른쪽으로 휘어진 곡선도로가 포함되어 있는 경우의 시뮬레이션 주행 화면인데, 정해진 경로를 따라 주행하는 것을 볼 수 있다.

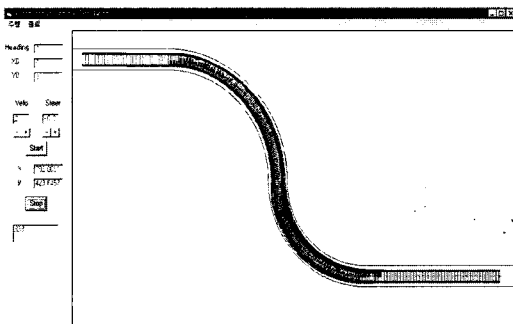


그림 6. 곡선도로 주행 궤적.  
Fig. 6. Trajectory during curved road driving.

그림 7은 동일한 도로를 주행 시 PD 제어기에 의해서 주행할 때와 신경회로망 제어기를 통해서 주행할 때의 측면 거리변화의 차이를 나타낸 것이다. 직선구간에서의 PD제어기와 신경회로망 제어기의 경우 측면이탈오차는 거의 같고, 곡선부분에서 PD제어기의 오차는 최대 0.05[m]이고 신경회로망 제어기의 경우는 최대 0.018[m]를 나타내었다. 따라서, 신경회로망제어기가 PD 제어기를 통해서 주행할 때보다 안정되게 주행할

을 알 수 있다.

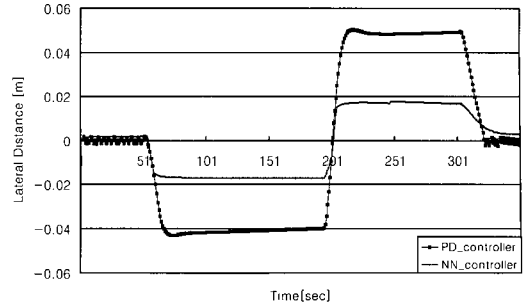


그림 7. 곡선도로 주행 시 측면오차.  
Fig. 7. Lateral error during curved road driving.

### 6. 주위 영향에 대한 지구자기장 보정

사용한 자기저항센서의 Full-scale이 ± 2[G]임에 반하여 지구자기장은 각 ( $B_x, B_y, B_z$ ) 당 300~400[mG]의 값을 가지고 있다. 이는 제어하는데 문제점을 가지고 있다. 따라서 자석의 영향을 받지 않는 차량 위에 자기저항센서를 설치하였다. 이는 순수한 지구자기장값만을 측정하기 위한 것이다. 그리고 차량 범퍼(bumper)에 설치한 자기저항센서 1에서는 지구자기장 및 자석에 의한 자기장 값을 얻게 된다. 제어에 사용되는 자기장은 자석에 의한 자기장이다. 그리고 자기저항센서 1과 자기저항센서 2는 같은 방향으로 설치되었다.

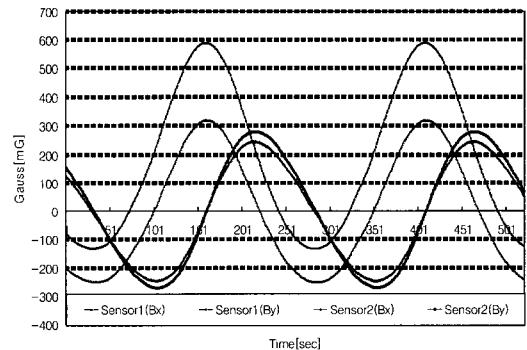


그림 8. 획득된 지구자기장.  
Fig. 8. Acquired earth's magnetic field.

