

## 3축 자기센서를 이용한 자기차선상의 차량위치 및 방향 추정 유영재

### Estimation of Vehicle Position and Orientation on Magnetic Lane Using 3-axis Magnetic Sensor

Young-Jae Ryoo

#### 요 약

본 논문에서는 차량이 자동으로 도로를 추적하는 자율주행을 실현하기 위한 선행조건으로서 자기차선의 자장으로부터 차량의 위치와 방향을 추정하기 위한 시스템을 제안한다. 자기차선에 사용되는 원통형 영구자석인 단일 자기원에 자기 쌍극자 모델이 적용될 수 있음을 검증하기 위해서 자기센서를 이용하여 위치에 따른 원형 영구자석 자장의 3축 성분을 측정하고 실험 데이터를 자기 쌍극자 모델과 비교하였다. 실험 데이터를 기반으로 한 모델을 이용하여 자장의 3축 성분에 의하여 센서의 위치를 추정할 수 있음을 보인다. 단일 자기원에 검증된 자기 쌍극자 모델을 자기차선으로 확장하고, 센서의 위치와 방향에 따른 자장의 3축 성분의 실험 데이터를 획득한다. 실험 데이터의 맵핑을 이용하여 자장의 3축 성분에 따른 센서의 위치와 방향을 추정한다. 자기차선 상에서 차량의 위치와 센서를 제안된 방법에 의해 추정하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 차선추적에 적용한다.

#### Abstract

In this paper, an estimation system of vehicle position and orientation on magnetic lane, which is a parameter of the steering controller for automated lane following is described. To verify that the magnetic dipole model could be applied to a magnetic unit paved in roadway, the analysis of the model is compared with the data of 3-axis magnetic field measured experimentally. The sensor location could be estimated by analysis of the model based on experimental data. For the magnetic lane model merged magnetic unit, the relation of sensor location and magnetic field is acquired experimentally. The proposed estimation of vehicle position and orientation is adopted to automated lane following by computer simulation.

#### 1. 서 론

지능형 도로교통 체계(Intelligent Transport System; ITS)의 일환으로 1990년대 전 세계적으로 활발히 진행되고 있는 자율주행에 관한 연구는<sup>[1]</sup>, 카메라로 얻은

도로영상의 정보를 이용하여 주행하는 연구가 주를 이루고 있었다<sup>[2-3]</sup>. 이 방법은 날씨가 흐리거나 눈 또는 비가 오는 경우에는 카메라 영상으로부터 도로의 정보를 확보하기에 어렵다는 한계점을 내포하고 있다. 또한 고급 영상 카메라와 실시간으로 영상 데이터를 처리할 수 있는 고성능의 프로세서와 같은 고가장비를 차량에 설치해야 하는 단점 때문에 상용화하는데 어려움이 있었다.

이러한 문제점을 극복하기 위하여 최근에는 도로를

---

목포대학교 제어계측공학과  
(Department of Electrical Engineering, Mokpo National University)

