

AMR 센서를 이용한 옥외용 AGV 주행센서 시스템에 관한 연구

A Study on Navigation Sensor System for Outdoor AGV Using AMR Sensors

김 성 호, 박 경 섭
(Sung-Ho Kim and Kyung-Sup Park)

Abstract : A navigation sensor system for outdoor AGV (Automatic Guided Vehicle) using AMR (Anisotropic Magneto-resistive) sensors is described. We derive a formula of the position of AMR sensor using the measured magnetic field intensity due to permanent magnet with constant distance. The system consists of sensor board, sensor control board and position processing board. The sensor board measures magnetic field intensity, the sensor control board controls the measurement of six sensors sequentially, and the position processing board computes the accurate position of the permanent magnet using Least Square Method. We arranged six sensors at intervals of 30cm and measured the position of the permanent magnet moving at intervals of 0.5cm. Experimental results showed that we can get standard deviation of 2mm, and error of ± 4.5 mm at a height of 20cm from the permanent magnet.

Keywords : AMR (Anisotropic Magneto-resistive), magnet guidance system

I. 서론

오늘날 세계각국은 산업이 발전함에 따라 수출입 컨테이너 화물량이 급격하게 증가하고 있으나 한정된 물류처리시설 및 항만, 도로 등의 기존시설이 화물량의 증가에 비해 크게 부족한 실정이다. 따라서 빠른 시간에 수출입 화물을 처리할 수 없으며 이것은 바로 물류비용의 상승을 의미한다. 그러므로 이를 극복하기 위하여 항만시설의 첨단화 요구가 증가하고 있으며 그 일환으로 자동 항만 시스템의 개발이 활발히 진행되고 있다.

항만에서 AGV 를 운영하기 위해서는 적어도 3cm 정도의 정밀도가 보장되고 신뢰성 있는 주행센서 시스템을 필요로 한다[1][2]. 이런 요구를 만족하기 위해 GPS (Global Positioning System), Transponder Guiding System, Magnet Guidance System 등 많은 종류의 주행센서시스템이 등장하였다. GPS 는 현재 연구가 활발히 진행 중이며 고가의 차량용 Navigation System 으로 사용되고 있다. 그러나 GPS 는 오차가 매우 크므로 위치 정보가 정확하지 않아 정밀한 유도를 요하는 분야에는 맞지 않는다. Transponder Guiding System 은 전자장을 이용하여 지면에 설치된 Transponder 를 동조시켜 Transponder 에서 방출되는 신호로부터 위치와 ID 정보를 얻는 시스템이다.

이 시스템의 분해능은 수 밀리미터이나 성능에 비해 상당히 고가의 시스템이다. 또한 자장센서로서 일반적으로 사용되는 코일은 일정한 자장에 노출되면 자화가 포화되는 현상을 보이므로, 지속적인 자장 측정에는 포화된 자장을 제어할 수 있는 시스템이 요구된다. 또한 정적인 자장에서는 자장의 세기를 측정하는 것이 아주 힘들다. 따라서 본 논문에서는 일반적인 코일의 이러한 단점을 개선한 자장센서인 AMR

(Anisotropic Magneto-resistive) 센서를 이용하여 영구 자석의 위치를 파악하는 시스템을 구현하였다. AMR 센서를 사용하면 센서자체의 특성에 의해 발생하는 오프셋을 없앨 수 있을 뿐만 아니라 센서 특성이 아주 선형적이기 때문에 정밀한 측정이 요구되는 응용에 사용할 수 있다[3]. 6 개의 AMR 센서를 이용하여 영구 자석의 위치를 측정하기 위해 원형 영구자석에 의한 자장을 수학적으로 모델링 하고, 자장성분의 3 축 성분(B_x , B_y , B_z)을 거리 x , y , z 에 대한 수식으로 전개하였다. 전개된 거리에 대한 자장밀도를 다시 풀어 영구자석으로부터의 센서의 위치를 계산하였다. 본 논문에서는 3 축 AMR 센서 6 개를 이용하여 주행센서 시스템을 구성하였다. 실험을 통하여 옥외용 AGV 주행센서로 사용할 수 있음을 입증하였다.