자기저항센서 1과 자기저항센서 2는 방향변화에 따라서 값은 비율로 변하는데 그 크기는 offset과 scale factor가 다르기 때문에 다른

양상을 보인다. 따라서 자기저항센서 2에서 얻은 값을 가지고 지구자장의 각도를 얻는다. 그리고 그 각도를 가지고 자기저항센서 1에서 얻어지는 지구자기장을 제거시킬 수 있다. 그림 8은 차량을 2바퀴 회전했을 때의  $B_x$ 와  $B_y$ 의 값을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 자기저항센서 1과 자기저항센서 2의  $B_x$ ,  $B_y$ 는 크기만 다를 뿐 위상에 따라 같은 변화를 나타냄을 알 수 있다. 따라서 scale factor와 offset을 식(2), (3)에 의해서 보정 할 수 있다.

$$X_{sf} = \max \{1, (Y_{\max} - Y_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})\} \quad (2)$$

$$Y_{sf} = \max \{1, (X_{\max} - X_{\min}) / (Y_{\max} - Y_{\min})\}$$

$$X_{off} = [(X_{\max} - X_{\min}) / 2 - X_{\max}] * X_{sf} \quad (3)$$

$$Y_{off} = [(Y_{\max} - Y_{\min}) / 2 - Y_{\max}] * Y_{sf}$$

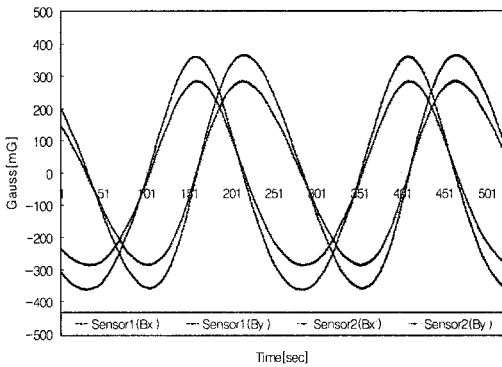


그림 9. 보상된 지구자기장.

Fig. 9. Compensated earth's magnetic field.

$$X_{value} = X_{sf} * X_{reading} + X_{off} \quad (4)$$

$$Y_{value} = Y_{sf} * Y_{reading} + Y_{off}$$

식(4)는 식(2), (3)을 이용하여 철이나 기타 주위환경의 자화상태의 영향을 받지 않도록 출력값을 보정하기 위한 것이다. 그림 9는 같은 센서에서  $B_x$ 와  $B_y$ 가 같은 크기에  $90^\circ$ 의 위상차이만 생기고 자기저항센서 1과 자기저항센서 2는 같은 위상에 크기만 다르다. 따라서 지구자기장을 제거하기 위해서는 자기저항센서 2에서 얻은 각도와 자기저항센서 1의 크기를 이용해서 제거할 수 있다. 그러면 자기저항센서1에서는 차량의 방향의 변화에 따른 자기장은 제거되고 순수한 자석에 의한 자기장 값만 획득할 수 있다.

## 7. 실험

설계된 전기자동차는 CEVA(Chonnam national university Electrical Vehicle for Autonomous driving)로 명명하였고 그림 10에 나타내었다.

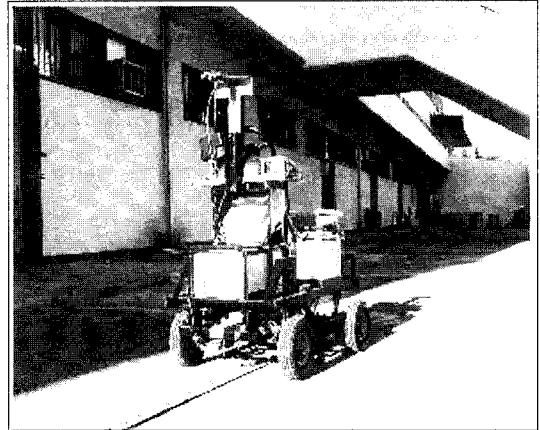


그림 10. 실험 도로 위의 차량 사진.

Fig. 10. Photograph of the vehicle on test road center.

