

자기센서를 이용한 위치추정 정밀도 향상 방안에 관한 연구

A Study on the Method for Improving the Localization Accuracy using the Magnetic Sensors

김정태^{1,✉}, 김무선¹, 홍재성¹
Jungtai Kim^{1,✉}, Moo Sun Kim¹, and Jae Sung Hong¹

¹ 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부 (Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute)
✉ Corresponding author: jtkim@krrri.re.kr, Tel: +82-31-460-5722

Manuscript received: 2013.11.12 / Revised: 2013.12.13 / Accepted: 2014.1.6

Magnetic Sensors can be employed to localize the unmanned vehicle which is running a pre-defined path where magnets are embedded for certain spaces. Among various sensor types, sensor arrays of 1-dimensional magnetic sensor have the merit of easy elimination of external magnetic component such as terrestrial magnetism. However, interpolation should be considered in the array sensors in order to increase the precision level because there is a limit in arranging sensors in close interval. We propose the novel interpolation method which can be performed with simple computation and represents the improved accuracy by increasing the linearity of the interaction formula. Demonstration of the linearity and simulation results show the proposed method exhibits the improved accuracy compared to the conventional method.

Key Words: Magnetic Sensor (자기 센서), Interpolation (보간), Unmanned Vehicle (무인 자동차), Localization (위치검지), Monopulse (모노펄스)

기호설명

B_x : magnetic flux density in x direction
 O_x : offset in the magnetic flux density in x direction
 N_x : noise in the magnetic flux density in x direction
 K_m : the magnetic coefficient
 R : the monopulse ratio

1. 서론

무인운전을 위해서는 먼저 대상의 정확한 위치를 알아내야 한다. 이를 위한 여러 가지 방법¹⁻³ 중 도로에 일정한 간격으로 자석을 매설하고 이를 검지하여 위치를 추정하는 방법은 구현이 비교적 쉽고 비용 또한 저렴하여 널리 연구되어 왔다.⁴ 이

방법에서는 매설된 자석의 위치를 검지하기 위해 자기센서를 사용하는데 3축 자기센서를 1개 사용하는 방법⁴과 1축 자기센서 배열을 사용하여 상대적인 자기력 크기 비교를 통해 추정하는 방법⁵이 있다. 3축 센서를 사용하는 방법은 매설된 자석에서 발생하는 세 방향의 자력의 크기를 측정하여 위치를 추정하게 되는데 자석에서 발생하는 자력 뿐만 아니라 지자기 등 외부 자력도 같이 측정되므로 이의 영향을 받게 된다. 이를 제거하기 위해 각 자석이 매설된 위치의 기준 자력을 데이터베이스화 하여 관리하는 방법을 사용하기도 한다. 배열 센서를 사용하는 방법은 동시에 많은 데이터를 처리해야 하지만 각 센서에 공통적으로 부가되는 지자기 등의 영향을 쉽게 제거할 수 있다. 또한, 프로세서 성능의 발달로 배열 센서를 사용하는 방

법을 쉽게 구현할 수 있게 되었다.⁶

배열 센서를 사용하는 방법에서는 센서 간 간격이 중요하다. 간격이 좁을수록 정밀한 위치 추정이 가능하지만 제작 비용이 많이 들고 처리할 데이터의 양이 늘어난다. 또한, 자기 센서 자체의 크기로 인해 일정 크기 이하로 간격을 줄이는 것이 어렵다. 따라서, 센서 간격 이하로 위치 추정 정밀도를 확보하기 위해 데이터를 보간하여 추정하는 다양한 방법이 제안되었다.⁷⁻⁹ 이러한 방법 중 거리에 따라 자기력이 비교적 선형으로 분포하는 구간을 이용하여 보간하는 방법¹⁰이 있는데 이는 2개의 센서 데이터만을 사용하는 방법이다. 이 방법은 비교적 간단한 수식으로 센서와 센서 사이의 자석 위치를 추정할 수 있다는 장점이 있으나 선형 구간에 맞춰서 자기 센서의 간격을 조정해야 하는 제한이 있다.