<접수일자 : 2000년 5월 3일>

따라 영구자석을 설치한 자기차선을 추적하여 주행하는 연구가 제안되고 있다. 이 방법을 이용하면 어떠한 기상 조건에서나 또는 도로에 비추는 빛의 양에 관계없이 주행이 가능해질 뿐만 아니라 간단한 센서와 저가의 범용 프로세서를 사용함으로써 차량에 장치를 설치하는 비용이 훨씬 절감된다. 이와같이 차량에 부가장치의 장착을 최소로 하여 저가화 하며, 자율주행에 필요한 장치 및 정보를 얻기 위한 고가의 시설은 도로에 설치한다는 것이 세계적인 연구의 방향이다<sup>14)</sup>. 자기차선 추적에 의한 방법은 도로에 자석을 일렬로 배치하여 자기차선을 구성하고, 자기센서를 이용하여 도로차선의 자장분포를 분석함으로써 이루어진다. 즉 자기차선 상에서 자장분포를 이용하여 자기센서의 위치를 추정하여 자기센서를 부착한 차량의 위치와 방향을 추정한다. 이와같이 추정된 차량의 위치와 방향은 차선을 추적하기 위한 제어기 입력으로 사용된다. 따라서 자율주행차량의 자기차선 추적제어를 위해서는 자장으로부터 차량의 위치를 추정하는 것이 선행되어야 할 과제이다. Wei-bin Zhang은 한 개의 자기원인 단일 자기원에 발생하는 자장의 2차원적인 해석을 통한 위치 예측법을 제안하였다<sup>14)</sup>. 이는 단일 자기원으로부터 일정 위치에 센서가 위치한다고 가정하면, 이때 수평방향 자장세기( $B_H$ ), 수직방향 자장세기( $B_V$ )를 계측함으로써 센서의 수평거리( $D_H$ )와 수직높이( $D_V$ )를 예측하는 방법이다. 그러나 도로추적에 이용되는 자기차선은 여러 개의 단일 자기원이 차선을 따라 일정간격으로 나열된 복잡한 구조이다. 이에 따라 단순한 단일 자기원의 구조가 아닌 복잡한 자기차선의 구조에서 발생하는 자장을 해석하여 센서의 위치를 예측하여야 한다. 자기센서를 장착한 차량이 자기차선으로 구성된 도로를 추적하기 위하여 제어기를 설계할 때 선행되어야 할 과제는 제어기의 주요 입력변수인 차량의 위치를 예측하는 것이다. 차선으로부터 이탈된 차량 위치(vehicle position)는 자장에서 떨어진 자기센서의 위치를 계산함으로써 이루어진다. 자기차선 추적제어에 있어 차량 위치 못지않게 중요한 제어기 입력변수는 도로 방향에 비해 어긋난 차량 진행방향을 나타내는 차량 방향(vehicle orientation)이다. 즉, 그림 1과 같이 자기차선을 추적하는 자율주행차량은 차량 위치인 측방향 편차(lateral deviation;  $d$ )와 차량 방향인 진행각(heading angle;  $\theta$ )을 이용하여 주행 제어기는 차량의 조향각(steering angle;  $\delta$ )을 조절한다.

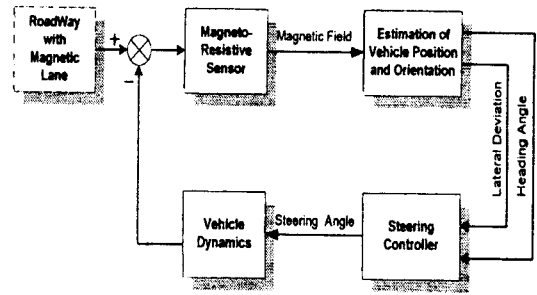


그림 1. 자기차선 추적 시스템.

Fig. 1. Magnetic lane following system.

따라서 본 논문에서는 자기차선에서 발생하는 자장의 3축 성분 세기인 전후방향 자장( $B_x$ ), 측방향 자장( $B_y$ ), 높이방향 자장( $B_z$ )를 해석함으로써 자기차선 추적제어에 필요한 제어기 입력변수인 차량 거리와 차량 방향을 예측하는 시스템을 제안한다. 먼저 단일 자기원 자장의 3축 성분을 이용하여 센서 위치를 예측한다. 자기차선에 사용되는 원통형 영구자석인 단일 자기원에 자기 쌍극자 모델이 적용될 수 있음을 검증한다. 이를 위해서 자기센서를 이용하여 위치에 따른 원통형 영구자석 자장의 3축 성분을 측정하고 실험 데이터를 자기 쌍극자 모델과 비교한다. 실험 데이터를 기반으로 한 모델을 이용하여 자장 3축 성분에 의하여 센서의 위치를 추정할 수 있음을 보인다. 단일 자기원에 검증된 자기 쌍극자 모델을 다수의 자기원이 합성된 자기차선으로 확장하여 자장 3축 성분에 의하여 센서 위치와 방향을 예측한다. 이를 위하여 자기차선에서 센서의 위치와 방향에 따른 자장 3축 성분 세기 실험 데이터를 획득하고 분석한다. 실험 데이터의 분석을 통하여 자장의 3축 성분에 따른 센서의 위치와 방향을 추정한다. 다수의 자기원으로 구성된 자기차선 상에서 센서의 위치와 방향인 차량의 이탈 측방향 편차와 진행각을 제안된 방법을 차선 추적제어에 적용하여 유용성을 검증한다.

