

회전각 검출용 3축 수직 Hall 센서

Three Branches Vertical Hall Sensor for Rotation Angle Detection

이지연¹, 남태철^{1,a}

(Ji-Yeon Lee¹ and Tae-Chul Nam^{1,a})

Abstract

A three branches vertical Hall sensor for detecting rotation angle of brushless motor has fabricated. The sensor is constructed three branches of 150 μm width and 300 μm distance from central electrode to Hall electrode. Each branch has one Hall output and one Hall input. The central electrode acts as common driving input. According to rotation angle change of brushless motor, sensor gives three position signals phase shifted by 120°. The sensitivity of sensor is 200 V/A · T at magnetic field of 0.1 T and constant driving current of 1 mA. It has also showed three sine waves of Hall output voltages with 120° phase over one motor rotation. The noise can limit sensor's resolution. We have measured sensor's noise characteristics. The detectable minimum magnetic field is 20 μT at driving current 1 mA, measured frequency 1 kHz and bandwidth(Δf) of 1 Hz.

Key Words : Contactless brushless motor, Vertical hall sensor, Rotation angular position, Noise characteristic

1. 서론

최근 산업현장에서는 각종 장치 및 시스템들이 첨단화되면서 고정밀도의 제어가 필요한 고성능 센서의 개발이 절실히 요구되고 있다. 이러한 요구에 부응하여 여러 응용 분야에 이용되는 센서들 중에서 자기센서 또한 오랫동안 중요한 역할을 담당하고 있다. 특히, 자기센서는 비접촉식 측정의 특징을 이용한 자기 기록 매체 판독, 카드나 지폐의 자성 무늬 식별, 변위 또는 속도 측정, 스위치, 회전수 측정 등에 많이 응용되고 있다[1-4]. 최근에는 소형 모터와 같은 회전체의 회전 정보를 획득하기 위한 Hall 센서의 연구가 활발히 진행되고 있다[5]. 소형화, 고속화되고 있는 정밀 소형 모터의 제어를 효과적으로 수행하기 위해서는 모터의

회전 속도, 위치, 회전각 등의 정보를 실시간으로 정확하게 검출하여야만 하며, 기존의 1차원 센서에서 벗어나 2차원 또는 3차원의 Hall 센서가 필요하게 된다[6,7]. 실제로 F. Burger 등은 360°의 회전각도의 위치를 매우 정밀하게 측정할 수 있는 3차원 Hall 센서를 제안하였으며 이를 이용한 모터의 회전 제어 성능을 개선할 수 있는 방안이 연구되고 있다[8,9]. 회전체 중에 brushless 모터가 소형으로 많이 사용되므로 모터의 제어 부분에서 회전에 관한 정보를 제공하기 위한 수직 Hall 센서가 brushless 모터에 사용된다.

본 연구에서는 축의 폭이 150 μm 이고, 중앙 전극에서 Hall 전극 사이의 거리가 300 μm 인 3축 수직 Hall 센서를 제작하여 특성을 분석하였다. 제작된 센서를 사용하여 비접촉식 회전각 검출을 위한 검출시스템을 구현하고 이를 이용하여 실제로 brushless 모터를 구동하여 모터의 회전각 변화에 따른 각 축의 120°의 위상차에 따른 세 가지 신호의 자계를 검출하였다. 또한 센서의 잡음 특성을 실험하여 측정이 가능한 최소 자장도 분석하였다.

