

중력 법칙을 이용한 전자나침반의 경사오차 및 비 수평오차 보정

논 문
60-3-22

Inclination and Non-horizontal Error Correction of Magnetic Compass by the Law of Gravity

박 계 도* · 이 장 명†
(Gye-Do Park · Jang-Myung Lee)

Abstract - This paper proposes a correction method concerning the inclination error and non-horizontal error of magnetic compass when magnetic compass is vibrated. This system used the 2-axis variable resistance and pendulum. A pendulum hanging from the 2-axis variable resistance of this system is always maintain the horizontal because of gravity. but these data had some intrinsic error. So we used the low pass filter to solve this problem. So this system can get the accurate azimuth of magnetic compass.

In conclusion, These results demonstrate convincingly by applied algorithm of experiment.

Key Words : 2-axis variable resistor, Magnetic compass, Azimuth, Inclination error, Non-horizontal error, Correction

1. 서 론

전자나침반은 로봇의 자율 주행 및 항법장치 등에 사용하기 위한 센서로서 선박의 항해 및 항공기, 자동차 등의 운행에서 물체의 방향을 알기 위한 방법으로 널리 사용되고 있다[1]. 선박의 운항규정인 SOLAS (해상 인명 안전 조약) 규정[2]에 의하면 자기 컴퍼스 (Magnetic compass)에 자차 수정을 충분히 행한 후, 선수 방위 신호를 전기 신호로 전달하는 선수방위 전달 장치 (Transmitting Magnetic Heading Devices)의 장착이 권고되고 있다.

또한 많은 산업현장에서 작업관리 및 효율성 증대를 위하여 자율 이동 로봇과 자율 운반체 등이 도입되고 있으며 그 중 대부분은 와이어 가이드 시스템 (wire guided system), 라인 가이드 시스템(line guided system)[3,4], 그리고 표지판 시스템 (landmark system)[5,6] 등의 방법으로 경로를 유도하는 방식이다. 위와 같은 시스템은 로봇의 작업 영역 내에 와이어나 특수한 물질을 사용하여 표시해 놓은 라인 및 표지와 같은 경로 인식 보조 수단을 사용하는 형태이다. 이러한 경로 유도 방식에서는 작업 과정 변경 시 이동 로봇의 경로를 새롭게 지시해야 하고, 유도하는 인식 수단이 손상되었을 때 로봇이 경로를 이탈하거나 시스템에 치명적인 손상을 줄 수 있다. 따라서 이동 로봇에 별도의 장비 및 보조 수단의 설치 없이 작업공간에서 자율 탐색 및 주행이 가능한 연구개발[7-9]이 이루어지고 있으며 그 방법으로 전자나침반이 사용되고 있다. 하지만 이동하는 물체 또는 흔들리는 상황에서의 전자나침반을 사용하는데 있어서 위치 변화

에 따른 자기장 변화에 의해 정확한 방위각을 측정하는데 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 자기장이 변하는 상황에서도 단일 전자나침반을 이용한 방위각 측정의 정확성을 향상시키기 위하여 비 수평 오차와 경사 오차를 새로 제안하는 중력의 법칙을 적용한 실험방법을 통해 보정한다. 또한, 가속도센서와 자이로센서의 방위각 측정과 그에 따른 성능을 비교함으로써, 중력법칙을 적용한 단일 전자나침반의 방위각 측정방법 우수성에 대하여 연구해 보았다.

본 논문은 서론 및 결론을 포함하여 총 5장으로 구성되며, 2장에서는 전자나침반의 기본 원리 및 방위각 측정방법, 가속도센서와 자이로센서의 방위각 측정원리에 대해 설명하며 기존의 전자나침반의 측정오차 중 영점보정, 소자출력 감도차이 보정(Zero-offset compensation), 비 직교 오차 (Non-orthogonal error) 보정 방법에 대하여 설명하며, 3장에서는 실험 환경 구성에 대한 설명을 소개하고, 4장에서는 실험결과에 대하여 설명한다. 마지막으로 결론으로 본 논문을 마무리 짓는다.