II. AMR 의 동작원리

AMR 센서는 자기저항 센서의 한 종류로서 강자성체에 외부자장에 의하여 저항이 변하는 원리를 이용한 것이다[4]. 일반적으로 이 센서는 Permalloy (NiFe 의 합금)로 구성된 얇은 막으로 실리콘 웨이퍼 위에 놓여진 형태로 구성된다[5][6][7]. AMR 센서는 자장의 변화에 의해 약 2~3%의 저항 변화를 나타낸다. 또한 1~5 MHz의 자장변화도 측정 가능하다. AMR 센서는 코일처럼 자장의 변화 정도와 공진 주파수 등에 연관되지 않고 사용 가능한 소자다. AMR 센서는 우수한 선형적 특성을 제공한다. 그림 1 에 AMR 센서의 출력곡선을 나타내었다. 그림 1 에서 보면 인가된 자장, -10 [Oe]에서 +10 [Oe]사이에서는 거의 선형적인 응답을 보여 줌을 알 수 있다.

그림 1 과 같은 특성곡선을 나타내는 AMR 센서의 구조는 그림 2 와 같다. 이러한 AMR 센서는 휘스톤 브릿지 회로를 사용하여 감도를 높이는 방법을 사용한다.

일반적으로 AMR 센서는 강성체로 구성되기 때문에 자화 벡터들이 일정한 방향을 향하고 있지 않다. 이는 AMR 센서

논문접수 : 2002. 4. 26., 채택확정 : 2003. 1. 18.

김성호, 박경섭 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부
(matt23@mail.ulsan.ac.kr / parkks@mail.ulsan.ac.kr)

* 이 논문은 2001 년 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었습니다.

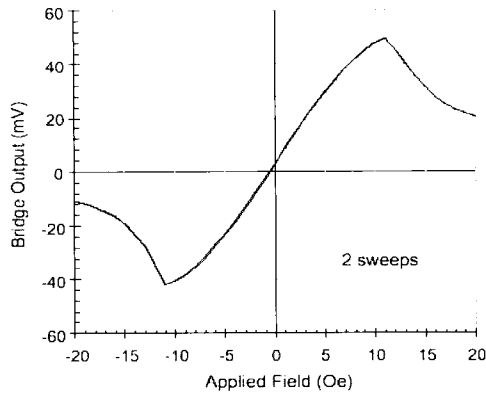


그림 1. AMR 센서의 특성곡선.
Fig. 1. AMR output transfer curve.

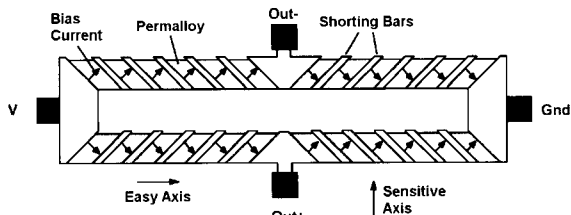


그림 2. AMR 센서 휘스톤 브릿지.
Fig. 2. AMR Wheatstone bridge in Barber Pole Bias.

의 측정감도를 떨어뜨리는 절대적인 요인이 되기도 한다.

자화 벡터는 반복성과 적은 노이즈, 그리고 낮은 히스테리시스 특성을 가져야 한다. 이를 위해 AMR 센서는 자체에 강한 자장을 걸어 센서의 자화 벡터를 일정한 방향으로 고정한다. 고정된 자화벡터는 외부에서 인가된 자장에 의해 그 방향이 틀어지며 이에 의해 센서의 감도가 올라가게 된다.

일반적인 응용에서는 자화 벡터를 각각 다른 방향으로 자화 시켜 측정된 값을 이용하여 센서의 출력값을 산정하고 있다. 자화 벡터를 각기 다른 방향으로 걸어주는 것은 자체 센서가 가지고 있는 오프셋을 줄이기 위한 것이다. 자화 벡터를 한쪽 방향으로 만드는 것을 SET/RESET 이라고 부른다. SET 동작은 자화의 방향을 양의 방향으로 걸어주는 것을 의미하고 RESET 은 SET 의 반대 방향으로 걸어주는 것을 의미한다. 내부의 자화 벡터의 방향을 바꿔주기 위해 AMR 센서 내부에는 SET/RESET Strap Line 이란 것이 존재한다. 이 Strap Line 에 강한 전류를 가하게 되면 Strap Line 에 의해 형성된 강한 자장에 의해 감지축의 자화 벡터는 한 쪽 방향을 향하게 된다.

