

자율주행차량과 로봇의 안내를 위한 자계위치인식시스템

Magnetic Position Sensing System for Autonomous Vehicle and Robot Guidance

정영윤 · 김근모 · 유영재

Young-Yoon Jung, Geun-Mo Kim and Young-Jae Ryoo

목포대학교 제어시스템공학과

요 약

본 논문은 자율주행차량과 로봇의 안내를 위한 새로운 자계위치인식방법을 제안한다. 차량 및 로봇이 자율주행을 하기위해서는 이동경로상의 현재 위치를 인식하는 것이 기본적으로 요구된다. 자계기반 자율주행차량과 로봇은 자성체로부터 발생되는 자계를 계측하여 위치정보를 검출한다. 이러한 자계위치인식시스템에서 지구자계는 기본적인 왜란으로 작용한다. 본 논문에서는 지구자계의 영향을 제거하기 위해 다수의 1축 자계센서 열을 구성하였으며, 자계센서 출력의 선형동작영역을 이용하여 정밀한 위치인식시스템을 개발하였다. 제안하는 방법이 자율주행차량과 로봇의 안내를 위해 사용 가능함을 실험을 통하여 검증하였다.

키워드 : 자계위치인식, 자계센서 열, 수직성분자계, 자계센서의 선형동작영역, 자율주행 차량과 로봇의 안내

Abstract

In this paper, a new magnetic position sensing method for autonomous vehicle and robot guidance is presented. In autonomous vehicle and robot control, position sensing is an important task for the identification of their locations, such as the current position within a trajectory. The magnet based autonomous vehicle and robot was identified position via magnetic materials. In the magnetic sensing system, the Earth field is one of the largest disturbance. To removal of the Earth field, this paper proposes 1-dimensional magnetic field sensors array and develops precise position sensing system using linear operating region of the magnetic field sensor. This proposal is verified a feasible magnetic position sensing system for autonomous vehicle and robot guidance by the experimental results.

Key Words : Magnetic position sensing, Magnetic field sensors array, Vertical field, Linear region of magnetic field sensor, Autonomous vehicle and robot guidance.

1. 서 론

우리는 공상과학 영화나 소설을 통해 사람의 조작 없이 정밀하게 주행하는 차량이나 로봇을 흔히 접할 수 있다. 실제 차량과 로봇이 주변의 도움이 없이 자율주행을 하는 것은 대단히 어려운 문제이다. 차량과 로봇의 자율주행을 위해서는 이동경로상의 현재의 위치를 인식하는 것이 기본적으로 요구된다. 자율주행 차량 및 로봇은 위치인식을 위해 외부의 센서로부터 다양한 정보를 획득한다. 차량과 로봇의 위치인식방법으로는 GPS를 이용한 방법, 전력선을 이용하는 방법, Vision 및 자계를 이용하는 방법 등 많은 기술들이 있다 [1-3]. 이러한 위치인식방법들 중 본 논문은 자계위치인식시스템에 관한 내용이다.

자계위치인식시스템은 차량과 로봇의 이동경로에 매설된 자성체(자석, 이하 자계표식 이라한다)로부터 발생하는 자계

를 측정하여 위치정보를 검출한다[4-5]. 자계위치인식시스템은 그림 1과 같이 차량과 로봇의 이동경로에 일정한 간격으로 매설된 자계표식(Magnetic marker)과 자계표식으로부터 자계를 측정하는 자계센서로 구성되어진다. 자계위치인식시스템은 반영구적인 수명의 자계표식을 사용하기 때문에 유지 보수비용이 저렴하며, 반복적이며 정밀한 계측을 할 수 있다. 또한 눈, 비, 낙엽, 안개 등 기후에 영향을 받지 않는다는 장점을 지니고 있다.

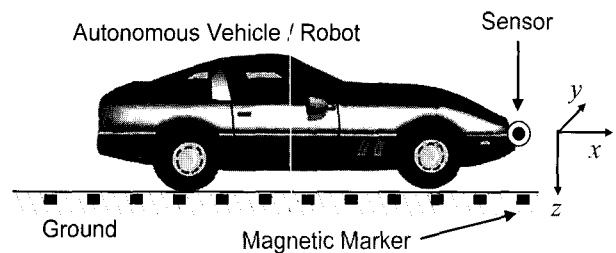


그림 1. 자계위치인식시스템.

Fig. 1. Magnetic position sensing system.

접수일자 : 2006년 10월 21일

완료일자 : 2007년 1월 30일

감사의 글 : 본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성 사업의 연구결과로 수행되었음.