1. 영남대학교 전자정보공학부

(경북 경산시 대동 214-1)

a. Corresponding Author : tcnam@yu.ac.kr

접수일자 : 2005. 6. 3

1차 심사 : 2005. 7. 13

2차 심사 : 2005. 8. 17

심사완료 : 2005. 8. 18

2. 센서의 설계

일반적으로 brushless 모터는 120° 의 위상차를 갖는 사인파형의 교류 전원에 의해 동작한다. 이러한 120° 의 위상차를 갖는 사인파형의 교류를 만들기 위하여 모터의 회전축에 영구 자석을 고정시켜 자계의 방향이 회전축에 수직이 되게 하고 그 밑에 Hall 센서를 위치시킨다. 자석은 센서표면에 평행하게 자계를 형성하게 하여, 센서의 감지방향과 정확히 일치시킨다. 센서의 구조는 그림 1에 나타난 것과 같이 120° 씩 3개의 축으로 수직 Hall 센서를 형성하였다. 자석이 회전할 때 축 위의 Hall 센서는 자동적으로 120° 의 위상차를 갖는 3 종류의 신호를 출력한다. 이것은 직접 모터 구동 신호로 이용된다. 이 원리는 모터 제어용 회로 구성을 아주 간단하게 할 수 있다는 장점이 있다. 각각의 축 위의 감지 부분은 수직 Hall 센서의 1/2 부분에 해당된다. 감지 부분을 일반 수직 Hall 센서의 1/2 부분씩 이용함으로써 센서 시스템의 크기를 크게 줄일 수 있다. 그림 1에서 각 축의 중앙에 있는 전극이 Hall 단자들이다.

그림 2에서는 brushless 모터를 제어하기 위한 각 위치 센서로 사용되는 3축 수직 Hall 센서의 자기 검출 원리를 나타내었다. 모터가 회전하는 축과 동일한 방향으로 영구자석을 장착하고 영구자석 평면에 수평으로 3축 수직 Hall 센서를 고정시켜 모터 축과 영구자석, 센서 축의 정렬을 맞추었다.

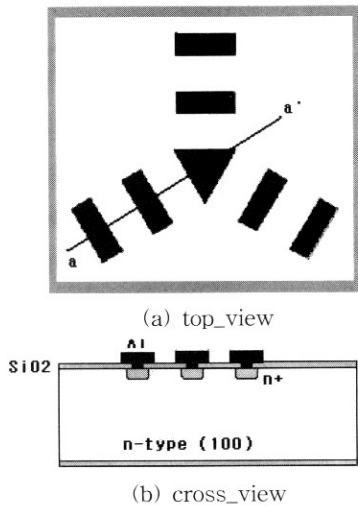


그림 1. 3축 수직 Hall 센서의 구조.

Fig. 1. Structure of the three branches vertical Hall sensor.

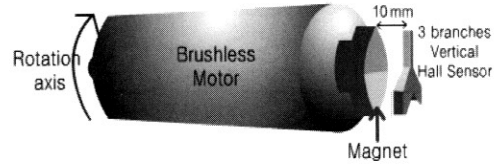


그림 2. 모터의 회전각 검출원리.

Fig. 2. Detection principle of motor rotation angle.

3. 제작 및 실험 결과

3.1 3축 수직 Hall 센서의 제작

수직 Hall 센서인 경우, 센서의 형상조건, 즉 센서의 활성화 영역의 폭과 중앙 전극과 Hall 전극 간의 거리가 센서의 감도를 개선하는데 영향을 미치게 된다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 형상조건 및 전자계 시뮬레이션 툴을 이용하여 최적의 형상비를 지니는 수직 Hall 센서를 제작할 수 있었다. 소자의 특성은 소자의 폭보다 Hall 전극 간의 거리, 즉 각각의 축의 길이 비에 의한 영향이 더욱 크게 나타났다. 실제로 이에 대한 시뮬레이션 결과, 센서의 전극 간의 거리 즉, 축의 길이가 증가함에 따라 캐리어의 편향이 증가하다가 일정거리 이상이 되면 감소하는 양상을 나타내게 된다. 이러한 결과, 축의 폭이 $150\ \mu\text{m}$ 이고, 중앙 전극에서 Hall 전극 사이의 거리가 $300\ \mu\text{m}$ 인 수직 Hall 소자를 120° 로 배치한 구조를 지니도록 설계하였다. 또한, 수직 Hall 소자의 특성상 나타나는 벌크 내부의 편향 과정에서 캐리어의 최대 확산 깊이에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이는 제작되는 소자에서 깊이 방향으로 형성되는 n-well의 깊이를 최적화하기 위한 과정으로 인가된 전류 및 전압 조건에 대하여 캐리어가 수직방향으로 확산하는 양상을 관측하였다. 이를 위하여 외부에서 인가되는 자계의 변화를 $0 \sim 1000\ \text{G}$ 의 범위로 설정하고 일반적인 수직 Hall 소자의 구동조건과 유사하게 공급되는 전류를 $1\ \text{mA}$ 로 고정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