2. 방위각 측정

먼저, 이 장에서는 전자나침반의 기본적인 측정원리 [10,11]와 가속도[12,13], 자이로센서의 방위각 측정원리에 대해 살펴본다. 이후, 전자나침반의 영점 보정, 소자 출력 감도 차이, 비 직교 오차(Non-orthogonal error)에 대한 기존 오차 보정 방법[14,15]을 설명한다.

2.1 전자나침반의 측정원리

나침반은 자화된 바늘이 지구 자기장에 반응하여 방위를 검출하는 도구이다. 이에 비해 전자나침반은 특수소자(자기 저항 센서)를 이용하여 지구 자기장을 검출한다.[16,17] 자북

* 준 회원 : 부산대학교 로봇협동과정 석사과정

† 교신저자, 정회원 : 부산대 전자전기공학과 정교수

E-mail : jmlee@pusan.ac.kr

접수일자 : 2010년 10월 30일

최종완료 : 2011년 2월 18일

에 대한 지구 방위각을 구할 수 있는 방위각 센서로서 3차원으로 나타낼 수 있다[18].

2.2 가속도 센서의 방위각 측정 원리

가속도 센서는 직선방향으로 단위시간에 대한 속도의 증감 비를 나타내는 센서이다. 중력도 가속도의 하나이기 때문에 평지에 놓았을 때는 Z축 방향으로 중력가속도 값(1g)을 가진다. 이런 중력 가속도로 인해 생기는 특성을 활용하여 기울어진 각도를 검출할 수 있다. 이를 3차원으로 적용시켜 보면 다음과 같다.

$$\rho = \tan^{-1} \frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \quad (1a)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}} \quad (1b)$$

$$\sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} = 1g \quad (1c)$$

하지만 가속도 센서로 방위각을 측정 시 외란에 약하며 떨림이 심하고, 일정 이상의 외란에 대해서는 각도 값이 양과 음의 방향으로 순차적으로 발산하기도 한다.

2.3 자이로 센서의 방위각 측정 원리

자이로 센서는 각속도를 검출하는 센서이다. 자이로를 이용하여 각도를 알아내기 위해서는 초기 상태가 이루고 있는 각도 θ 에 자이로 센서로부터 계산된 회전각을 누적시키는 방법을 사용한다.

자이로 센서는 종류에 따라 다양한 정확도와 크기, 출력 형태가 있는데 정확도가 높은 센서는 가격대가 상당히 높은 편이기 때문에 여러분야로 활용하기에는 어려움이 있다. 또한 자이로는 회전각을 누적시켜 각도를 구하기 때문에 센서로부터 얻은 값의 정확도가 낮으면 시간이 갈수록 오차도 누적되어 커진다는 한계가 있다.

2.4 전자나침반의 측정오차 보정 방법

2.4.1 영점 보정

컴퍼스의 출력 오프셋은 소자 자체의 오프셋과 신호의 증폭에 의해 발생한다. 그리고 센서의 허용오차와 온도에 따라 달라지므로 이에 대한 보정은 다음과 같이 행해진다.

$$V_{offset} = (V_{x,y \max} - V_{x,y \min}) / 2 \quad (2a)$$

이 값은 외란이 존재하지 않고 소자의 오차가 없을 경우 0이 되어야 한다.

이 계산된 오프셋 값으로 보정하면,

$$V_{x,y \text{ corrected}} = V_{x,y \text{ output}} - V_{offset} \quad (2b)$$

로 정확한 값을 구할 수 있다.