(1)에서 보면 SET 후에는 측정된 자장이 Offset 과 외부자장을 측정된 결과가 같이 검출된다. RESET 는 Offset 과 외부자장의 값이 음수로 나타난다. 결국 SET 동작을 실행한 후 측정된 값에서 RESET 후의 값을 빼면 순수 외부자장의 2 배의 값이 측정된다.

$$\begin{aligned} V_{set} &= S \times H_a + V_{os} \\ V_{reset} &= -S \times H_a + V_{os} \\ V_{set} - V_{reset} &= 2 \times S \times H_a \end{aligned} \quad (1)$$

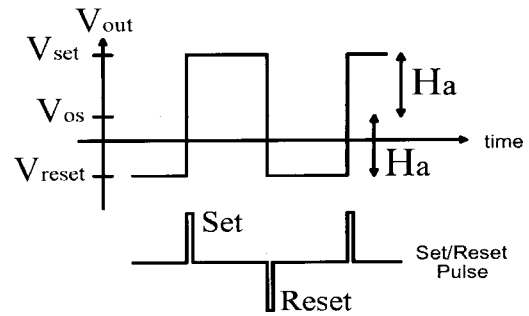


그림 3. SET/RESET 효과에 의한 브릿지 출력.
Fig. 3. Bridge output due to SET/RESET effect.

- S : 자장측정 변환 Coefficient
- H_a : 자장센서에 인가된 자기장의 세기
- V_{os} : 오프셋 전압
- V_{set} : Set pulse 를 가한 후 측정된 전압
- V_{reset} : Reset pulse 를 가한 후 측정된 전압

SET/RESET 을 이용하면 센서 자체의 오프셋이 없는 정확한 값을 얻을 수 있다[3].

III. 원형 영구자석을 이용한 위치 검출

그림 4 와 같은 원형 영구자석에 의한 점 P 의 자장밀도를 구하면 (2)와 같다[8].

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 M_1}{4\pi R^3} (a_r 2 \cos\theta + a_\theta 2 \sin\theta) \\ &= \frac{1}{R^3} 2k \cos\theta \cdot a_r + \frac{1}{R^3} k \sin\theta \cdot a_\theta + 0 \cdot a_\phi \\ &= B_r a_r + B_\theta a_\theta + B_\phi a_\phi \\ &= B_x a_x + B_y a_y + B_z a_z \end{aligned} \quad (2)$$

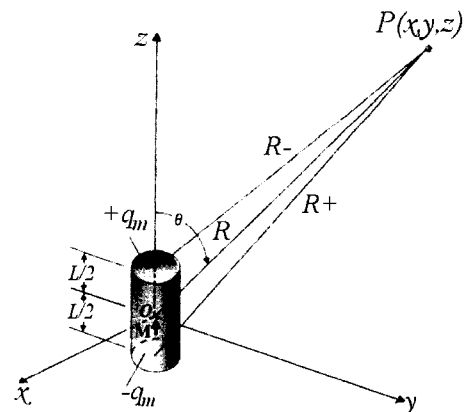


그림 4. 원형 자석 좌표계.
Fig. 4. A cylindrical permanent magnet coordinates.

여기서, $M_r = \pi b^2 M_0$ 이고, M_0 는 자석의 표면자장밀도 (magnetization surface charge density), b 는 원통형자석의 반지름, L 은 그 높이이고, μ_0 는 자유공간에서의 투자율이다. 그

리고 a_x, a_y, a_z 는 직각 좌표계의 방향 벡터이다. 따라서 원형 영구 자석의 자장 밀도를 직각 좌표계로 표시하면 (3)이 된다[8].

$$\begin{aligned}
 B_x &= \frac{3kzx}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} \\
 B_y &= \frac{3kyz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} \\
 B_z &= \frac{k(2z^2 - x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

단, $k = \frac{\mu_0 M_T}{4\pi}$ 이다.

(3)로부터 직각 좌표계의 각축에 대한 자장의 세기를 -0.5m ~ +0.5m 의 거리 영역에서 Simulation 한 결과를 그림 5, 그림 6, 그림 7로 나타내었다.