이러한 자계위치인식시스템은 세계적으로 3개국(미국, 네델란드, 대한민국)에서 연구, 적용되고 있다[7-8]. 미국의 경우는 캘리포니아 PATH에서 연구되어 자동차, 버스 및 제철 차량 등에 적용되었으며, 네델란드는 APTS의 Phileas 프로젝트에서 연구되어 Eindhoven 시내와 공항사이를 운행하는 Phileas라는 차량에 적용되었다. 대한민국의 경우는 자계위치인식시스템을 적용한 Bimodal 저상굴절 차량이 2008년 서울시내에 도입될 예정이다. 기존에 연구, 적용된 자계위치인식방법은 Averaging, Peak-Valley identification, Dual sensor measurements 등이 있다. 상기의 방법들은 아래와 같은 문제점을 해결하는데 약간의 단점을 지니고 있다[5, 7].

지구는 중심부에 자석을 놓아둔 것과 같이 남극과 북극을 통과하는 자계의 분포를 가지고 있다[9]. 자계센서에 의해 측정된 지구자계는 센서의 방향에 따라 변화한다. 변화하는 지구자계는 자계위치인식시스템에서 기본적인 왜란으로 작용한다. 따라서 정밀한 자계위치인식시스템을 위해서는 지구자계의 영향이 제거되어야한다. 또한 차량과 로봇의 주행에 사용되기 때문에 왜란자계는 실시간으로 제거되어야한다. 그리고 실제 시스템에서 메모리 소비율은 최소화되어야한다.

본 논문에서는 1축 자계센서 열[6]을 구성하여 왜란자계를 실시간으로 제거가능하게 하였으며, 자계센서 출력의 선형동작영역과 직선의 방정식을 이용하여 메모리 소비율을 최소화한 정밀한 위치인식시스템을 개발하였다. 제안하는 자계위치인식시스템은 수직성분 자계센서 열과 마이크로컨트롤러를 사용한 위치인식알고리즘으로 구성되어있다. 실험결과를 통하여 제안하는 시스템의 실용성을 검증하였다.

2. 연구배경

2.1 영구자석과 자계

본 절에서는 자석과 자계의 관계에 대한 모델을 분석하였다. 자석에서 발생하는 자계는 그림 2와 같이 직각좌표계를 사용하여 표현할 수 있다. 그림 2는 자계의 3차원 성분벡터를 직각좌표계를 이용하여 나타낸 것이다. B_x , B_y 는 수평성분벡터이고, B_z 는 수직성분벡터이다.

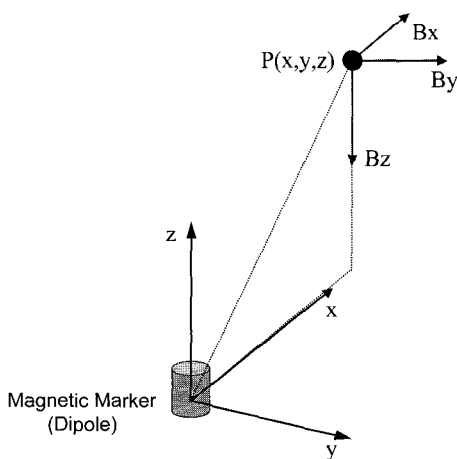


그림 2. 자기쌍극자 모델.

Fig. 2. Model of the magnetic dipole.

임의의 한 지점 P 에서 자석으로부터 발생하는 자계의 3차원 성분 B_x , B_y , B_z 는 각각 아래의 식 (1), (2), (3)으로 나

타낼 수 있다.

$$B_x = \frac{3Kmxz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \quad (1)$$

$$B_y = \frac{3Kmyz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \quad (2)$$

$$B_z = \frac{Km(2z^2 - x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \quad (3)$$

여기서, $Km = \frac{\mu_0 M_T}{4\pi}$, $M_T = \pi b^2 M_0$, Km 은 비례상수, M_0 는 자기모멘트, 그리고 b 는 원통형 영구자석의 반지름이다. 위의 자기쌍극자 모델을 통해 자계표식의 위치와 자계의 관계를 알 수 있으며, 3차원 자계의 특성을 파악할 수 있다.

2.2 지구자계

지구자계는 지구 중심부에 영구자석이 위치한 것과 같이 남극과 북극을 통과하는 분포를 나타낸다. 지구자계는 지구상 어느 곳이나 존재하기 때문에 자계위치인식시스템에서 기본적으로 고려되어야한다. 그림 3은 자계센서를 수평면상에서 지표면에 수직한 선을 축으로 360도 회전시키며 지구자계의 3차원 성분을 측정된 결과이다. 그림 3에서 X -Axis는 지구자계의 수평성분자계 B_x , Y -Axis는 B_y 를 의미하고, Z -Axis는 수직성분자계 B_z 를 나타낸다.