### 7.1 차량의 기계적인 구조

테스트 차량의 크기는 일반 승용차의 1/3이며, 조향 시스템은 일반 승용차의 구조와 같다. 다만 구동력은 유압 장치 대신 전기 에너지를 사용하는 DC 모터를 이용하였다. 최대 조향 각도는 좌  $20[\text{deg}]$ 에서 우  $20[\text{deg}]$ 이다. 차량은 후륜구동형이며 구동력은기어비 18: 1의 감속기어가 내장된 3상 유도 전동기에 의하여 발생된다.

### 7.2 조향 제어 시스템 구조

전기 자동차의 제어 컴퓨터는 전체 시스템을 총괄 관리하는 기능을 가지며 주로 주행 중에 측정된 자기장값을 입력으로 하는 신경회로망 제어기에 의해 조향각을 제어한다. 사용된 컴퓨터는 Pentium 200MHz 이다. 제어 시스템은 자기장 센싱부, 조향 제어부로 이루어졌다. 자기장 센싱부는 도로에 설치된 자석에서 형성되는 자기장값을 측정하여 조향제어부에 값을 보낸다. 자기장 측정에 사용된 센서는 미국 Honeywell 사의 HMR2300으로  $\pm 2[\text{G}]$ 의 측정범위를 갖고 영구자석은 한국 마그넷 알로이 사의 페라이트 영구자석을 사용하였다. 조향 제어부는 현재의 조향각을 읽어 들이는 포텐쇼 미터, 도로 추적

제어기가 출력하는 조향각 명령을 아날로그 전압으로 변환하기 위한 12bit D/A 변환기, 조향각 명령과 현재의 조향각을 비교하여 증폭하는 차동 증폭기, PC 제어기로 구성되어 도로의 중심을 따라서 주행 할 수 있도록 조종한다.

## 8. 주행실험 및 고찰

사용된 자기장 도로는 그림 11과 같이 직선과 곡선을 포함하여 총 18m로 이루어져있다. 여기서 처음곡선의 곡률 반경은 7(m), 다음곡선은 5.5(m)이다.

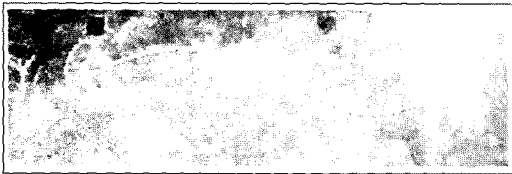


그림 11. 자율주행 실험용 도로모형.

Fig. 11. Shape of road for autonomous driving test.

그림 12는 그림 11의 실험도로에서 주행하는 과정을 나타내었다. 이는 직선 및 곡선 도로를 1.0[m/sec]의 속도로 주행할 때 주행과정으로 연속적인 영상을 부분적으로 샘플링 한 것이다.

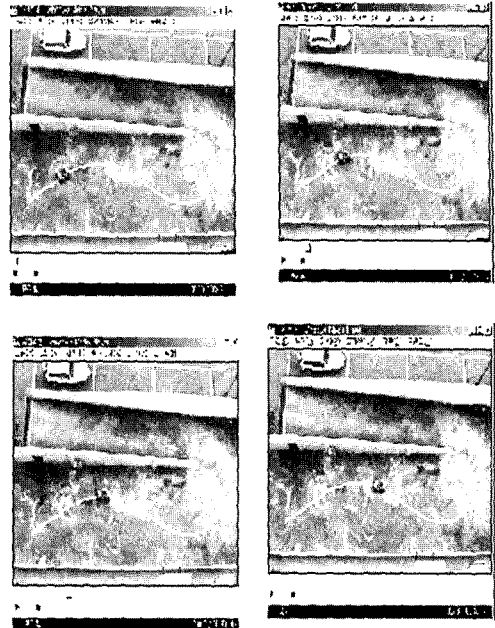
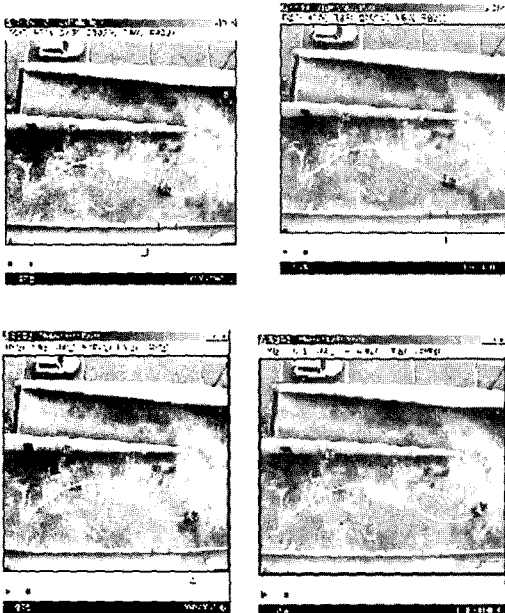