## 2. 단일 자기원의 자기 쌍극자 모델

원통형 영구자석을 자기 쌍극자 모델로 가정하면, 단일 자기원에 의한 자장의 3축 성분 세기를 유도할 수 있다. 단일 자기원의 위치를 원점으로 할 때 위치  $(x, y, z)$ 에서의 자기 쌍극자의 자위는 다음과 같다.

$$U = \frac{M \cos \theta}{4\pi\mu_0 r^2} = \frac{Mz}{4\pi\mu_0(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \quad [A] \quad (1)$$

단,  $U$ : 자기쌍극자자위,  $r$ :  $\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}$ ,

$M$ : 자기쌍극자모멘트,  $\mu_0$ : 진공중의투자율. 자장을 계측하고 센서의 위치를 예측하기 위하여 그림 3과 같이 시스템을 설계·제작하였다.

자기쌍극자 자위와 자계의 관계로부터 자장의 세기  $B$ 의 3축 방향 성분의 세기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{3Kxz}{r^5} [G] \\ B_y &= \frac{3Kyz}{r^5} [G] \\ B_z &= \frac{K(2z^2 - x^2 - y^2)}{r^5} [G] \end{aligned} \quad (4)$$

단,  $K$ :  $\frac{Ma}{4\pi}$   $\alpha$ : 단위환산계수

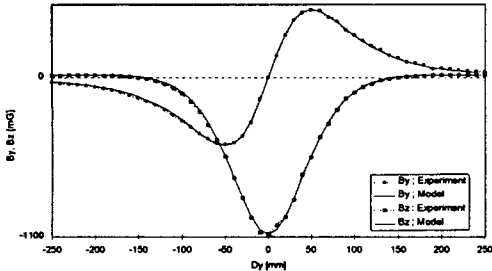


그림 2. 모델식과 실험 데이터의 비교.  
Fig. 2. Comparison between model equation and experimental data.

이와 같은 자기쌍극자로 가정된 모델식이 원통형 영구자석의 자기원에 적용 가능한가를 검증하기 위하여 실험을 통해 획득된 데이터와 비교하였다. 직경 25[mm]×두께 5[mm], 자기쌍극자 모멘트  $9.816 \times 10^{-7}$ [Wb·m]의 페라이트 자석의 자기원으로부터 높이 12.5[cm]에 센서를 위치하고 수평방향( $D_y$ , 또는  $D_x$ )으로 이동함에 따른 자장의 변화를 살펴보았다. 그림 2는 센서를 수평방향으로 -250[mm]에서 +250[mm] 이동시킬 때 수직성분 자장과 수평성분 자장의 변화를 나타낸다. 자기 쌍극자에 의한 모델식(model)과 영구자석에 의한 실험 데이터(Experiment)가 거의 일치함을 볼 수 있다. 수평성분 자장( $B_x$  또는  $B_y$ )에서 자기 쌍극자 모델식과 실험 데이터와는 최대 13[mG]내 오차를, 수직

성분 자장( $B_z$ )은 최대 28[mG]의 오차를 발생하였다. 따라서 영구자석의 단일 자기원은 자기쌍극자 모델을 적용하는 것이 적절함을 알 수 있다.

### 3. 자장계측 및 위치에측 시스템

자장을 계측하고 센서의 위치를 예측하기 위하여 그림 3과 같이 시스템을 설계·제작하였다. 자기차선을 구성하고 이를 자기센서를 이용하여 자장을 측정한다. 마이크로컨트롤러에 의해 계측된 자장 데이터를 데이터 처리를 위해 직렬 전송되며, 컴퓨터에서 이를 분석하여 센서의 위치를 예측한다. 자기차선에 활용되는 자석은 크기는 작지만 상대적으로 큰 자장을 발생하는 단일 자기원으로 직경 25[mm]×두께 5[mm], 자기 쌍극자 모멘트  $9.816 \times 10^{-7}$ [W·m]를 가진 페라이트형 자석을 사용하였다.