영구 자석에 의한 자장을 점 P(x, y, z)에 있는 센서로부터 3축 자장(B_x, B_y, B_z)를 측정하고 이 값으로부터 (3)을 이용하여 점 P의 좌표 x, y, z를 유도하면 (4), (5), (6)과 같다.

$$y = \frac{B_y}{B_x} x \tag{4}$$

$$z = \frac{3B_z \pm A}{4B_x} x \tag{5}$$

$$x = \sqrt[3]{\frac{3k(3B_z \pm A)256B_x^3}{(24B_x^2 + 24B_y^2 + 18B_z^2 \pm 6B_z A)^{\frac{5}{2}}}} \tag{6}$$

여기서, $A = \sqrt{8B_x^2 + 8B_y^2 + 9B_z^2}$ 이다.

따라서 하나의 원형 자석의 자장을 이용하여 점 P의 위치를 계산할 수 있다.

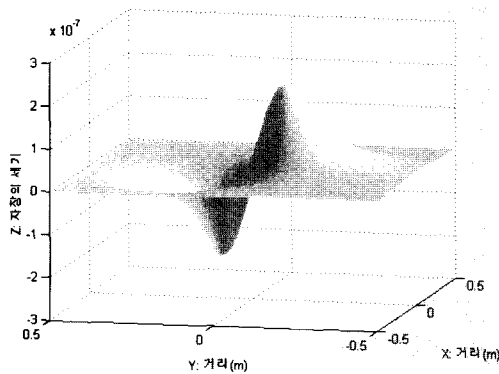


그림 5. 위치에 따른 X 축의 자장의 크기 변화.
Fig. 5. The magnetic field of X-axis with the position.

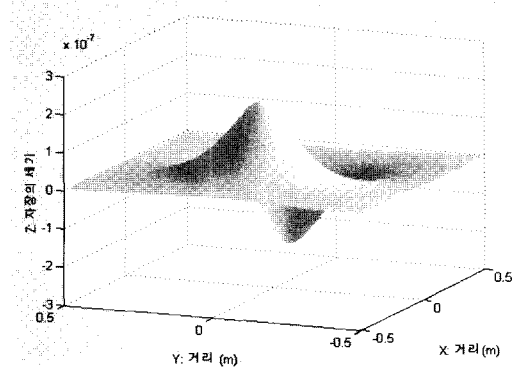


그림 6. 위치에 따른 Y 축의 자장의 크기 변화.
Fig. 6. The magnetic field of Y-axis with position.

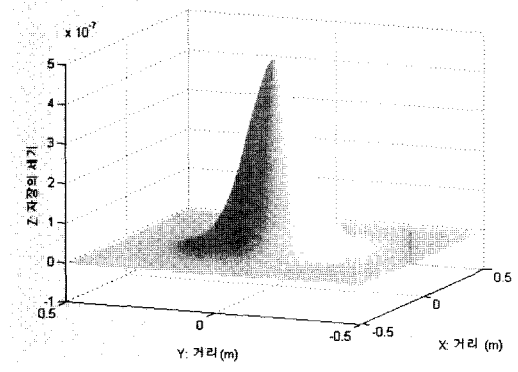


그림 7. 위치에 따른 Z 축의 자장의 크기 변화.
Fig. 7. The magnetic field of Z-axis with position.

IV. 주행센서 시스템 구성

주행 센서시스템은 센서부, 센서 제어부, 거리 연산부로 크게 3 부분으로 구성하였다. 먼저 센서부는 3축 AMR 센서, Mux 와 ADC 로 구성되는데, 6 개의 센서모듈을 이용하여 30cm× 150cm 의 범위를 검출 할 수 있도록 각각의 센서를 30cm로 서로 이격 시켜 일렬로 배치하여 구성하였다. 30cm로 센서들을 이격 시킨 이유는 (2)와 그림 7에서 알 수 있듯이, 30cm 보다 더 멀어지면 영구자석에 의한 자장의 세기가 너무 미약하기 때문이다.

센서 제어부는 80C196KC 의 제어기와 주변소자는 VHDL로 구현하여 구성하였는데, 6 개의 센서에 Set/Reset 신호를 보내어 센서들이 보다 정확한 값을 측정 할 수 있도록 제어하며, 3축에 대하여 고가의 ADC를 모두 사용 할 수 없으므로, 아날로그 Mux를 이용하여 하나의 ADC로 값을 읽을 수 있도록 제어하는 명령을 센서부로 보낸다. 또한 6 개의 센서로부터 측정된 자장 값을 받아서 거리 연산부로 보낸다.