본 연구에서는 인접 센서들간 자기력 측정치의 관계를 이용하여 선형성이 증가된 관계식을 도출하고 이를 이용하여 센서 사이에 있는 자석의 위치 추정 정확도를 높이는 방안에 대하여 제안한다. 이 관계식은 일정 크기 이하의 센서 간격에서는 센서의 간격에 관계없이 높은 선형성을 제공하므로 자유도를 갖고 센서 간격을 설정할 수 있으며 따라서, 고정밀의 위치 추정이 필요한 대상에 더욱 적합하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 기존 연구에 대하여 기술하고 3장에서는 제안하는 방식에 대하여 설명한 후 시뮬레이션 결과를 4장에 보인다. 이를 통해 선형성의 증가가 추정의 정확도를 향상시킴을 보임으로써 제안하는 방식의 우수성을 확인한다.

2. 기존 연구

2.1 자력분포곡선

먼저 Fig. 1에 자석과 배열형 자력센서를 이용한 무인운전 시스템의 예를 나타내었다. 매설된 자석에서 발생하는 자력은 \vec{x} , \vec{y} , \vec{z} 의 세 방향에서 측정할 수 있으며 그 좌표축은 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 일반적으로 \vec{x} 는 차량의 진행방향, \vec{y} 는 차량의 옆 방향, \vec{z} 는 지면과 수직인 방향을 나타낸다. 자석의 위치로부터 센서까지의 각 방향의 거리를 x , y , z 라 할 때 센서가 있는 지점의 세 방향의 자기장 벡터크기는 다음과 같다.¹⁰

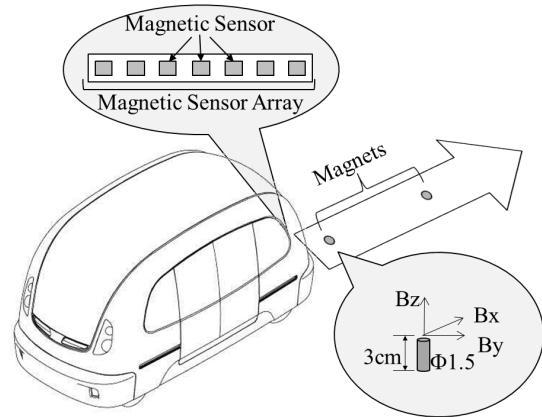


Fig. 1 Typical example of unmanned driving system using magnets and magnetic sensor array

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

$$B_y = \frac{3K_m yz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} + O_y + N_y \quad (2)$$

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

여기서, K_m 은 마그네틱 상수로서 자석의 자력의 크기와 극성에 비례하는 값이다. O_x 는 지자기 등 외부 영향에 의해 가해지는 자기력이며 N_x 는 노이즈 등에 의해 임의로 부가되는 값이다. *는 각각 x , y , z 방향을 의미한다.

Fig. 2(a)와 (b)에 이상적인 상황에서($O_x=0$, $N_x=0$) y 의 변화에 따른 B_x 와 B_z 를 각각 나타내었다(N 극 자석, $K_m=0.005$, $z=15cm$). 식 (2)는 식 (1)과 해당 변수(x, y)만 다르고 형태는 같음을 알 수 있다. 따라서, B_y 도 Fig. 2(a)에 보인 그림과 같은 형태로 나타난다. Fig. 2의 두 그림을 비교해 보면 B_x , B_y 의 분포(Fig. 1(a))보다 B_z 의 분포(Fig. 1(b))가 peak가 더 크음을 알 수 있다. 배열 센서를 사용하면 peak가 비교적 큰 z 방향 자기력을 여러 지점에서 측정하여 자석의 위치를 검출할 수 있다.

2.2 중간값 검출 방법 및 선형성 이용 방법

배열 센서를 사용한 방법에서 해상도는 센서 간 간격과 밀접한 연관이 있다. 센서를 추가하여 센서 간 간격을 좁히는 것은 물리적, 비용적 제한이 있으므로 중간값을 검출하여 해상도를 2배로