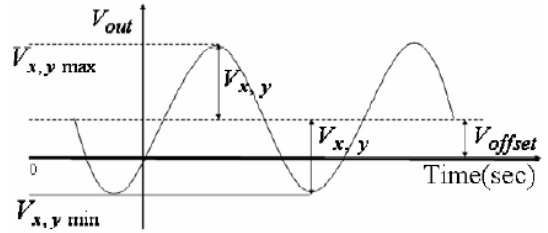


그림 1 출력 오프셋 보정

Fig. 1 Zero-offset compensation

2.4.2 소자출력 감도차이 보정

소자의 감도에 의한 편차와 증폭기의 증폭률에 대한 편차로 인해 발생하는 오차를 크게 벡터를 사용하여 보정한다. 즉 x축의 출력 값의 크기 벡터, $S_{V_x}=1$ 로 두면 y축의 크기 벡터, S_{V_y} 는 다음과 같이 구해진다.

$$S_{V_y} = \frac{V_{y \max} - V_{y \min}}{V_{x \max} - V_{x \min}} \quad (3)$$

즉, y축의 출력 값에 크기 벡터를 곱해서 구해주면 x축과 같은 크기로 맞추어진다.

2.4.3 비 직교 오차 보정

이 오차는 센서 제작 시 발생하는 오차로 최대 2°의 오차가 발생할 수 있다. 오차 보정은 아래와 같이 한다.

$$V_x = V_{\max} \times \cos \alpha \quad (4a)$$

$$V_y = V_{\max} \times \sin(\alpha + \beta) \quad (4b)$$

방위각 α 와 (4a)와 (4b)로부터 오차 β 를 구하여, 보정된 y축은 다음과 같다.

$$V_{y \text{ corrected}} = \frac{V_y}{\cos \alpha} - V_x \cdot \tan \beta \quad (4c)$$

3. 실험환경 구성 및 알고리즘

이 장에서는 실험환경에 관한 구성에 대해 구체적으로 설명하고 중력법칙을 적용한 2축 가변저항의 알고리즘에 방법 대하여 그림을 이용해 설명한다.

3.1 실험 환경

실험을 위하여 그림 2와 같이 전자나침반과 2축 가변저항을 상호 대칭구조로 구성하였다. 방위각 측정을 위해 사용된 센서로는 Philips 사의 KMZ51를 사용하였고 수평 상태 및 각도변화를 파악하기 위하여 2축 가변저항으로 ALPS사의 RKJXK122000D를 사용하였다.

KMZ51은 Microchip 사의 dsPIC30F4012 프로세서를 이용한 I2C통신 방법으로 방위각을 측정하고 2개의 가변 저항 값을 AD변화하여 각도의 변화량을 측정하는데 사용한다. 이때 AD 변화된 가변저항의 값은 저 대역 통과 필터[19]로 가우시안 노이즈를 제거한 뒤 보정된 데이터 값을 방위각을 보정하는데 사용한다.

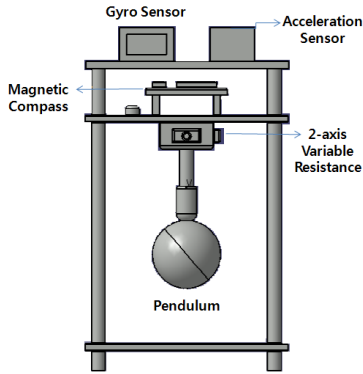


그림 2 실험 구성
Fig. 2 Experiment composition

전자나침반이 진동 또는 흔들리는 상황에서 정확한 방위각을 측정하기 위하여 전자나침반의 기울기 변화에 따른 지구자기장 변화를 2축 가변저항에 달린 추의 중력 법칙을 이용하여 그림 3과 같은 방법으로 보정하는 방법을 정의한다.