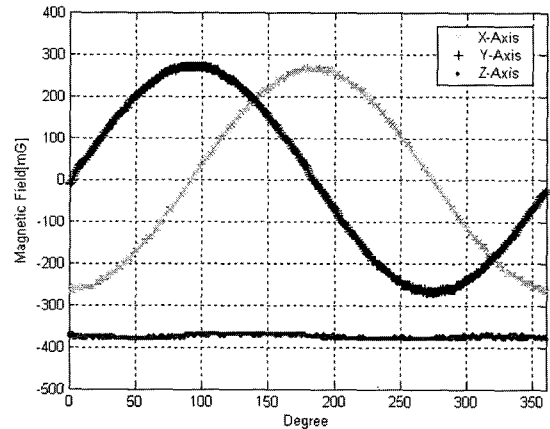


그림 3. 지구자계의 변화.

Fig. 3. Variation of the Earth magnetic field.

수평성분자계 X -Axis, Y -Axis는 센서의 방향에 따라 값이 변화하고, 수직성분자계 Z -Axis는 센서의 방향과 무관하게 일정한 값을 유지하는 것을 볼 수 있다. 즉, 차량이나 로봇의 주행방향이 변화하면 적용되는 지구자계 또한 변화하는 것이다. 따라서 방향과 함께 변화하는 지구자계는 자계위치인식시스템에서 고려되어야 한다. 본 논문에서는 위치인식을 위해 방향과 무관하게 일정한 값을 유지하는 수직성분자계를 채택하였다.

2.3 기존의 자계위치인식방법

차량이나 로봇의 자율주행을 위해 연구, 적용된 대표적인 자계위치인식방법은 Averaging, Peak-Valley identification,

Differentials between dual sensor measurements 등이 있다. Averaging 방법은 주행경로에 매설된 자계표식 위를 지나면서 측정된 수직성분자계 B_x 의 평균을 이용한다. 이 방법에서는 지구자계의 영향이 고려되지 않았다. Peak-Valley identification 방법은 수평성분자계 B_y 와 수직성분자계 B_z 를 이용하는 방법으로 자계표식과 자계표식 사이를 지나치면서 측정된 B_z 의 Peak와 Valley를 검출하여 지구자계(왜란자계)의 영향을 제거한다. 그러나 이미 지나친 이전의 Valley를 사용하기 때문에 실시간으로 왜란자계의 영향을 제거할 수 없다는 단점을 지닌다. Dual sensor 방법은 두 개의 센서를 이용하여 공통으로 적용되는 왜란자계의 영향을 제거하여 위치를 인식하는 방법으로 지구자계의 영향은 실시간으로 제거 가능하지만 자계표식의 위치와 자계간의 방대한 데이터를 저장하기 위해 많은 메모리를 소비하는 단점을 지니고 있다. 따라서 본 논문에서는 지구자계의 영향을 실시간으로 제거하기 위하여 자계센서 열을 구성하였으며, 메모리 소비율을 최소화하기 위해 자계센서 출력의 선형동작영역의 직선방정식을 이용한 위치인식알고리즘을 사용하였다.

3. 제안하는 자계위치인식시스템

3.1 수직성분자계

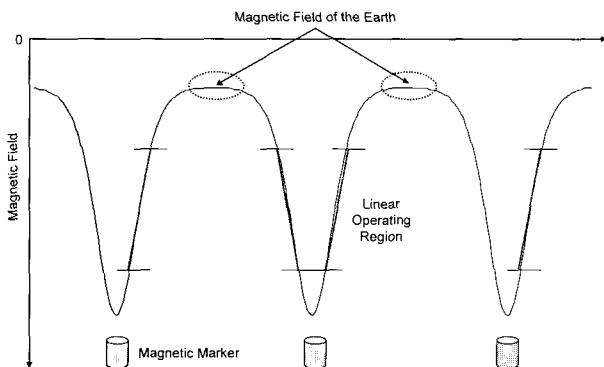


그림 4. 자계표식과 수직성분자계.
Fig. 4. Magnetic marker and vertical magnetic field.