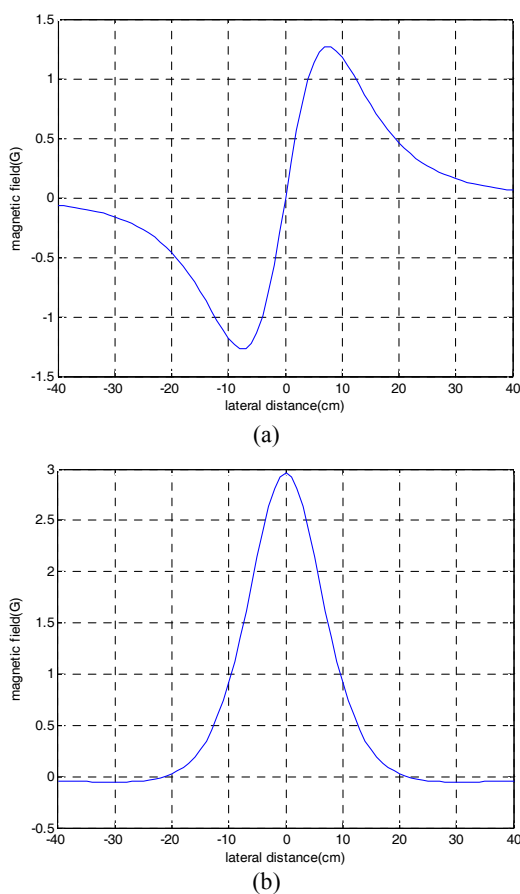


Fig. 2 (a) Magnetic flux density according to the distance in x direction (b) Magnetic flux density according to the distance in z direction

높이는 방법이 제안되었다.⁵ 이 방법에서는 자석에 인접한 센서 2개의 출력을 비교하여 센서 중간에 있는 자석의 위치도 검지할 수 있다. Fig. 1의 시스템에서 배열 센서 중 자석에 인접한 세 개의 센서를 선정 후 자석의 위치가 변화함에 따라 각 센서에서 획득한 자기력을 나타내면 Fig. 3과 같다. 먼저, 자석이 센서 2의 아래에 있다고 가정하면 해당 센서의 출력이 최대치를 나타내므로 쉽게 이를 검지하고 위치를 추정할 수 있다. 다음으로, 자석이 두 센서의 중간에 있을 경우에는 두 출력이 유사한 값을 갖게 된다. 이를 이용하여 센서 간격의 1/2까지 해상도를 높이는 방법이 중간값 검출 방법이다.⁵

이를 더욱 발전시킨 방법이 자력 분포 곡선의 선형성을 이용하는 방법이다.¹⁰ Fig. 3에서 빨간색

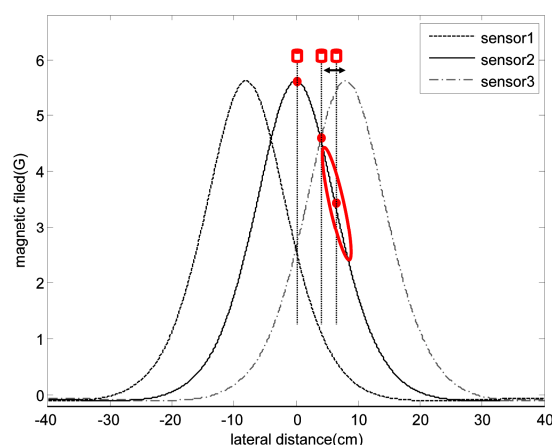


Fig. 3 Location of a magnet and each sensor output of one dimensional (z direction) magnetic sensor array

타원으로 표시한 부분으로 보인 바와 같이 자석이 센서로부터 떨어진 거리와 자기력 출력의 비가 선형인 구간이 있다. 이 구간을 이용하면 두 번째로 큰 센서 출력값과 선형인 자력/거리 비를 이용하여 센서 사이에 있는 자석의 위치를 추정할 수 있다. 다만, 이 방법을 이용하기 위해서는 센서 간격이 이 구간을 이용할 수 있도록 설정되어 있어야 한다. 즉 센서 간격이 너무 좁거나 넓어지면 안되며, 이 경우 비선형 구간에서 위치를 추정하게 되므로 위치 추정 오차가 증가하게 된다. Fig. 3의 경우 적절한 센서 간격은 5~10cm 이다.

3. 제안 방안

3.1 모노펄스 기법

센서 간격에 관계없이 높은 선형성을 가진 관계식을 유도할 수 있다면 센서 설계, 제작에 대한 제한을 완화시킬 수 있고 높은 수준의 정밀도를 얻을 수 있다. 이러한 관계식을 유도하기 위해 레이더에서 사용하는 기술인 모노펄스 기법을 적용하였다. 레이더에서는 한정된 빔의 수를 사용하여 표적의 각도를 추정할 때 이를 보간하기 위해 모노펄스 기법을 사용하는데 이에 대한 간략한 설명은 다음과 같다.