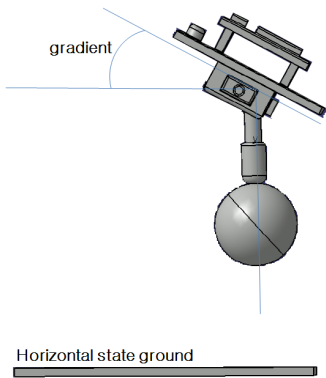


그림 3 알고리즘 적용 실험 방법
Fig. 3 Experiment method of applied algorithm

이 때 전자나침반의 기울어진 각도 변화에 따른 2축 가변 저항 X, Y축의 변화 된 값으로 전자나침반의 기울어진 각도를 계산할 수 있다. 이는 각도 변화에 따른 가변저항의 값이 선형적으로 변하는 것을 이용하였다. 이때 기울어진 각도를 구할 수 있으며 얻어진 결과로 경사오차와 비수평 오차를 보정함으로써 전자나침반의 기울기가 변화하는 상황에서도 정확한 방위각 측정을 할 수 있으며 이에 대한 증명은 다음 장에서 설명한다.

3.2 보정 알고리즘

전자나침반이 수평상태일 때 가변 저항 X, Y축의 중심 (가변저항 값 :492, 492)을 기준 값으로 둔다. 이때 구한 가변저항의 기준 값 492는 측정에 의한 값이며 새로운 시스템의 구성에 따른 실험환경의 구성에 따라 값은 바뀔 수 있다. 만약 전자나침반이 지면과 수평상태가 아니면 지구자기장의 크기가 달라져 경사오차 및 비 수평 오차가 발생하게 되지만 가변저항에 달린 추는 중력의 법칙에 의해 항상 지표면과 수직이다. 이때 전자나침반의 기울어진 각도를 2축 가변저항의 기준 값과 전자나침반이 기울어졌을 때의 가변저항의 값을 이용하여 구할 수 있다. 이는 가변저항의 값이 전자나침반의 기울어진 각도와 선형적으로 변하는 것을 이용한다. 경사각도가 0.1° 변할 때마다 가변저항의 값은 1.1씩 선형적으로 변하는 것을 실험으로 확인하였다.

위와 같은 실험환경에서 기울기가 변화하면 X, Y축의 가변저항의 값(ADC_X)이 변하게 되고 기준 값인 492로 빼면 기울어진 각도의 크기 값을 AD변환 값으로 얻게 된다. 이때 얻은 AD값을 가변저항의 변화량과 각도의 변화량이 선형적인 점을 이용하여 1.1로 나누어 주면 전자나침반이 기울어진 각도를 구할 수 있다. 이 각도를 기울어진 상태의 측정 방위각에 빼주게 되면 전자나침반이 기울어지더라도 평행인 상태의 방위각과 같은 값을 얻을 수 있다. 이는 전자나침반이 기울어졌을 때 얻은 각도를 이용하여 전자나침반의 수평상태의 값과 비교함으로써 전자나침반이 흔들리거나 위치가 변할 때에도 경사오차 와 비 수평오차를 보정한 방위각의 값을 구한다.

다음과 같은 계산방법을 식 (5)에 나타내었다.

$$ADC_X - 492 = X \tag{5a}$$

$$X \% 1.1 = d_X \tag{5b}$$

$$Deg^\circ - d_X = Degree^\circ \tag{5c}$$

그림 4는 알고리즘을 적용한 실험환경에 대하여 순서도로 도식화한 그림이다.

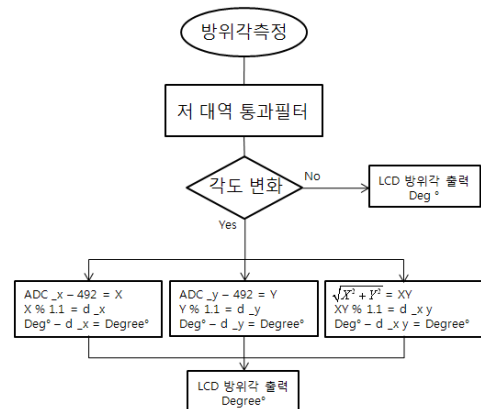


그림 4 알고리즘 순서도
Fig. 4 Algorithm flow chart

표 1 알고리즘 부연 설명

Table 1 Algorithm additional explanation

항목	부가설명
Degree°	알고리즘 적용 방위각
Deg°	전자나침반 측정 방위각
AD_x	X축 가변저항 값
AD_y	Y축 가변저항 값
AD_xy	X, Y축 가변저항 값
492	기준 가변저항 값(0°)
1.1	0.1° 변화에 따른 가변저항의 변화값