그림 12. 곡선도로 주행시 궤적.

Fig. 12. Trajectory while driving on the curved road.

그림에서와 같이 직선과 곡선부분이 있는 실험도로에서 신경회로망에 의한 제어가 잘 됨을 볼 수 있다. 본 논문에서 제안된 방법으로 자율주행이 가능한 최대 속도는 도로환경과 센서의 샘플링 속도 그리고, 처리 프로세서의 성능에 따라 달라질 수 있으며 본 연구에서 사용된 곡률 반경 5.5(m)의 도로에서는 정상 주행 가능한 최대 속도가 3(m/s)였다.

## 9. 결 론

본 논문에서는 도로면에 일정 간격으로 영구 자석을 설치하고 차량에 자기장을 검출하는 센서를 장착하여 자기장의 변화에 따라 조향각을 제어하는 방법을 연구하였다. 단일 영구자석의 자계 분포로부터 자석열에 의한 자계를 해석하여 자기장 도로를 구성하였다.

자석열에 의해 도로에 형성된 자기장( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ )값과 조향각의 관계를 이용하여 자율주행 차량의 조향 제어기를 구성하였다. 조향 제어기는 신경회로망을 이용하여 설계하였으며, 입력층 3개, 은닉층 10개, 출력층 1개로 구성하였다. 신

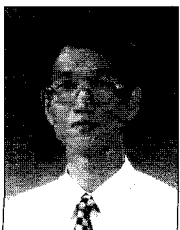
경회로망의 학습을 위한 입력패턴은 학습 패턴 획득용 시뮬레이터를 제작하여 도로를 생성하고 차량을 주행시키면서 모델식에 의해 계산된 자기장( $B_x, B_y, B_z$ )값을 사용하였고, 타겟패턴은 현재 차량이 도로의 측 방향으로 떨어진 거리, 그리고 도로 방향과 차량 진행 방향의 차이를 이용하여 얻은 조향 제어값을 사용하였다. 신경회로망 제어기는 역전파 학습 알고리즘을 이용하여 제어기를 학습하였고 시뮬레이션 결과 지정된 경로를 따라 최대 오차 3cm 이내로 주행함을 확인하였다.

실제 차량에 제안한 방법을 적용하기 위하여 실험용 전기자동차를 제작하고, 직선과 곡선으로 구성된 실험용 도로에 10cm 간격으로 영구자석을 도로 중심에 설치하여 자기장 도로를 구성하였다. 자석이 설치되어 있는 도로에서의 지구 자기장은 보정용 센서를 설치하여 보정하여 지구 자기장에 의한 영향을 제거하였고, 자기장 도로에서 신경회로망 제어기로 자율주행 실험한 결과 제안된 자기장을 이용한 방법으로 자율주행이 가능함을 확인하였다.