거리 연산부에서는 DSP를 이용하여 센서제어부에서 보내온 자장값을 이용하여 자석의 위치를 계산하게 된다.

V. 위치 검출 알고리즘

위와 같이 구성한 시스템을 바탕으로 6 개의 센서들로부터 3축의 자장값을 획득한다. 실제 구현 시 고려 해야 했던

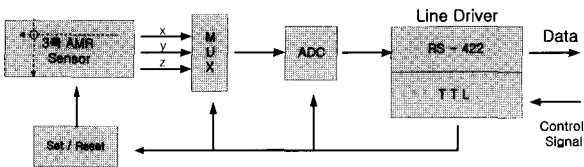


그림 8. AMR 센서 모듈 구성도.
Fig. 8. Block diagram of AMR sensor module.

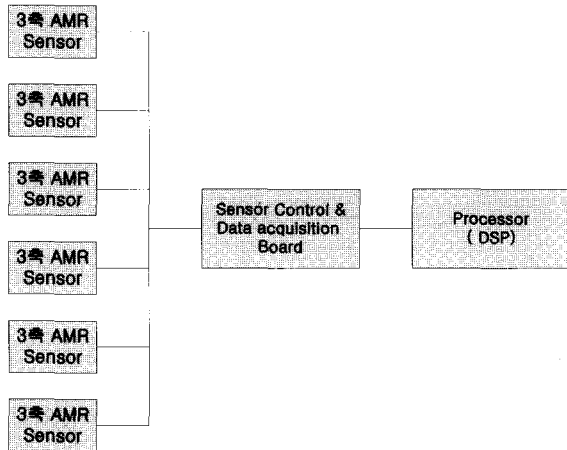


그림 9. AMR 센서 시스템 구성도.
Fig. 9. Block diagram of AMR sensor system.

것은 (2) 에는 지구자장이 포함되어 있지 않기 때문에 이를 보상에 줘야 하고, 또한 6 개의 센서들의 이득 특성은 같지만 초기값이 모두 같지 않기 때문에 이를 보상에 줘야 한다. 센서들의 특성을 모두 같도록 하기 위해서는 무자장실에서 센서 교정(calibration)을 수행한 후 사용을 해야 하나, 현실적으로 어렵기 때문에 센서 초기화 시에 먼저 영구자석이 없는 순수 지자장을 측정하여 평균을 취한 값을 각 센서들의 초기값으로 설정하여 각 센서들의 초기값을 일치시키고, 원형 자석이 없는 상태에서 계산한 초기치로부터 영구자석이 감지 거리에 위치하면서 발생하는 센서의 계측값을 영구자석의 자장값으로 인식하여 지자장과 각 센서의 초기값이 모두 다른 특성을 보상하도록 하였다. 또한 각 원형 자석마다 표면 자장밀도(M_s)가 다르기 때문에, 하나의 센서만으로는 정확한 원형 자석의 위치를 측정할 수 없다.

그러므로 정확한 거리 측정을 위해서는 2 개의 센서를 이용하여 각 센서가 측정한 거리의 비를 구하여 두 센서 사이의 자석의 위치를 계산하였다. 두개의 센서를 이용하여 측정된 거리와 오차의 그래프는 그림 10 과 같다. 이와 같은 알고리즘을 6 개의 센서로 확장하기 위해서 자석이 센서 감지 구간 내 있을 경우 z 축의 자장값이 커지는 특성을 이용하여 6 개의 센서 중 z 축의 자장값이 큰 센서 2 개를 취하여 2 개의 센서를 이용한 거리검출 알고리즘을 확장 적용하였다. 센서가 감지 가능한 구간 내 오차의 표준편차가 2.6cm 이나 더욱 정밀한 센서 시스템을 만들기 위해서는 센서의 보정이 필요했다.

그림 10 과 같은 오차의 분포가 6 개를 이용한 센서시스템에서 연속적으로 발생하였으므로 전체 감지구간에 대해서가

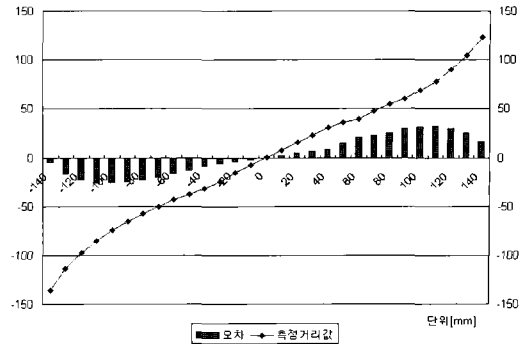


그림 10. 2 개의 센서를 이용한 거리 측정값과 오차.
Fig. 10. Result of position and error with two sensors.