모노펄스는 두 개의 펄스(빔)의 합과 차를 이용하여 하나의 정밀한 펄스처럼 각도를 추정하는 방법이며^{11,12} 그 개념을 Fig. 4에 나타내었다. 즉, Fig. 5와 같이 표적의 주위에 있는 두 펄스의 합과 차를 구하고 합에 대한 차의 비율을 구하면 두 펄

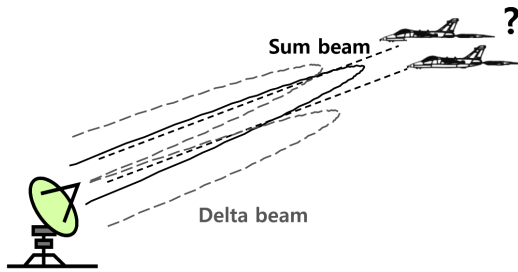


Fig. 4 Concept of monopulse in radar system

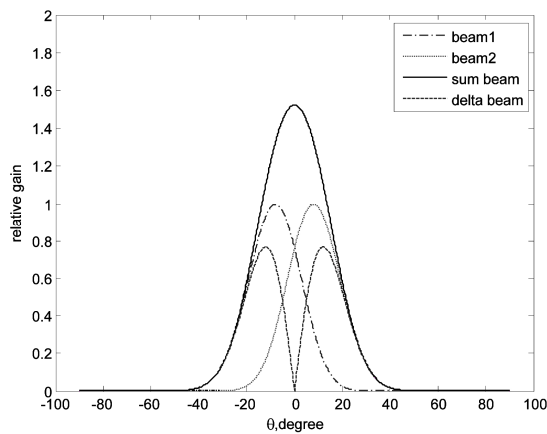


Fig. 5 Synthesis of two monopulse beams (sum beam and delta beam) from the adjacent two beams

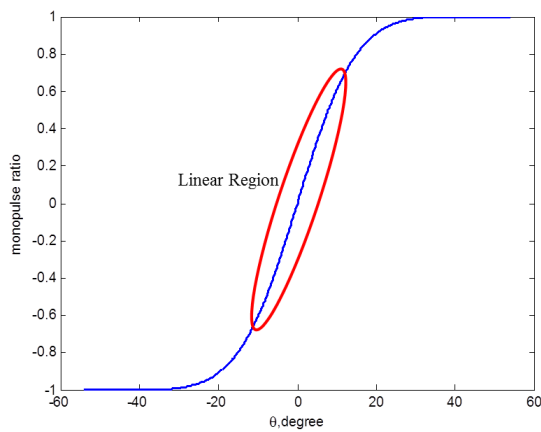


Fig. 6 Linear region in the monopulse ratio

스 사이에 있는 표적의 각도와 그 비율은 특정 지점에서 선형의 형태를 나타낸다(Fig. 6). 따라서, 선형 방정식의 계수가 주어진다면 측정된 모노펄스 비율을 가지고 표적의 각도를 비교적 정밀하게 얻

을 수 있다. 실제로는 시뮬레이션과 실험을 통하여 비율을 미리 구해놓은 후 측정된 각 빔 별 데이터를 이용하여 얻은 모노펄스 비율을 대입함으로써 표적의 각도를 추정한다.

3.2 모노펄스를 이용한 자기센서 보간

식 (3)과 Fig. 3에 보인 바와 같이 z방향의 자기력 분포는 자석의 바로 위에서 극값을 가지는 종형 모양을 나타낸다. 따라서 Fig. 5의 빔의 형상과 같이 모노펄스를 이용할 수 있다. 영점을 기준으로 y방향으로 좌우로 d/2만큼 떨어진 두 센서에서 측정되는 z방향 자력의 값과 모노펄스 비율 R은 다음과 같다. 자력 방향의 정의는 Fig. 1에 보인 바와 같다. 이 때, 자력 측정 시 외부 자기력에 의한 성분은 제거된 것으로 가정하였다. (외부 자력 제거에 관한 방안은^{4,13} 등에서 제안하였다.)