그림 4는 자계표식의 위치와 수직성분자계의 변화를 나타낸다. 이와 같은 자계표식의 위치와 자계의 관계는 2.1절의 자기쌍극자 모델식 (3)을 이용하여 구할 수 있다. 또한 자계표식을 일정 간격으로 배치하고 자계센서를 자계표식의 위를 지나도록 이동시키면서 자계표식으로부터 발생하는 수직성분자계를 측정하면 동일한 결과를 획득할 수 있다. 그림 4와 같이 자계표식의 위치와 자계는 비선형적인 관계를 나타내며, 측정된 수직성분자계는 센서가 자계표식의 바로 위를 지날 때 가장 큰 변화를 나타낸다. 그림 4에서 센서가 자계표식을 지나치기 전과 후의 자계의 변화에는 직선에 가까운 선형적인 동작영역이 존재함을 확인할 수 있다. 이 선형동작영역에서는 자계표식의 위치와 자계간의 일정한 관계 데이터를 획득할 수 있다.

2.2절에서 지구자계의 수직성분자계가 센서의 방향과 무관하게 일정한 값을 유지함을 확인하였다. 그러나 차량이나 로봇이 동작하는 실제 환경에서 지구자계의 수직성분자계는 이동경로의 지질적 특성이나 환경에 따라 약간의 변화를 나타낸다. 그림 5와 같이 목포대학교와 목포시내 사이를 1[Km]

간격으로 이동하면서 지구자계의 수직성분자계를 측정하여 보았다. 결과 표 1과같이 지구자계의 수직성분자계가 위치(장소)에 따라 다르게 나타남을 확인하였다. 따라서 정밀한 위치인식을 위해서는 지구자계의 영향이 제거되어야 한다.

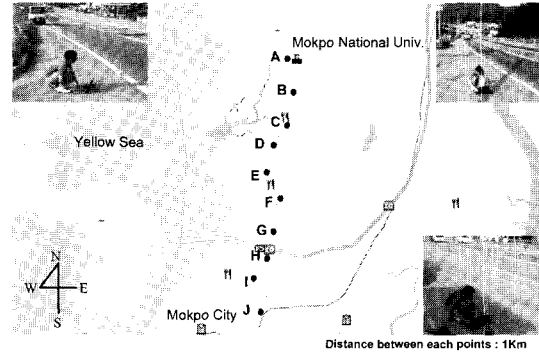


그림 5. 수직성분자계와 위치(지구자계).
Fig. 5. Vertical field and locations(Earth field).

표 1. 수직성분자계의 변화(지구자계).

Table 1. Variation of vertical component field (magnetic field of the Earth).

Sampling point	Magnetic field[mG]	Sampling point	Magnetic field[mG]
A	-325	F	-327
B	-313	G	-335
C	-342	H	-304
D	-340	I	-318
E	-284	J	-318

3.2 자계센서 열

그림 4에서 수직성분자계의 선형동작영역은 자계표식의 좌우에 대칭으로 존재한다. 따라서 한 개의 센서만을 사용하여 측정된 수직성분자계로는 대칭적인 두 선형동작영역을 구분할 수 없다. 자계센서 열을 이용하면 두 대칭영역을 판별할 수 있다.

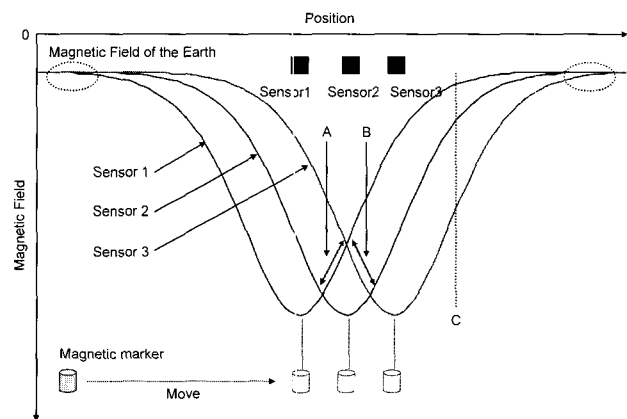


그림 6. 자계센서 열의 출력과 자계표식의 위치.
Fig. 6. Output of the magnetic field sensors array and position of the magnetic marker.

일정한 간격으로 센서를 배치시켜 자계센서 열을 구성하면 각 센서는 서로 다른 구간에서 자계를 측정하게 된다. 자계센서 열을 따라 자계표식을 이동시키면서 측정된 자계의 변화는 그림 6과 같이 나타난다. 그림 6에서 *Sensor2*를 기준으로 보면 좌우측의 *Sensor1*과 *Sensor3*의 선형동작영역 *A*, *B*를 구분할 수 있다. *Sensor2*가 최소값을 나타낼 때 *Sensor1*이 *Sensor3*보다 작으면 *A*가 되고, *Sensor3*이 *Sensor1*보다 작으면 *B*가 된다. *Sensor2*가 기준이 될 때 *A*, *B*는 위치검출을 위해 유용한 선형동작영역으로 사용된다. 이처럼 자계센서 열을 이용하면 간편하게 대칭된 수직성분자계의 두 선형동작영역을 구분할 수 있다.