이번 실험은 전자나침반이 자성물질에 대한 외부간섭 오차에 대한 영향을 받지 않는 환경[19]에서 전자나침반이 흔들리는 상황 또는 위치가 변할 때 지구자기장 변화에 따른 경사 오차와 비 수평 오차에 대한 보정알고리즘을 적용하고 실험하였다. 또한 가변저항은 니크롬선을 사용하여 온도 변화에 따른 안정성이나 내구성이 좋은 편이다. 온도가 상승함에 따라 비선형적으로 값이 변하는 성질이 있으나 그 값이 0°C ~1000°C의 값처럼 큰 범위를 가지고 있다[20]. 실제 실험환경에선 5°C~40°C의 범위 이내의 실험 환경을 구성하여 실험결과가 미세하게 증가된 값을 보이거나 실온에서 실험하는 이번 실험은 온도 변화에 따른 저항값의 변화는 크게 영향을 미치지 않았다.

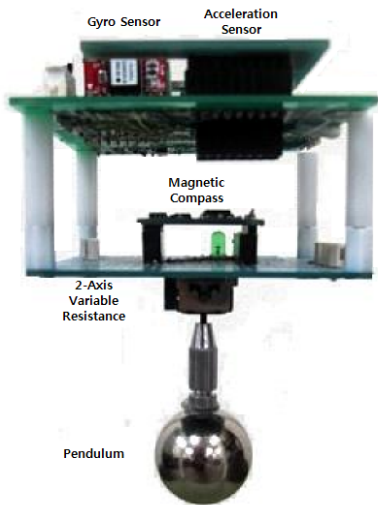


그림 5 실제 실험 시스템

Fig. 5 Reality experiment system

4. 실험 결과

그림 6은 알고리즘을 적용하기 전 방위각을 측정할 때 데이터로 수평 상태에서부터 1°씩 0°~3°까지 기울였을 때 방위각을 측정할 값이다. X축의 각도가 수평선(0°)일 때 방위각이 222.1°를 나타내고 Z축의 각도가 1°씩 증가할 때마다 방위각이 0.9°씩 선형적으로 증가하는 것을 실험으로 측정하였다. 하지만 전자나침반의 내부 오차로 인해 0.3°범위 내에서 오차가 발생한다. 이는 영점 보정 및 소자출력 감도차이 보정 방법과 저 대역 통과필터를 이용하여 보정한다.