자기 센서는 Honeywell사의 HMC1001/1002를 이용하였으며<sup>[9]</sup>, 이는  $\pm 2$ [Gauss] 범위 내에서 자장을 측정할 수 있고 100 [ $\mu$ Gauss] 이내의 정밀도를 보장한다. 센서를 이용하여 1[Gauss]당  $\pm 16$ [mV]의 전압을 출력할 수 있도록 Wheatstone bridge 회로를 구성하고, Op-amp를 이용해 증폭 및 오프셋 조절하여 -2[G]에서 +2[G]의 자장이 2.5[V]를 중심으로 0[V]에서 5[V]사이에 전압으로 출력되도록 설계하였다. 이와 같은 센서와 전치 증폭부를 전후방향, 측방향, 수직방향의 3축 성분에 대하여 동일하게 적용하여 증폭하였다. 증폭된 신호는 12비트 A/D 변환기에 의하여 디지털 데이터로 변환되며 최소 61 [ $\mu$ Gauss] 이하의 분해능을 가진다. A/D 변환된 데이터는 8비트 마이크로컨트롤러를 이용하여 메모리에 저장하며, RS232를 통해 데이터 처리용 컴퓨터로 전송한다.

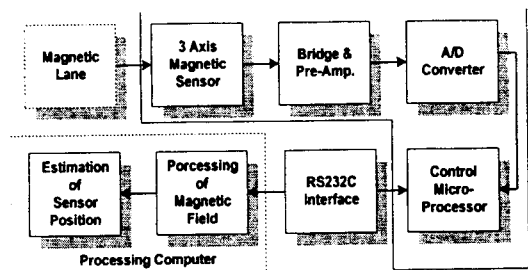


그림 3. 자장측정 및 위치추정  
Fig. 3. Measurement of magnetic field and estimation of location.

### 4. 단일 자기원의 위치예측

#### 4.1 센서 위치에 따른 자장의 3축 성분

단일 자기원에서 발생하는 자장의 공간적 분포를 분석함으로써 자장의 3축 성분을 이용하여 센서의 위치를 예측할 수 있다. 이를 위해서 단일 자기원을 고정하고 자장의 세력이 영향을 미치는 모든 공간에서 센서를 이동시키면서 자장을 측정할 모든 데이터를 획득한다. 이와같은 실험의 예로 자석으로부터 자기센서를 75[mm] 높이에 위치시키고, 수평방향으로 이동시킴에 따른 자장의 3축 성분을 살펴보면 다음과 같다.

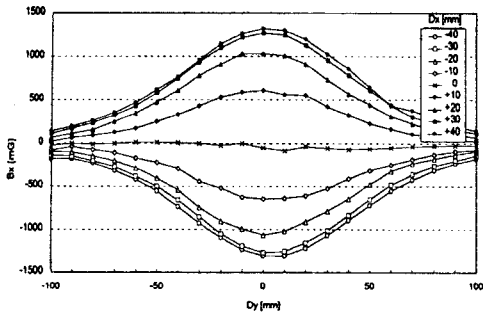


그림 4. 전후방향 자장( $B_x$ )의 분포.  
Fig 4. Distribution of fore-aft magnetic field( $B_x$ ).

그림 4는 자기센서를 수평방향인 전후방향( $Dx$ )과 측방향( $Dy$ )으로 이동시키면서 측정한 전후방향성분의 자장( $B_x$ )을 나타낸다. 측방향으로 -100[mm](좌측)에서 100[mm](우측)으로 이동하는 동안 자기원의 위에 있을 때 가장 큰 자장을 갖는다. 또한 전후방향에서 자기원의 앞쪽에 위치할 때와 뒤쪽에 위치할 때에 따라 자장 방향이 바뀌게 된다.

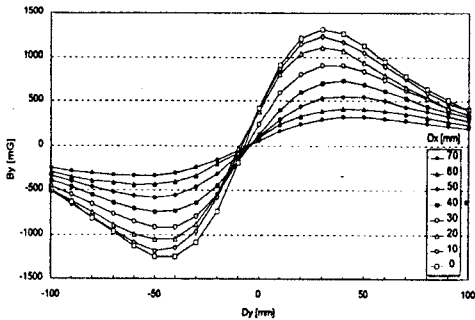


그림 5. 측방향 자장( $B_y$ )의 분포.  
Fig 5. Distribution of lateral magnetic field( $B_y$ ).

그림 5는 자기센서의 수평위치에 따라 계속된 측방향 자장의 분포를 나타낸다. 자기원의 좌측과 우측에서 측방향 자장은 서로 반대방향으로 동일한 세기를 나타낸다. 자기원의 중심에서 전후방향으로 이동함에 따라 측방향 자장의 영향은 감소한다.