이 결과, 캐리어의 수직방향의 확산 깊이는 약 $10\ \mu\text{m}$ 미만으로 나타났으며 실제 소자를 제작하는 경우 n-well의 깊이도 $10\ \mu\text{m}$ 를 초과하여 제작할 필요가 없음을 알 수 있었다. 이상과 같이 설계된 3

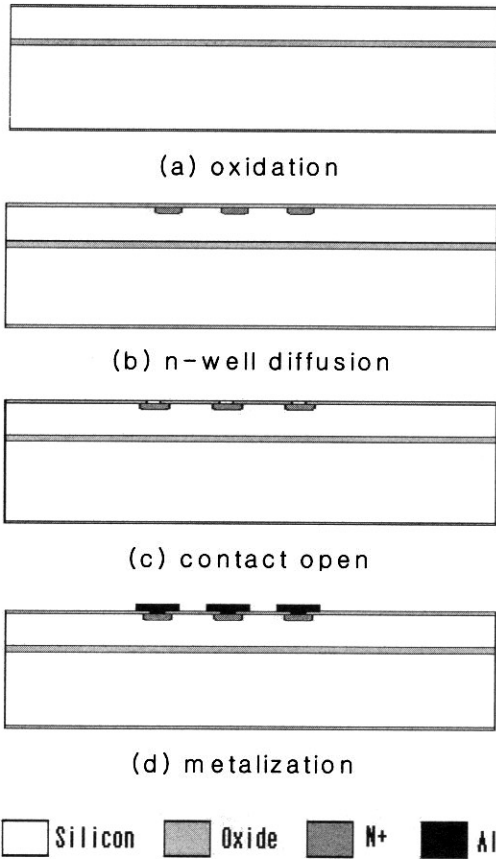


그림 3. 제작 공정도,
Fig. 3. Overall process flowchart.

축 수직 Hall 센서의 마스크 패턴을 설계하고 이를 이용하여 센서를 제작하였으며, 각 4단계의 마스크 스텝을 사용하였다. 먼저 510 ~ 530 μm 두께의 n-type (100) 실리콘 웨이퍼를 준비하여 1050 $^{\circ}\text{C}$ 에서 열산화법을 이용하여 약 60 분 동안 산화시켜 7000 \AA 두께의 SiO_2 층을 형성하였다. 다음으로 형성된 SiO_2 층에 120 $^{\circ}$ 의 각도를 지니는 센서의 영역을 구성하기 위하여 첫 번째 마스크를 이용한 식각 공정을 거쳐 n-well을 형성하였다. 두 번째 마스크를 이용하여 외부 금속과 음 접촉을 형성하기 위하여 n^+ 전극부를 형성하였다. 세 번째 마스크를 이용하여 전극을 개방하여 주었으며 네 번째 마스크를 이용하여 외부와의 연결을 위한 금속전극을 형성하기 위하여 스퍼터링 방법으로 5000 \AA 두께의 Al 층을 증착시킨 후 Al 식각액으