중력 법칙을 이용한 전자나침반의 경사오차 및 비 수평오차 보정

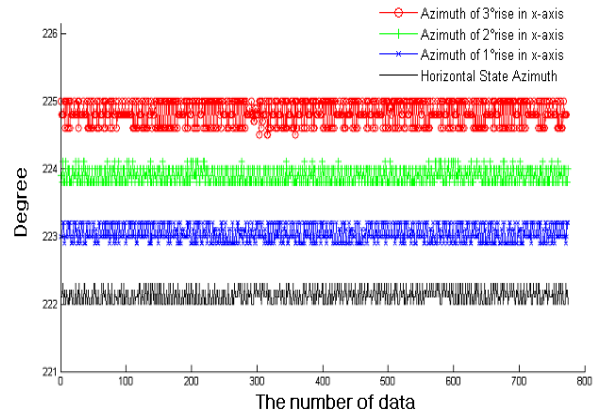


그림 6 X축의 각도 변화에 따른 방위각

Fig. 6 Azimuth by angle variation of X-axis

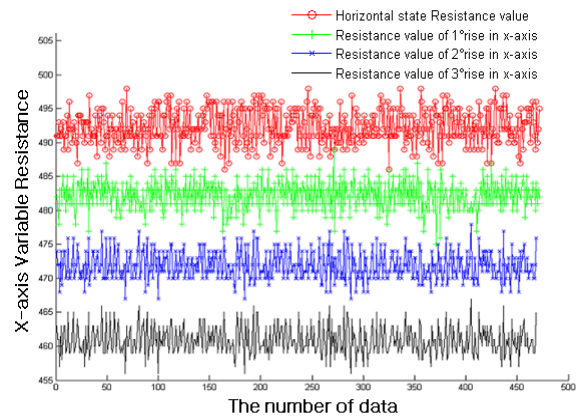


그림 7 X축 변화에 따른 가변 저항값

Fig. 7 Variable resistance by angle variation of X-axis

그림 7은 수평 상태에서부터 1°씩 0°~3°까지 기울였을 때 가변저항의 값을 측정할 값을 그래프로 나타낸 것이다.

그림 6, 7에서 전자나침반의 기울어진 각도 변화에 따라 방위각과 가변저항의 값이 선형적으로 변화하는 것을 볼 수 있다. 본 논문은 전자나침반의 기울기가 변할 때 방위각과 가변저항이 선형적으로 변화하는 것을 이용하여 경사오차와 비 수평 오차를 보정한 방위각의 값을 구한다.

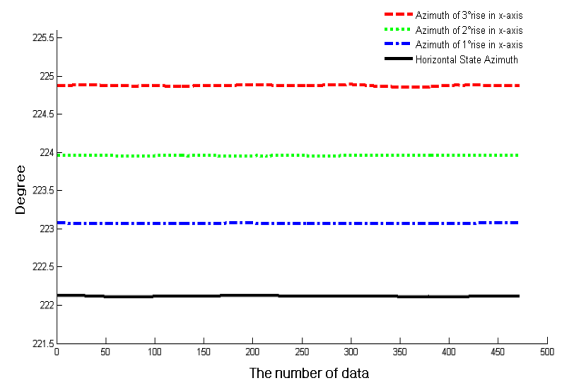


그림 8 저 대역 통과 필터로 보정한 방위각 데이터

Fig. 8 Corrected azimuth data by using the low pass filter

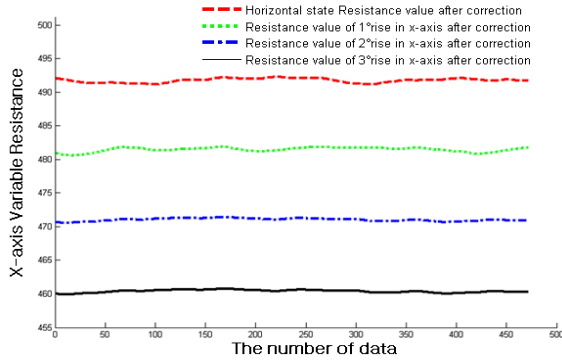


그림 9 저 대역 통과 필터로 보정한 가변저항 데이터
 Fig. 9 Corrected variable resistance data by using the low pass filter

전자나침반의 기울기 변화에 따른 선형성을 이용하여 중력의 법칙에 따라 추와 지평선이 수직(지면과 수평인 상태)일 때 가변저항의 값 492를 기준으로 참조하여 기울어진 각도에 변화된 가변저항 값의 선형성을 이용하여 본 논문에서 제안하는 알고리즘으로 경사 오차 및 비 수평 오차를 보정한다. 이때 전자나침반의 내부 오차의 영향으로 0.5°의 값 이내 일어나는 방위각의 오차는 저 대역 통과필터를 이용하여 0.1°이내로 보정하였다.

또한 가변저항의 노이즈 잡음으로 인해 생기는 오차는 약 5~9사이의 AD변환 값이며 저 대역 통과 필터로 필터링한 결과 그림 9와 같이 0~2값 이내로 줄었다.