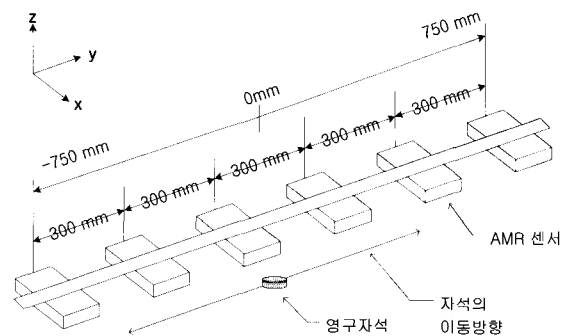


그림 11. 영구자석의 위치 측정 실험.
Fig. 11. The experimentation of position measurement for ermanent magnets.

아니라 구간별로 보정을 하였다. 방법은 실제 옥외용 AGV의 주행 시스템에서 구현이 가능하도록 하기 위하여, 간단한 다항식으로 보정 할 수 있는 MATLAB의 최소자승법을 이용한 polyfit 함수를 사용해서 실제 값에 근사화 하는 함수의 계수를 구하여 그 다항식의 함수로 보정 하였다. 근사화 함수의 차수가 크면 클수록 오차가 줄어 들겠지만, 거리연산부의 계산능력을 고려하여 5 차의 근사함수로 각 구간별 측정거리의 특성에 맞는 함수의 계수를 각각 구하여 보정 하였다.

VI. 실험 및 결과

센서의 감지구간 총 150cm 의 거리를 0.5cm 간격으로 원형 영구자석의 위치를 그림 11 의 $\pm y$ 축에 따라 이동하면서 측정된 실제거리에 대한 측정거리를 그림 12 에 나타내었다. 여기서 영구자석으로부터 AMR 센서의 높이는 20cm 를 유지하였다. 그림 12 의 점선은 보정 전의 감지 구간 내에서의 측정값을 나타내고 실선은 보정 후의 측정값이다. 보정 전의 센서의 측정값은 그림 10 에서와 같은 오차의 분포가 연속적으로 감지 구간 내에서 나타남을 볼 수 있다. 구간별 특성에 맞는 다항식의 계수를 구하여 구간별 보정을 수행하였다. 보정 후의 측정 거리인 실선과 같이 감지 구간에서 적은 오차를 가지고, 선형적으로 측정 가능하도록 하였다.

거리에 대한 오차를 그림 13 에 나타내었다. 점선은 보정 전의 오차를 나타내고, 실선은 보정 후의 오차를 나타내는데 그림 10 에서와 같은 오차의 분포가 감지구간 내에서 연속됨

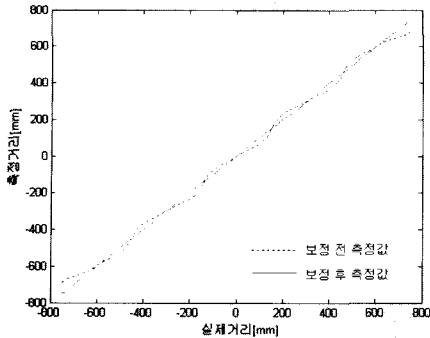


그림 12. 측정 거리 결과.
Fig. 12. The results of measured distance.

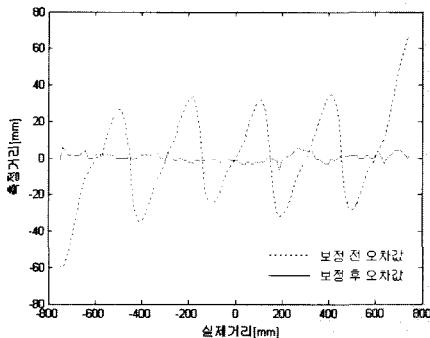


그림 13. 측정 거리 오차.
Fig. 13. The errors of measured distance.

을 다시 확인 할 수 있다. 본 논문에서 구현한 옥외용 AGV 주행센서 시스템의 오차는 보정 전 오차의 표준편차가 2.6cm 에서 그 후 0.2cm (최대 오차는 0.45cm)로 정밀하게 보정 되었음을 알 수 있다.