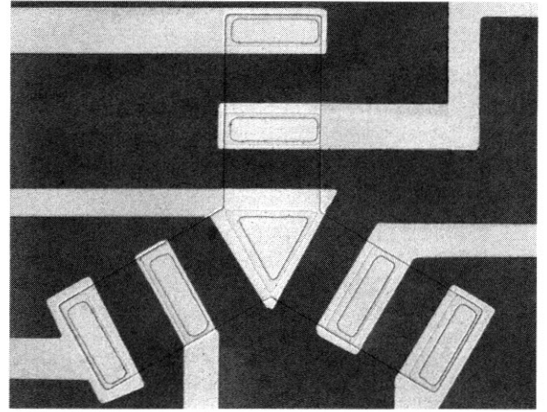


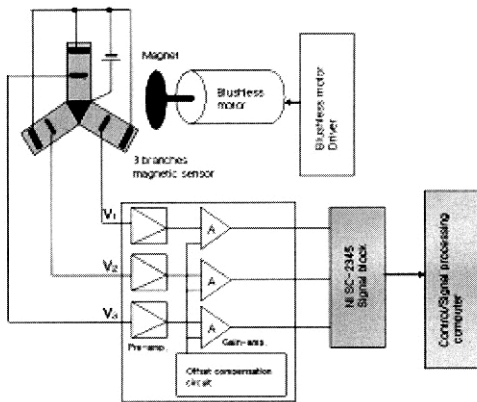
그림 4. 제작된 센서의 사진.
Fig. 4. Photograph of fabricated sensor.

로 에칭을 하였다. 제작된 센서를 에폭시를 이용하여 차폐시키고 금속선을 연결한 후 패키징하였다. 센서의 단계별 제작 공정을 그림 3에 나타내었다.

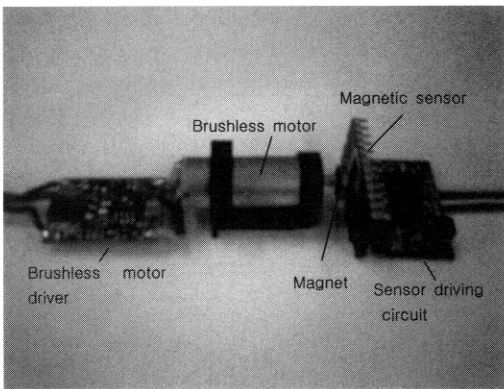
제작된 센서의 사진을 그림 4에 나타내었으며, 3개의 수직 Hall 센서가 정확하게 120 $^{\circ}$ 씩 위상차를 갖는 구조로 형성되어 요구되는 3축의 위상 검출이 가능함을 알 수 있다.

3.2 측정 및 실험결과

제작된 센서를 사용하여 비접촉식의 회전각 검출을 위한 검출시스템을 구현하고 이를 이용하여 제작된 3상의 자계 검출용 센서의 전자기적 특성을 측정하고, 실제로 brushless 모터를 구동하여 모터의 회전축의 각도 변화에 따른 3축의 출력 결과를 측정하였다. 이를 위하여 그림 5(a)에 나타난 것과 같은 측정 시스템을 구성하였다. 먼저, brushless 모터를 제어하기 위한 회전수 제어용 회로를 제작하여 속도가변기능을 부여하고 각각의 속도에서 정속회전이 가능하도록 하였다. 이때 brushless 모터의 회전축에 앞서 그림 2에서 나타난 것과 같은 방식으로 영구자석을 설치하고 모터가 회전하는 경우 영구자석이 같이 회전하여 자장의 변화를 센서에 인가할 수 있도록 하였다. 이때, 3상의 출력을 동시에 나타내므로 출력의 효과적인 검출 및 처리를 위하여 NI 사의 data aquisition system 및 LabView 프로그램을 이용하여 실시간으로 data를 측정하고 이때 얻어지는 결과를 분석할 수 있도록 하였다.



(a) schematic diagram



(b) experimental setup

그림 5. 회전각 측정용 시스템 (a) 개략도, (b) 실험장치.

Fig. 5. The rotation angle measurement system, (a) schematic diagram, (b) experimental setup.