그림 10은 지면과 수평을 이루고 있는 상태에서 전자나침반의 방위각을 측정하던 것을 0~5°로 기울였다 다시 원래대로 돌아올 때 방위각을 측정할 값이다. 아래의 그림은 일정한 방위각을 나타내고 있는 전자나침반을 기울였을 때 알고리즘을 적용하지 않은 시스템은 방위각이 변하는 것을 볼 수 있다. 알고리즘을 적용한 시스템은 기울기가 변하더라도 일정한 방위각을 유지하는 것을 그래프로 알 수 있다. 또한 가속도와 자이로를 이용한 시스템은 동적 상황에서 누적오차로 인해 오차가 커지는 것을 확인하였으며 이로써 중력법칙을 적용한 가변저항의 방위각 측정 방법으로 경사오차와 비 수평 오차를 보정하여 정밀한 방위각을 측정하는 것을 실험을 통하여 확인하였다.

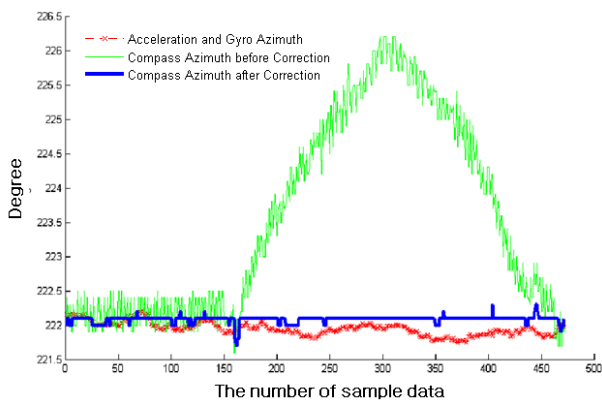


그림 10 방위각 측정 실험
 Fig. 10 Experiment of azimuth measurement

5. 결 론

흔들리는 상황에서 전자나침반을 사용함에 있어서 지구자기장의 변화에 따른 방위각의 오차가 발생하여 정확한 방위각을 측정하기가 어렵다. 본 논문에서는 이러한 지구자기장 변화에 따른 방위각의 오차를 보정하기 위하여 2축 가변저항을 이용하였다. 2축 가변저항을 이용하여 흔들리는 상황에서도 논문에서 제안하는 실험을 통하여 전자나침반의 경사 오차 및 비 수평 오차를 보정함으로써 정확한 방위각을 측정하고 자이로와 가속도센서의 방위각 측정 결과와 비교하였다. 알고리즘을 적용하기 전 전자나침반의 방위각 측정시 Z축으로 1°의 기울기 변화에 따라 4°의 방위각 오차가 발생 하였지만 알고리즘을 적용 후 오차 범위를 0.3° 이내로 보정하였다. 가속도센서와 자이로센서를 이용한 방위각 측정방법과 비교하였을 시 동적상황에 대한 방위각 측정방법에서 2축 가변저항을 적용한 알고리즘의 방위각 측정방법이 우수한 것을 확인하였다. 이로써 중력법칙을 이용한 알고리즘으로 경사 오차와 비 수평 오차에 대한 보정을 통한 방위각의 정확성 향상을 실험을 통해 증명하였다.

감사의 글

“본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 특수환경 Navigation/Localization 기술 연구센터 지원사업의 연구 결과로 수행되었음” (NIPA-2010-(C7000-1001-0004))

참 고 문 헌

- [1] CARUSO, M.J. “Applications of magnetoresistive sensors in navigation system”, Sen. Actuators 1997, SAE SP-1220, pp. 15-21, Feb, 1997.
- [2] Consideration and adoption of amendments to the international convention for the safety of life at sea, 2000
- [3] Jae-hyun Park, Jang-myung Lee, “Beacon Color Code Scheduling for the Localization of Multiple Robots”, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems Vol. 16, No. 5, May 2010.
- [4] Arras, K.O. and Siegwart, R., “Feature Extraction and Scene Interpretation for Map-Based Navigation and Map Building”, In The Proceedings of the Symposium on Intelligent Systems and advanced Manufacturing, Pittsburgh, USA, Oct 13-17, 1997.
- [5] Beeson, P., Nicholas K. Jong, and Benjamin Kuipers, “Towards Autonomous Topological Place Detection Using the Extended Voronoi Graph,” in IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 2005.
- [6] Dissanayake, Newman, Clark, Durrant-Whyte and Csorba, “A Solution to the Simultaneous Localization and Map Building (SLAM) problem”, IEEE Trans. On Robotics and Automation, Vol. 17, No.3, June, 2001.