## 10. REFERENCE

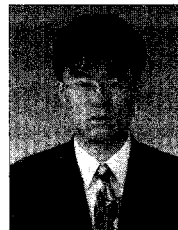
- [1] James G. Bender, "An Overview of System Studies of Automated Highway Systems", IEEE Transaction on vehicular Technology, vol, 40, No.1, February 1991.
- [2] Ronald K and Jurgen, "Smart Cars and Highway Go Global," IEEE Spectrum, pp. 26-36, 1991.
- [3] Young-jae Ryoo and Young-Cheol Lim, "Neuro-Fuzzy Control System for Vision-Based Autonomous Vehicle," 1999 IEEE Fuzzy Systems conference Proceedings, pp.III-1643~1648, 1999.
- [4] Wei-bin Zhang and Robert E.Parsons, "An Intelligent Roadway Reference System for Vehicle Lateral Guidance/Control," PATH report, pp. 96-100, 1992.
- [5] Gregory F. Jacobs, "A Magnetic Pavement Marking and Sensor System for Lateral Control/Guidance of Vehicle," VERTIS, pp. 1236-1241, 1995.
- [6] Angus P. andrews, "The Accuracy of Navigation using Magnetic Dipole Beacons," Journal of the Institute of Navigation, VOL. 38, No. 4, pp 367-381, Winter 1991-92.
- [7] Han-Shue Tan, "Development of an Automated Steering Vehicle Based On Roadway Magnets-A Case Study of Mechatronics System Design," IEEE/ASME Transactions on mechatronics, VOL, 4, NO.3, September 1999.
- [8] Jurgen Guldner, "Study of Design Direction for Lateral Vehicle Control", Proceedings of the 36th Conference on Decision & Control, December 1997.
- [9] Seok-Jun Son and Young-Jae Ryoo "The Lateral Guidance System of an Autonomous Vehicle Using a Neural Network Model of Magneto-Resistive Sensor and Magnetic Fields", ICEE2K, pp477-480, 2000.

## 著 者 紹 介



**김 태 곤 (Tae-Gon Kim)**  
1985년 전남대학교 전기공학과 (공학사)  
1991년 전남대학교 전기공학과 (공학석사)  
현재 : 전남대학교 전기공학과 박사과정

관심분야 : 신경회로망 및 퍼지 이론, 지능제어시스템, 이동로봇, 자율주행시스템



**손 석 준 (Seok-Jun Son)**  
1999년 서남대학교 전기공학과 (공학사)  
2001년 전남대학교 전기공학과 (공학석사)  
현재 : 전남대학교 전기공학과 박사과정

관심분야 : 신경회로망 및 퍼지 이론, 지능제어 시스템, 이동로봇, 자율주행시스템

**유 영 재 ( Young-Jae Ryoo )**

1991년 전남대학교 전기공학과 (공학사)  
 1993년 전남대학교 전기공학과 (공학석사)  
 1998년 전남대학교 전기공학과 (공학박사)  
 현재 : 목포대학교 제어계측공학과 전임임사  
 관심 분야 : 신경망 및 퍼지이론, 지능제어시스템, 이동로봇, 자율주행시스템, 전기자동차 구동시스템

**김 의 선 ( Eui-Sun Kim )**

1981년 전남대학교 전기공학과 (공학사)  
 1987년 전남대학교 전기공학과 (공학석사)  
 1999년 전남대학교 전기공학과 (공학박사)  
 현재 : 서남대학교 전기전자멀티미디어공학부  
 조교수  
 관심분야 : 신경망 및 퍼지이론, 지능제어시스템, 이동로봇, 자율주행시스템, 전기자동차 구동시스템

**임 영 철 ( Young-Cheol Lim )**

1975년 전남대학교 전기공학과 (공학사)  
 1977년 고려대학교 전기공학과 (공학석사)  
 1990년 고려대학교 전기공학과 (공학박사)  
 현 재 : 전남대학교 전기공학과 교수  
 전남대학교 고품질전기전자부품및시스템연구센터 소장  
 관심분야 : 퍼지, 신경망, 지능 제어계측, 전력 전자