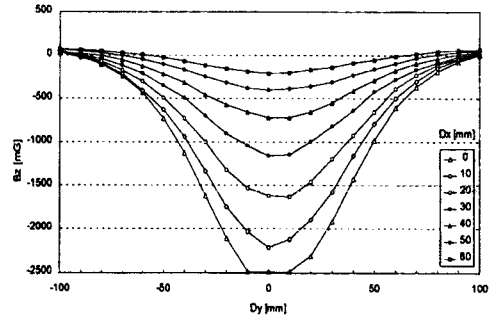


그림 6. 높이 방향 자장( $B_z$ )의 분포.  
Fig 6. Distribution of height magnetic field( $B_z$ ).

그림 6은 자기센서의 수평위치에 따른 수직방향 자장의 분포를 나타낸다. 자장의 중심에서 수평방향으로 이동함에 따라 수직방향 자장은 감소함을 볼 수 있다.

#### 4.2 센서위치 추정

4.1에서 실험에 의해 얻어진 공간적 위치에 따른 자장 3축 성분의 분포 데이터를 이용하여, 자장과 위치관계를 역으로 맵핑하면 센서의 위치를 추정할 수 있다.

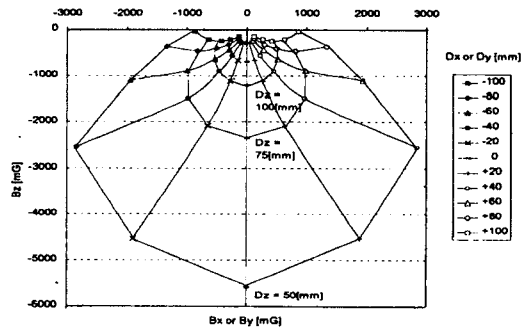


그림 7. 자장세기에 따른 센서 위치 예측.  
Fig 7. Estimation of sensor position( $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$ ) dependent on magnetic field( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ ).

그림 7은 수평성분 자장( $B_x$  또는  $B_y$ )와 수직성분 자장( $B_z$ )을 이용하여 센서의 높이와 수평방향 위치를 역으로 맵핑한 결과이다. 대표적인 관계로 자장에 따른

수평방향 위치는 실선으로 나타내었는데, 센서가 자기원의 중심에서 우측으로 20[mm]씩 100[mm]까지 위치하였을 때 좌측으로 -20[mm]씩 -100[mm]까지 위치하였을 때 각각의 자장을 알 수 있다. 또한 자장에 의해 맵핑된 수직방향 위치는 점선으로 표현하였는데, 센서 높이가 50[mm], 75[mm], 100[mm], 125[mm], 150[mm]로 높아짐에 따른 분포를 볼 수 있다. 위와 같은 맵핑을 이용하여, 수평성분 자장 -975[mG], 수직성분 자장 -1496[mG]일 때 센서의 위치는 수평 -400[mm], 수직 75[mm]임을 추정할 수 있다.

### 5. 자기차선의 위치 및 방향각 예측

#### 5.1 자기차선의 모델

단일 자기원에서 사용한 자기 쌍극자 모델이 자기차선에도 적용 가능한 가를 검증하기 위하여 해석적인 방법과 실험적인 방법을 통하여 비교한다. 여러 개의 자석이 도로를 따라 일정간격으로 일렬로 설치되어 있다고 가정하면, 임의의 위치에서 자장은 여러 단일 자기원에서 발생하는 자장의 3축 성분을 합성하여 해석할 수 있다.

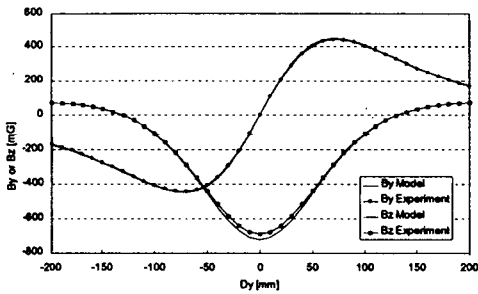


그림 8. 측 방향 자장( $B_y$ )의 분포.

Fig. 8. Distribution of lateral magnetic field ( $B_y$ ).

단일 자기원을 주행방향인 전후방향을 따라 100[mm] 간격으로 일렬로 배치하여 자기차선을 구성하였다. 자기원의 중심에서 자기센서의 높이를 125[mm]로 고정하고 수평 및 수직 위치를 10[mm] 씩 이동하면서 측정 실험을 수행하였다. 전후방향 자장( $B_x$ )는 앞뒤의 자기원에 의한 자장이 서로 상쇄되므로 0[G]를 중심으로 약  $\pm 15$ [mG] 이하의 진동 폭을 갖는다. 그림 8은 측방향 자장과 수직방향 자장의 분포를 나타내며, 해석적인 결과와 실험에 의한 결과가 일치함을 알 수 있다.