- [7] Owen, C. and Nehmzow, U., "Landmark-based navigation for a mobile robot," In Meyer, Berthoz, Floreano, Roitblat and Wilson (Eds.), From Animals to Animate 5, Proceedings of SAB, MIT Press, Cambridge, MA, pp. 240-245, 1998.
- [8] Thrun, S., "Learning metric-topological maps for indoor mobile robot navigation", Journal of Artificial Intelligence 99(1):21-71, 1998.
- [9] Sun-Sin Han, Im-Yong Kang and Jang-Myung Lee, "Implementation of Spreader Pose Control Using Dual-Electric Compasses", IEEE Sensors Journal, Vol. 9, No. 1, pp.69-70, January 2009.
- [10] JAMES E. LENZ, "A Review of Magnetic Sensors", Proceedings of the IEEE, Vol. 78, No. 6, June. 1990.
- [11] Kyung Moon Lee, and Jang Myung Lee, "Magnetic-interference-free dual-electric compass", Sensor and Actuators, vol.120, 23thFebruary, 2005.
- [12] 하현욱, 이장명, "단일 가속도 센서에 의한 모바일 역진자 제어", 제어 로봇 자동화 시스템학회 논문지, 제16권, 제5호. pp.440-445, May, 2010.
- [13] Kimberly Tuck, "Tilt Sensing Using Linear Accelerometers", Freescale Semiconductor, jun. 2007.
- [14] Seong Yun Cho, and Chan Gook Park, "Tilt compensation algorithm for 2-axis magnetic compass", IEEE Electronics letters, vol. 39, no. 22, 30thOctober,2003.
- [15] 고재평, 강웅기, 김양환, 이장명, "동적 간섭 자기장에 강인한 전자컴퍼스", 제어자동화 시스템공학 논문지, 제11권, 제1호. pp.27-33, 1, 2005.
- [16] R. Racz, C. Schott, "Electronic compass sensor", Sensors 2004, Proceedings of IEEE, vol.3, pp. 1446-1449, Oct, 2004.
- [17] J. E. Lenz, "A review of magnetic sensors," Proceedings of the IEEE, vol.78, Issue 6, pp. 973-989, Jun, 1990.
- [18] 환순신, 정희석, 이장명, "Dual compasses를 이용한 스프레더의 자세 제어 Spreader Pose Control", 제어 로봇 시스템공학 논문지, 제13권, 제9호. pp.861-867, 2007.
- [19] M. J. Caruso, "Applications of magnetic sensors for low coas compass system", in Proc. IEEE Symp. Position Location and Navigation, March 2006.
- [20] 정정호, 박병욱, 김학윤, "고정밀 저항의 전기적 특성 분석에 관한 연구", 한국정보기술학회 하계학술 학술 발표 논문지, 2006.

저 자 소 개



박 계 도 (朴 癸 度)

2010년 진주산업대학교 전자공학과 졸업. 2010~현재 부산대학교 대학원 로봇협동과정 석사과정 재학 중. 관심분야는 지능 제어, 마이크로프로세서 응용제어, 풍력 발전.



이 장 명 (李 章 明)

1980년 서울대학교 전자공학과 공학사. 1982년 서울대학교 전자공학과 공학 석사. 1990년 University of Southern California 공학박사. 1993년~현재 부산대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 지능로봇 시스템 제어, 특수 환경 Localization 및 Navigation, 마이크로프로세서 응용