본 논문의 실험 결과와 서론에서 언급했던 독일의 게팅 (GOETTING)사의 Transponder Guiding System 과 성능을 비교 하면 이 시스템은 Transponder(본 논문에서 영구자석의 역할)의 위치 검출 시 Antenna(본 논문에서 AMR 센서 역할)의 중심에서 $\pm 125\text{mm}$ 까지 범위의 위치 오차는 $\pm 5\text{mm}$ 이다[9]. 여기서 Transponder 와 Antenna 의 높이는 200mm 이다. 따라서 본 논문에서 제안한 AMR 센서 시스템의 위치 오차는 $\pm 4.5\text{mm}$ 로 고가의 Transponder Guiding System 보다 본 논문에

서 제안한 AMR 센서 시스템의 성능이 좀더 정밀함을 알 수 있다.

VII. 결론

본 논문에서는 옥외용 AGV 주행을 위하여 원형 영구자석과 AMR 센서를 이용하여 원형 영구자석의 위치를 측정하는 시스템을 구성하였다. 원형 영구자석에 의한 자장을 수학적으로 모델링 하고, 점 P 에서 측정된 자장성분의 3 축성분 (Bx, By, Bz)을 점 P 의 x, y, z 에 대한 수식으로 전개하여 영구자석으로부터의 센서의 위치를 계산하였다. 자석마다 자석의 표면자장밀도가 다르므로, 2 개의 센서를 이용하여 수식에 의해 계산된 거리의 비를 구하여 센서로부터 자석의 거리를 알 수 있었으며, 센서에 오차를 줄이기 위하여 5 차(fifth order) 함수로 보정하여 실제 옥외용 AGV 에 쉽게 적용 가능하도록 하였다. 그 결과 거리에 대한 오차의 표준편차가 0.2cm 인 정밀한 원형 영구자석 위치 검출 시스템을 구성하여 옥외용 AGV 주행센서로 사용할 수 있음을 입증하였다.

참고문헌

- [1] F. Hugh Durrant-Whyte, "An autonomous guided vehicle for cargo handling application", *International Journal of Robotics Research*, Vol. 15, No.5, pp. 407-430, October 1996.
- [2] 정진한, 강희준, "자율주행 로봇의 주행 유도 및 주차 알고리즘", 석사학위논문(울산대학교), pp. 1-2, 2000.
- [3] M. J. Caruso, Application Note AN-201, AN-202, AN-204, and 207, *Honeywell SSEC*
- [4] J. E. Lenz, "A review of magnetic sensors", *Proceedings of IEEE*, Vol.78, No.6, pp. 973-989, June 1990.
- [5] P. Ciureanu, S. Middelhoeck, "Thin film resistive sensors", *New York: Institute of Physics Publishing*, 1992.
- [6] B. B. Pant, "Magnetoresistive sensors", *Scientific Honeyweller*, Vol. 8. No.1, pp. 29-34, Fall 1987.
- [7] J. E. Lenz, G. F. Rouse, L. K. Strandjord, B. B. Pant, A. Metzger, H. B. French, E. T. Benser, D. R. Krahn, "A highly sensitive magnetoresistive sensors", *Solid State Sensors and Actuator Workshop*, 1992.
- [8] D. K. Cheng, "Field and wave Electromagnetics 2ND edition", ADDISON WESLEY, 1989.
- [9] *Positioning and Identification System(two dimensional)* : G38935, GOETTING, 1997.



김 성 호

1973 년 7 월 5 일생. 1999 년 울산대학교 제어계측공학과(공학사). 2001 년 울산대학교 제어계측공학과(공학석사). 2001 년 ~ 현재 울산대학교 전기전자정보시스템 공학부 제어계측공학과 박사과정 재학 중. 관심분야는 AGV 유도 시스템, 전력

선 통신, 초고속 산업용 네트워크.



박 경 섭

1951 년 8 월 23 일생. 1974 년 서울대학교 전기학과(공학사). 1976 년 서울대학교 전기공학과(공학석사). 1989 년 The University of Texas at Austin 공학박사. 현재 울산대학교 전기전자정보시스템 공학부 교수. 관심분야는 광센서, 초고속

산업용 네트워크, 자율이동로봇.