$$B_{z1} = \frac{K_m(2z^2 - x^2 - (y + d/2)^2)}{(x^2 + (y + d/2)^2 + z^2)^{5/2}} + N_z \quad (4)$$

$$B_{z2} = \frac{K_m(2z^2 - x^2 - (y - d/2)^2)}{(x^2 + (y - d/2)^2 + z^2)^{5/2}} + N_z \quad (5)$$

$$R = \frac{B_{z1} - B_{z2}}{B_{z1} + B_{z2}} \quad (6)$$

R에는 다항식의 유리수 제곱항이 있으므로 선형성 여부는 수식에서 바로 알기 어렵다. 그러므로, 먼저 그래프를 그림으로써 선형성을 직관적으로 판단해 보도록 한다. Fig. 7에 다양한 센서 간격에 대하여 기존 방안인 선형성 이용 방법과 제안하는 방안인 모노펄스 기법의 선형성 그래프를 나타내었다. 여기서 센서 간격에 대한 항목은 Kim⁵과 Peteri⁶ 및 한국철도기술연구원에서 개발 중인 PRT(Personal Rapid Transit) 시스템에서의 센서 간격을 참고로 하였다. 이 때, 지면에서 센서의 높이는 15cm를 기준으로 하였고 x는 2cm로 가정하였다. Fig. 7에서 가로 축은 배열 센서 중 두 번째로 큰 자력 측정치를 나타내는 센서와 자석 사이의 거리이며 실선은 각각 기존 방법과 제안하는 방법으로 구한 자석 위치 추정용 기준값이다. 두 방법의 비교를 위해 각각 정규화하여 표시하였다. 점선은 자석 위치 추정을 위한 선형 방정식을 표시한 것이다. 점선과 실선이 일치할수록 선형성이 크며 추정오차가 작아진다. 제안하는 방법이 전반적으로 선형성이 개선되었으며 특히

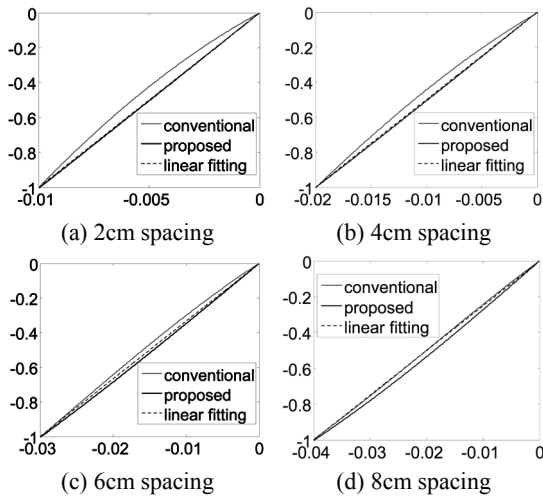


Fig. 7 Linearity of the conventional and proposed method with various sensor spacing

Table 1 Comparison of linearity (correlation coefficient) for the conventional and proposed method

Sensor Spacing	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm
Conventional	0.9968	0.9981	0.9994	1.0000
Proposed	1.0000	1.0000	0.9999	0.9994

고정밀 추정을 위해 센서 간격을 좁혔을 때 그 효과가 크음을 알 수 있다.

Table 1은 선형성을 정확히 알아보기 위해 각 센서 간격 별로 선형 회귀분석을 통해 획득한 상관지수를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 확인한 바와 마찬가지로 전반적으로 그리고 특히 좁은 센서 간격에서 선형성이 개선되었음을 알 수 있다.

차량이 고속으로 이동하고 센서의 샘플링 주기가 충분히 작지 않은 경우 x 가 비교적 클 때 자력의 peak가 검출될 수 있다. 이 때에는 Fig. 8과 같이 자력 분포곡선이 낮은 peak를 나타내게 되며 따라서 선형성 및 모노펄스 비율 또한 차이가 발생하게 된다. Table 2는 x 가 10cm로 증가하였을 경우 선형 회귀분석을 통해 두 방법의 선형성을 비교한 것이다. 기존의 자력 분포 곡선 자체의 선형성을 이용한 방법보다 제안하는 방법인 모노펄스 기법을 이용한 방법이 x 방향의 거리가 증가한 상태에서도 높은 선형성이 유지됨을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 실제 x, y 방향 위치를 추정하는 데 있어서도 높은 정확도를 얻는데 기여한다. 이에 대해서는 다음 절의 시뮬레이션을 통하여 확인한다.