자계센서에 의해 측정되는 자계는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 측정된 자계는 자계표식의 자계와 지구자계 및 주변 환경에 의한 자계까지 포함하고 있다.

$$B_{measured} = B_{marker} + B_{earth} + B_{ambient} \quad (4)$$

그림 6의 각 센서 *Sensor1*, *Sensor2*, *Sensor3*에 의해 측정된 자계는 아래 식 (5), (6), (7)과 같다.

$$B_{measured}^{sensor1} = B_{marker}^{sensor1} + B_{earth}^{sensor1} + B_{ambient}^{sensor1} \quad (5)$$

$$B_{measured}^{sensor2} = B_{marker}^{sensor2} + B_{earth}^{sensor2} + B_{ambient}^{sensor2} \quad (6)$$

$$B_{measured}^{sensor3} = B_{marker}^{sensor3} + B_{earth}^{sensor3} + B_{ambient}^{sensor3} \quad (7)$$

이때 가장 큰 센서의 자계를 그 외의 센서의 값에서 감하게 되면 자석의 자계만 남게 된다. 그림 6의 *C*지점을 예로 들면 식 (8), (9)와 같이 나타난다.

$$B_{measured}^{sensor2} - B_{measured}^{sensor1} = B_{marker}^{sensor2} - B_{marker}^{sensor1} \quad (8)$$

$$B_{measured}^{sensor3} - B_{measured}^{sensor1} = B_{marker}^{sensor3} - B_{marker}^{sensor1} \quad (9)$$

결과 지구자계 뿐만 아니라 주변 환경에 의한 자계까지 제거되었다. 위와 같은 방법을 사용하면 왜란자계의 영향을 실시간으로 제거할 수 있다.

3.3 위치결정방법

본 논문에서는 자계표식의 위치를 결정하기 위하여 아래 식 (10)과 같은 수직성분자계의 선형동작영역의 직선방정식을 사용하였다.

$$y = mx + b \quad (10)$$

식 (10)에서 *y*는 3.2절에서 자계센서 열을 이용하여 판별된 유용한 선형동작영역의 자계이고, *x*는 자계표식의 위치 데이터, *m*은 선형동작영역의 직선의 기울기, 그리고 *b*는 위치 데이터에 대한 상수이다. 먼저 실험을 통해 획득된 왜란자계가 제거된 자계와 자계표식의 위치 데이터를 사용하여 직선방정식의 *m*과 *b*를 구한다. *m*과 *b*를 구하면 측정된 자계로부터 자계표식의 위치를 계산할 수 있다. 상기의 선형동작영역의 직선방정식을 이용한 위치결정방법은 *m*과 *b*만 저장하면 되기 때문에 실제 시스템에서 메모리의 소비율을 감소시킬 수 있다.

4. 실험 및 결과 고찰

4.1 실험환경 구성

그림 7과 같이 제안된 자계위치인식시스템을 구성하였다. 실험에 사용된 자계센서 열은 5개의 수직성분 자계센서를 4[cm] 간격으로 배치하였으며, 자계표식을 자계센서 열을 따라 이동시키면서 실험을 수행하였다. 자계센서 열의 각 센서에 의해 측정된 자계 데이터를 이용하여 선형동작영역의 직선방정식을 구하여 마이크로컨트롤러를 사용한 위치인식 알고리즘에 적용하였다. 또한 제안된 시스템의 높이 변화에 따른 위치 인식율을 실험하기 위해 높이를 가변 할 수 있는 장치를 구성하였다.

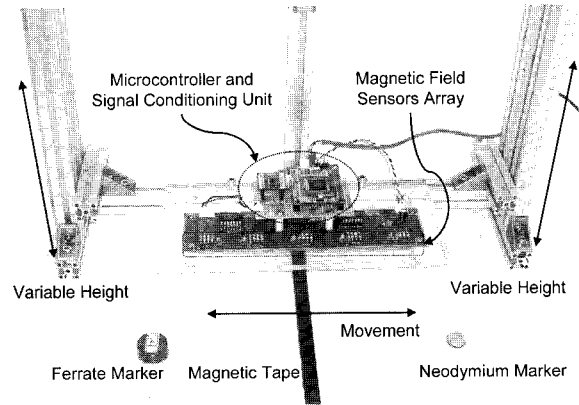


그림 7. 제안하는 자계위치인식시스템.