#### 5.2 위치 및 방향각 추정에 의한 자기차선 추적

센서는 자기차선으로부터 일정 높이에 위치시키고, 차선방향으로부터 센서의 방향각을 10°, 20°, 30°, 40° 회전시킴에 따른 각 수평위치에서 자장 3축 성분의 분포를 조사하였다. 그림 9에서 보면 전후방향 자장과 측방향 자장은 센서의 측방향 위치에 따라 모델과 동일한 결과가 나타남을 알 수 있다. 센서 방향각이 차선방향에서 어긋날수록 전후방향 자장은 증가되는 반면 측방향 자장은 감소함을 알 수 있다. 이는 단일 자기원이 일렬로 배치되면 차선방향 자장은 상쇄되어 제거되고, 횡방향 자장만 존재하게되어 센서의 전후방향 자장과 측방향 자장으로 분리되기 때문이다. 한편 높이 방향 자장은 센서 방향각과 무관함을 알 수 있다. 이와 같은 데이터를 이용하여 역맵핑을 적용하면 자장의 3축 성분으로부터 센서의 위치와 방향각을 추론할 수 있다. 센서의 위치와 방향각은 차량의 것과 동일하며, 이를 간단한 선형제어기에 적용하면, 차량을 차선을 추적하여 주행할 수 있게 된다. 그림 10는 이와같이 임의의 위치에서 자장의 3축 성분을 이용하여 차량의 위치와 방향각을 추론하고 이를 차량추적제어에 적용하여 주행한 결과이다.

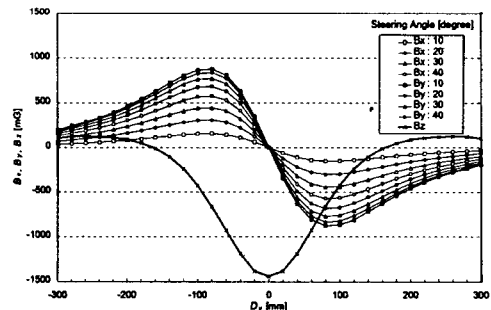


그림 9. 조향각에 따른 자장의 3축 성분.

Fig. 9. 3-axis components of magnetic field for steering angle.

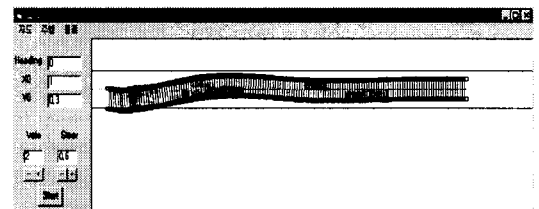
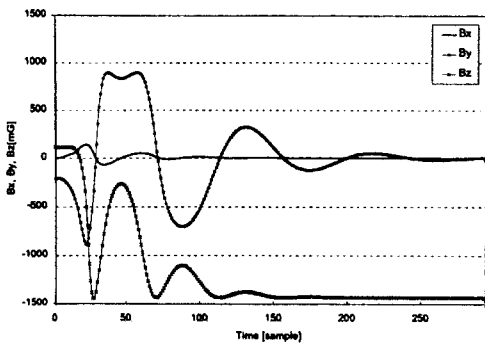
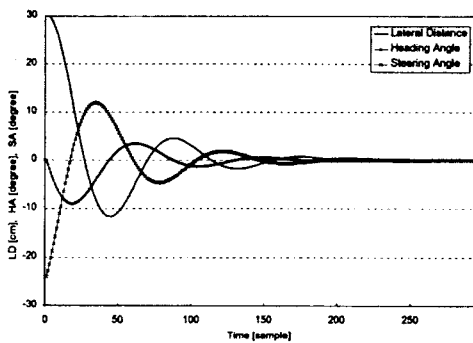


그림 10. 주행실험 차량궤적.

Fig. 10. Trajectory of driving.



(a)



(b)

그림 11. 주행 실험결과.

- (a) 전후방향( $B_x$ ), 측방향( $B_y$ ), 높이방향자장( $B_z$ ),
- (b) 측면 위치(LD), 진행각(HA), 조향각(SA).