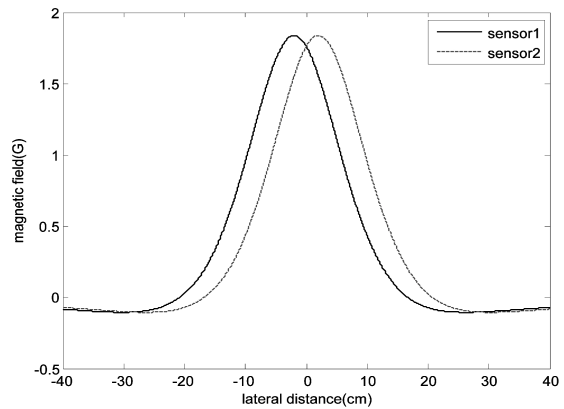


Fig. 8 Decreased peak of both sensor output when the offset in x direction is increased (sensor spacing: 4cm, x : 10cm)

Table 2 Comparison of linearity (correlation coefficient) when the offset in x direction is increased to be 10 cm

Sensor Spacing	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm
Conventional	0.9966	0.9977	0.9989	0.9998
Proposed	1.0000	1.0000	1.0000	0.9996

Table 3 Simulation Parameters for the vehicle and the magnetic sensor array

Simulation Parameters	Value (or Range)
Vehicle Speed	60km/h
Vehicle Heading	0~30°
Number of Sensor Arrays	60
Sensor Spacing	2, 4, 6, 8cm
Initial Sensor Location (x, y)	(-50cm, 0cm)
Sampling Rate	1KHz
Sampling Period	20ms
Noise Level (SNR)	25dB
Magnet Location	(0cm, 0cm)
Magnet Polarity	North(+)
Sensor Height	15cm

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 환경

시뮬레이션을 통해 개선된 선형성이 실제 자석 위치를 추정할 때 정확성을 향상시킴을 보이도록 한다. 자기 센서가 부착된 차량이 자석 위를 지나가는 가상의 환경을 가정하고 이 때 획득한 센서

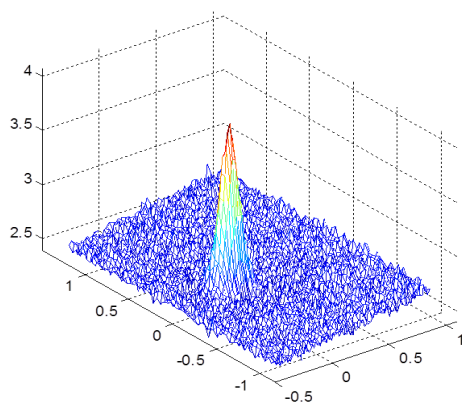


Fig. 9 Typical measurement output of sensor arrays obtained while a vehicle is proceeding

Table 4 Comparison of the estimation error for the conventional and proposed method

Sensor Spacing	2cm	4cm	6cm	8cm
Conventional	0.0110	0.0122	0.0172	0.0256
Proposed	0.0107	0.0088	0.0087	0.0094

데이터를 사용하여 기존 방법과 제안하는 방법으로 각각 자석의 위치를 추정하여 비교한다. Table 3은 본 시뮬레이션에서 가정한 차량 및 자기 센서의 주요 변수를 표시한 것이다.

케이스 별로 20,000회 monte-carlo 방식으로 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 9는 차량이 진행하면서 획득한 배열 센서의 측정 결과를 3차원 그래프로 표시한 것이다. 여기서 x, y축은 거리를 나타내며(단위: m) z축은 자력의 크기이다(단위: G). Peak 근처의 두 센서의 자력 측정값을 사용하여 기존의 방법과 제안하는 방법을 통해 자석의 위치를 추정하였다.