이상의 실험장치의 구성을 그림 5(b)에 나타내었다.

위의 실험 장치를 이용하여 측정을 실시한 결과 센서의 감도 및 분해능은 옴셋에 의존하고 있음을 알 수 있다. 제작된 센서의 옴셋을 측정하여 그림 6에 나타내었다. 여기에서 나타난 것과 같이 센서의 옴셋은 구동전류를 1 mA로 인가하였을 때 약 2 mV로 높게 나타남을 보여 주었다. 옴셋은 미약한 출력을 증폭하는 과정에서 출력 신호와 함께 증폭되므로, 옴셋을 보상해 주지 않으면 센서의 감도를 저하시키는 요인이 되므로 필히 보정하여야 한다[10-12].

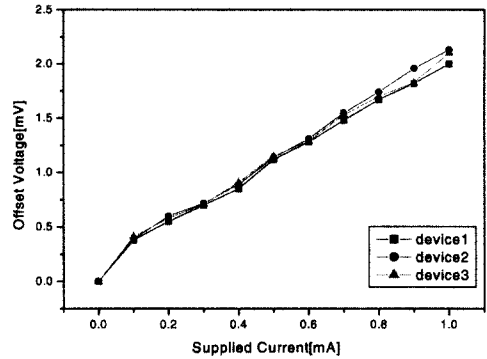


그림 6. 센서의 옴셋 전압.

Fig. 6. Offset voltage of sensor.

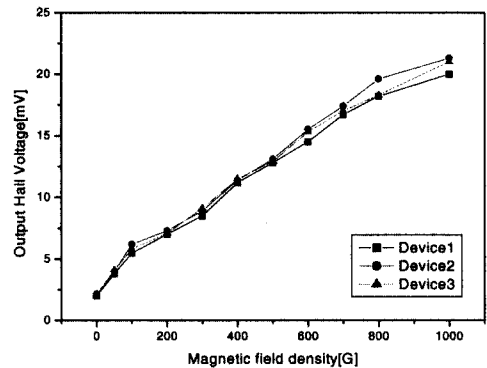


그림 7. 인가자계의 변화에 대한 출력 Hall 전압의 변화.

Fig. 7. Hall voltage depending on the applied magnetic field.

또한 자계에 대한 출력 Hall 전압의 변화를 그림 7에 나타내었다. 자장을 0.1 T까지 인가하면서 이때 출력되는 Hall 전압의 변화량을 측정된 결과로 제작된 센서가 선형성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 제작된 센서의 감도는 200 V/A · T로 나타났다.

최소 자장 측정을 위하여 10 mm 두께의 Al 재료의 차폐 구조로 이루어진 차폐상자(shielding box) 내부에 제작된 3축 자기센서 및 구동을 위한 정전류원 부를 제작하여 넣고 밀봉하여 외부 잡음의 유입을 최소화한 후 자기센서 내부에서 발생하는 잡음의 영향을 관측하였다. 측정 장비로는 HP

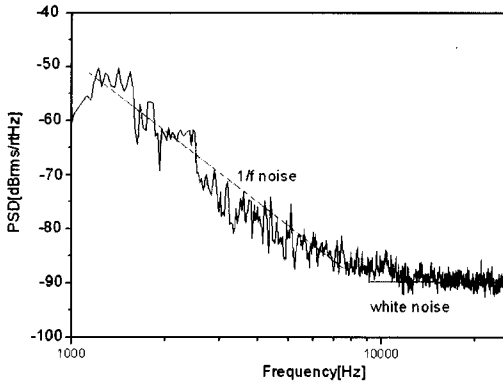


그림 8. 센서의 잡음 특성.
Fig. 8. Sensor's noise characteristics.