Fig. 7. Proposed magnetic position sensing system.

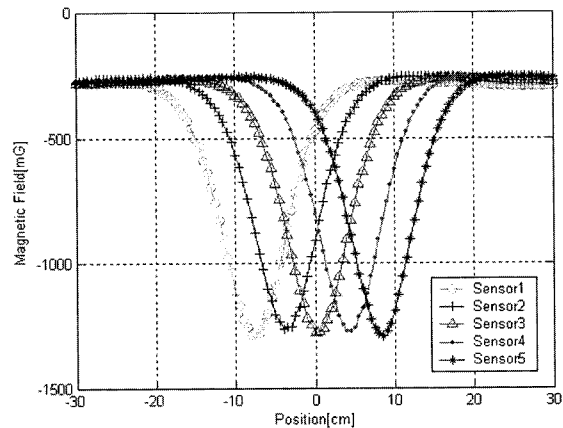


그림 8. 자계센서 열의 출력.

Fig. 8. Output of the magnetic field sensors array.

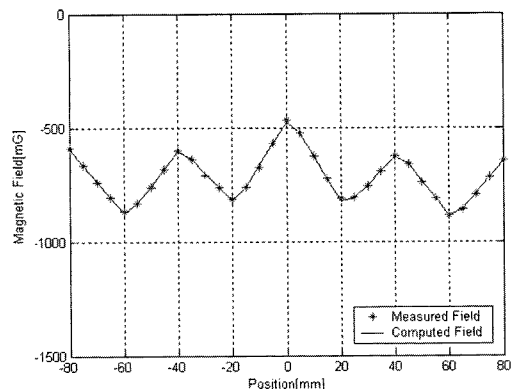


그림 9. 측정된 자계와 계산된 자계.

Fig. 9. Measured field and computed field.

그림 8은 자계센서 열의 중심으로부터 좌측 30[cm] 지점에서 우측 30[cm] 지점까지 자계표식을 이동시키면서 측정된 각 센서의 출력을 나타낸다. 자계표식이 각 센서의 바로 아래를 지날 때 각 센서의 출력은 최소값(Peak)을 나타낸다. 계측된 기본 자계에서 왜란자계의 영향을 제거하여 각 센서 출력의 선형동작영역의 직선방정식을 구하였다. 계산된 직선방정식을 위치인식알고리즘에 적용하여 자계센서 열을 따라 이동하는 자계표식의 계측된 자계와 위치인식알고리즘에 의하여 계산된 자계의 값을 비교한 결과 그림 9와 같이 일치함을 확인하였다.

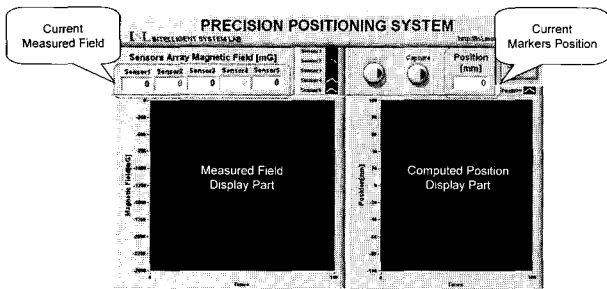


그림 10. 제안된 시스템의 모니터링 프로그램.
Fig. 10. Monitoring program of the proposed system.

제안된 자계위치인식시스템의 실험 및 분석을 위해 그림 10과 같이 GUI 프로그램을 개발하였다. 모니터링 프로그램은 좌측 판넬에 현재 자계센서 열에 의해 계측되는 자계를 나타내고, 우측 판넬에는 위치인식알고리즘에 의해 계산된 자계표식의 위치 데이터를 보여준다.

4.2 실험결과 및 고찰

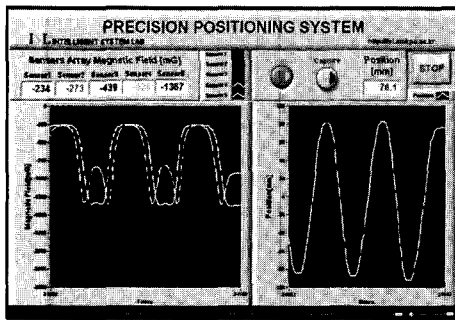


그림 11. 자계표식 위치인식 화면.
Fig. 11. Screen shot of magnetic markers positioning.