4.2 시뮬레이션 결과

센서 간격을 변경해가면서 자석의 위치를 추정하였을 때 오차를 Table 4에 나타내었다. 자석 추정 위치 오차를 평균한 값이며 단위는 cm이다. 앞 절의 선형성 분석 결과와 비슷한 결과를 얻을 수 있는데, 특히 기존 선형성 이용 방법은 x의 크기가 커지면 peak가 낮아지면서 선형성이 작아지는데 비하여 제안하는 방법은 낮은 peak에서도 선형성이 유지되므로 전반적인 위치 추정 오차가 작게 나타났다. 따라서, 실제 환경에서도 자석 위치 추정 정확도를 높일 수 있다.

5. 결론

자율 주행 차량에서 절대 위치정보를 획득하기 위해 자석을 사용하는 방법에서 배열 센서의 정확성을 높이기 위해 센서 간 관계를 이용하여 보간하는 방법에 대하여 제안하였다. 자석에서 발생하는 자기력은 측정 위치에 따라 비선형적인 곡선을 나타내지만 두 센서 출력의 합과 차의 비를 이용하면 위치에 따라 선형의 값을 나타내므로 적은 계산량으로 보간이 가능하다. 선형성 분석과 시뮬레이션을 통해 제안하는 방법이 일정 센서 간격 이하에서 높은 선형성을 보이며 이 선형성이 자력의 크기 변화에도 유지됨을 확인하였다. 따라서, 제안하는 방법을 통하여 위치 추정 시 적은 위치 추정 오차를 나타냄을 확인할 수 있다.

승객 편의 등을 위하여 정위치 정차 등 고정밀 위치 추정 기술이 요구된다는 점과 부품기술의 발달로 고밀도의 배열 센서 구성 및 처리를 비교적 저렴하게 구현할 수 있다는 점을 고려하면 본 연구에서 제안하는 방법의 적용성과 효과는 더욱 높 다 할 수 있다.

참고문헌

1. Song, M. G. and Park, Y., "Multi-sensor Data Fusion Methods Based on the Kalman Filter for Attitude and Vibration Control of the Biped Robot," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 25, No. 4, pp. 39-46, 2008.
2. Lee, S., Lim, J., and Cho, D., "A Complete Feature Map Building Method of Sonar Sensors for Mobile Robots," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 27, No. 1, pp. 64-75, 2010.
3. Jeong, J., Kim, Y., and Jung, D., "A Study of the Tracking Control of an Transfer Crane using Nonholonomic Constraint," Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 14, No. 10, pp. 1775-1782, 2013.
4. Chan, C., "A System Review of Magnetic Sensing System for Ground Vehicle Control and Guidance," PATH Research Reports, UC Berkeley, pp. 1-10, 2002.
5. Kim, J., Joo, C., and Ryoo, Y., "Performance Improvement of Magnetic Position Sensor for Unmanned Autonomous Vehicle Based on Magnetic Field," Proc. of KIIS Spring Conference, Vol. 18, No. 1, pp. 163-167, 2008.

6. Peteri, P. H. F. and Siebert, Ralf., "Vehicle and Method for Steering Thereof," US Patent, No. 7451027 B2, Frog Navigation Systems, 2008.
7. Kwon, J. H., "Analysis of Bearing Estimation Error of the Beamformer," M.Sc. Thesis, Department of Electronics Graduate school, Kyungpook National Univ., 1997.
8. Jung, S. K., "An Efficient Super Resolution method for Time-series Remotely sensed data," M.Sc. Thesis, Department of Geoinformatics, University of Seoul, 2010.
9. Kim, J., Choi, J., Ryu. S., Kim, D., and Sohn, K., "The New Fusion Interpolation for High Resolution Depth Image," Proc. of Korean Soc. Broadcast Eng., 2012.
10. Jung, Y., Kim, G., and Ryoo, Y., "Magnetic Position Sensing System for Autonomous Vehicle and Robot Guidance," J. Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 17, No. 2, pp. 214-219, 2007.
11. Sherman, S. M., "Monopulse Principles and Techniques," Artech House INC., pp. 23-45, 1984.
12. Greco, M. S., "Monopulse Rader System," <http://www.iet.unipi.it/m.greco/research/res3.html> (Accessed 13 JAN. 2013)
13. Choi, P., Park, S., Ryoo, Y., and Chang, Y., "Calibration and Cancellation of Earth Field for Magnetic Position Sensor," Proc. of KIIS Spring Conference, Vol. 21, No. 1, pp. 117-118, 2011.