Fig. 11. Results of driving.

- (a)Fore-aft( $B_x$ ), lateral( $B_y$ ), vertical component( $B_z$ ) of magnetic field,
- (b) Lateral deviation(LD), heading angle(HA), steering angle(SA).

차량의 초기 위치를 차선도로에서 우측으로 300[mm] 수평 이동시킨 후 차선추적제어를 하였을 때 주행궤적을 나타낸다. 이때 자장의 3축 성분과 이에 따른 위치와 방향각을 추론하여 주행한 결과는 그림 11과 같다. (a)에서 전후방향 자장은 차량방향이 차선방향과 일치하는 초기에는 없다가, 주행하면서 차량방향이 어긋남에 따라 커진다. 측방향 자장은 초기에 컸다가 차선중앙에 접근함에 따라 감소함을 알 수 있다. 높이방향 자장은 초기에 센서가 측면으로 이탈되었을 때는 적지만, 차량이 차선중앙으로 이동하면 증가한다. 이 자장의 3축 성분을 이용하여 (b)와 같이 차량의 측면위치(LD)와 진행각(HA)을 추정할 수 있다. 추정된 값을 이용하여 선형제어기에 적용하면 차량의

조향각을 결정된다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 자기센서를 장착한 차량이 자기차선으로 구성된 도로를 추적하기 위한 제어기를 설계할 때 요구되는 입력변수인 차량의 위치와 방향을 예측하기 위한 방법을 제안하였다. 즉 자기차선으로 발생하는 자장 3축 성분의 세기인 전후방향 자장( $B_x$ ), 측방향 자장( $B_y$ ), 높이방향 자장( $B_z$ )를 해석함으로써 자기차선 추적제어에 필요한 제어기 입력변수인 차량 거리와 차량 방향을 예측하였다. 이를 위해 먼저 자기차선에 사용되는 원통형 영구자석인 단일 자기원에 자기 쌍극자 모델이 적용될 수 있음을 실험 데이터와 모델과 비교함으로써 검증하였다. 실험 데이터를 기반으로 한 모델을 이용하여 자장의 3축 성분에 의하여 센서의 위치를 예측할 수 있음을 보였다. 단일 자기원에 검증된 자기 쌍극자 모델을 다수의 자기원이 합성된 자기차선으로 확장하였다. 이를 위해 자기차선에서 센서의 위치와 방향에 따른 자장 3축 성분의 세기 실험 데이터를 획득하고 분석하였다. 실험 데이터의 분석을 통하여 자장의 3축 성분에 따른 센서의 위치와 방향을 추정하였다. 향후 제안된 차량의 위치와 방향을 추정 방법은 신경망 제어기와 결합하고, 제작한 자율주행차량에 탑재하여 실제 자기차선추적 주행에 적용할 예정이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Ronald K and Jurgen, "Smart cars and highway go global," IEEE Spectrum, pp. 26-36, 1991.
- [2] James G. Bender, "An overview of system studies of automated highway systems", IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 40, No.1, Feb. 1991.
- [3] Young-Jae Ryoo and Young-Cheol Lim, "Neuro-fuzzy control system for vision-based autonomous vehicle," 1999 IEEE Fuzzy Systems Conference Procs., 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 Report, pp. 1236-1241, 1995.
- [6] Angus P. Andrews, "The accuracy of navigation using magnetic dipole beacons," Science center, 1991.
- [7] Han-Shue Tan, "Development of an automated steering vehicle based on roadway magnets - a case study of mechatronics system design," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol, 4, No.3, sept. 1999.
- [8] Jurgen Guldner, "Study of design direction for lateral vehicle control", Procs. of the 36th Conf. on Decision & Control, December 1997.
- [9] "One and two axis magnetic sensors", Honeywell, 1999.

---

 著 者 紹 介
 

---



유 영 재 (柳 泳 材)

 1991년 전남대학교 전기공학과  
(공학사)

 1993년 전남대학교 전기공학과  
(공학석사)

 1998년 전남대학교 전기공학과  
(공학박사)

현재 : 목포대학교 제어계측공학

과 전임강사

관심분야 : 센서응용, 자율주행시스템, 이동로봇, 전기자동차 구동시스템, 신경망 및 퍼지이론, 지능제어시스템