자계표식을 자계센서 열을 따라 좌우로 반복하여 이동시키는 실험을 수행한 결과 그림 11과 같이 제안하는 자계위치인식시스템은 선형적인 출력 특성을 보였다.

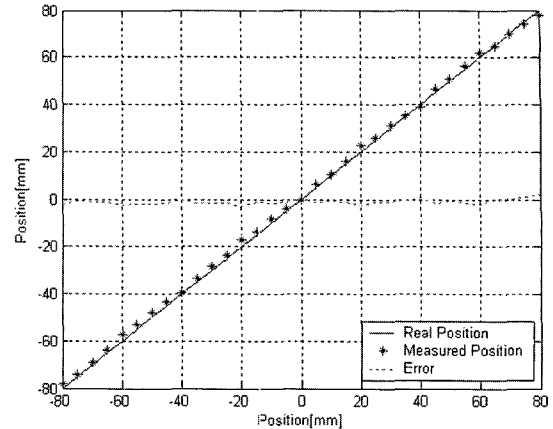


그림 12. 실제 위치와 계측된 위치.
Fig. 12. Real position and measured position.

그림 12는 자계표식의 실제 위치데이터와 제안된 시스템에 의해 계측된 위치데이터의 비교 결과를 보여준다. 결과 제안된 시스템은 최대 2.5[mm], 평균 1.4[mm]의 위치인식 오차를 나타내었다.

그러나 제안된 시스템은 차량과 로봇에 적용되기 때문에 차량이나 로봇의 진동(출렁임) 또는 이동경로의 불규칙한 표면으로 인하여 센서의 높이가 가변될 수 있다. 센서의 높이가 변화하면 적용되는 자계 또한 변화한다. 자계의 변화는 선형동작영역의 직선방정식을 변화시켜 정밀한 위치인식을 불가능하게 한다. 따라서 본 논문에서는 높이를 변화시키면서 -700[mG]부터 -2300[mG]까지 자계를 계측하여 각각 선형동작영역의 직선방정식을 구하여 위치인식알고리즘에 적용하였다. 그림 13-16은 높이가 가변되는 상황에서 계측되는 자계 데이터, 자계표식의 실제위치와 계측된 위치 데이터의 비교 결과를 나타낸다. 센서의 높이가 변화함에 따라 그림 13과 15와 같이 적용되는 자계는 변화하지만 그림 14와 16과 같이 정밀한 위치인식을 수행함을 확인할 수 있다. 결과 제안하는 시스템은 높이가 가변되는 상황에서 최대 5.6[mm], 평균 1.5[mm] 오차의 정확성을 보였다. 따라서 제안하는 시스템은 자율주행 차량과 로봇의 안내를 위한 자계위치인식시스템으로 사용 가능하다.

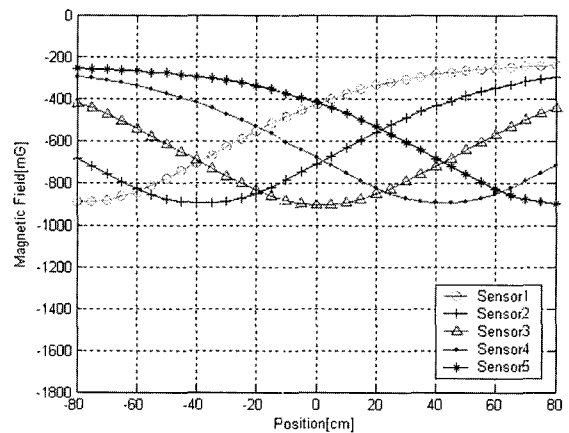


그림 13. 높이가 가변되는 경우에서 계측된 자계(1).
Fig. 13. Measured field in height variation(1).

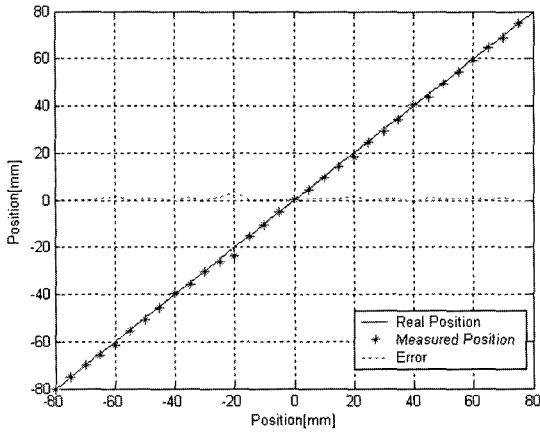


그림 14. 높이가 가변되는 경우에서 위치인식(1).
Fig. 14. Position sensing in height variation(1).

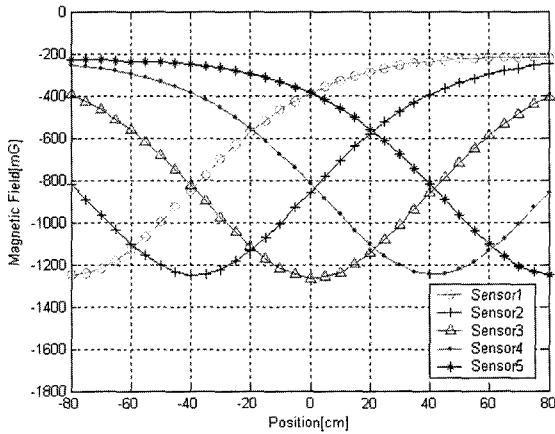


그림 15. 높이가 가변되는 경우에서 측정된 자계(2).
Fig. 15. Measured field in height variation(2).

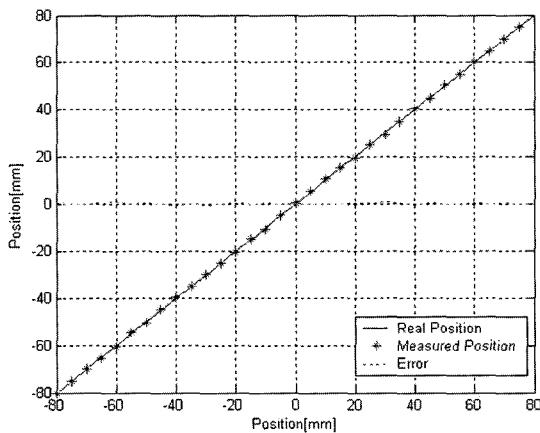


그림 16. 높이가 가변되는 경우에서 위치인식(2).
Fig. 16. Position sensing in height variation(2).

5. 결 론

본 논문에서는 자율주행 차량과 로봇의 안내를 위한 새로운 자계위치인식방법에 관하여 논하였다. 자계센서 열을 구

성하여 왜란자계의 영향을 제거하였으며, 수직성분자계의 선형동작영역과 마이크로컨트롤러를 사용한 위치인식알고리즘을 통하여 자계표식의 위치를 정밀하게 검출하였다. 실험결과 제한하는 시스템은 고정된 센서의 높이에서 평균 1.4[mm], 높이가 가변되는 상황에서 평균 1.5[mm]의 위치인식 오차를 보였으며, 자계기반 자율주행 차량과 로봇의 위치인식시스템으로 사용 가능성이 검증되었다.

참 고 문 헌

- [1] John J. Leonard and Hugh F. Durrant-Whyte, "Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation," Kluwer Academic Publishers, USA, 1992.
- [2] 유영재, "상대분할 신경회로망을 이용한 자율주행 전기자동차의 도로영상기반제어," 전남대학교 박사학위논문, 전남, 1998.
- [3] Dirk de Bruin, "Lateral Guidance of All-Wheel Steered Multiple-Articulated Vehicles," Unpublished doctoral dissertation, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2001.
- [4] Michael J. Caruso, Tamara Bratland, C. H. Smith and Rober Schneider, "A New Perspective on Magnetic Field Sensing," *Sensor Magazine*, Vol. 15, No. 12, pp. 34-46, 1998.
- [5] Ching-Yao Chan, "A System Review of Magnetic Sensing System for Ground Vehicle Control and Guidance," *California PATH Research Report*, UCB-ITS-PRR-2002-20, 2002.
- [6] David S. Nyce, "Linear Position Sensors: Theory and Application," Wiley-Interscience, USA, 2004.
- [7] Partners for Advanced Transit and Highways (PATH), URL: <http://www.path.berkeley.edu/>
- [8] Advanced Public Transport Systems bv(APTS), URL: <http://www.apt-phileas.com/>
- [9] National Geomagnetic Information Center, URL: <http://geomag.usgs.gov/>

저 자 소개

정영운(Jung, Young-Yoon)
제16권 제5호 (2006년 10월호) 참조.

김근모(Kim, Geun-Mo)
현재 목포대학교 대학원 제어시스템공학과 석사과정.
관심분야 : 자율주행 및 지능제어시스템, 임베디드 시스템.
Phone : 061-450-2759
Fax : 061-450-6471
E-mail : gmkim@mokpo.ac.kr

유영재(Ryoo, Young-Jae)
제16권 제5호 (2006년 10월호) 참조.