5670A Dynamic signal analyzer를 이용하였으며, 이에 내장된 PSD(Power Spectral Density) 측정기능을 사용하여 자기 센서의 출력전압의 PSD를 측정하였다. 이때 소자는 1 mA의 구동전류를 공급하고 무자계시 및 1 kG 인가시의 특성을 측정하여 최소 측정 자장을 계산하였다. 중심주파수 f 및 S/N 비를 1로 가정하면, 최소 측정 자장 B_{min} 은 식(1)과 같이 계산된다.

$$B_{min} = \sqrt{S(f)\Delta f} \quad (1)$$

여기서, $S(f)$ 는 PSD로 단위는 V^2/Hz 가 되며, Δf 는 밴드폭이다.

결과적으로 식(1)을 사용하여 사용주파수에서의 PSD 및 자기센서의 감도에서 검출 가능한 최소 자장을 얻을 수 있다. 측정된 3차원 자기센서의 잡음특성을 그림 8에 나타내었으며, 이것은 Hall 소자의 대략적인 사용범위인 0 Hz ~ 25 kHz 범위에서의 PSD 성분을 나타내고 있다. 그림 8의 PSD 특성은 전형적인 Hall 소자의 PSD 개형을 나타내고 있으며 잡음의 성분이 거의 1 kHz ~ 2 kHz 범위의 저주파 영역에 집중됨을 알 수 있다. 실제 측정에서는 구동전류는 1 mA, 측정주파수는 1 kHz, 주파수 분해능(Δf)은 1 Hz로 하였다. 이 경우의 PSD는 $-43.6 \text{ dB}_{rms}/\sqrt{Hz}$ 이었으며 제작된 자기센서의 감도가 200 V/A·T임을 고려하면 최소 측정 자장은 20 μT 로 나타난다.

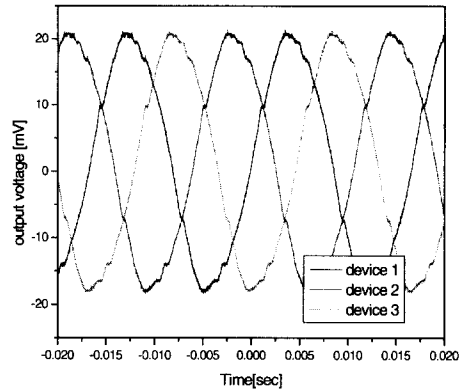


그림 9. 모터 회전에 대한 출력특성.
Fig. 9. Output characteristics of motor rotation.

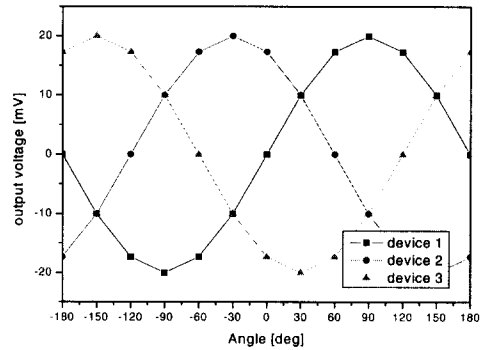


그림 10. 회전각에 대한 출력특성.
Fig. 10. Output characteristics of motor rotation angle.

제작된 센서를 이용하여 brushless 모터의 회전에 따른 검출 결과를 그림 9와 그림 10에 나타내었다. Brushless 모터가 회전함에 따라 부착된 자석이 회전하는 경우 3축 센서에 자장이 360° 회전하면서 변화하게 되는데 이때 나타나는 출력신호를 측정하여 회전각을 측정할 수 있다. 먼저 자장을 0.1 T로 인가하고 구동전류를 1 mA로 일정하게 인가하는 경우 제작된 센서의 출력은 형상 조건에 부합하여 거의 120°의 위상차를 보였다. 이것은 세 출력신호에서 정확하게 위상이 이동된다는 것을 증명하는 것으로 모터 제어에 응용될 수 있다는 것을 나타낸다. 그림 9는 3상의 출력 신호를 오실로스코프로 측정하여 그 결과를 나타낸 것이다. 또한 회전 중에 얻어진 데이터를 이용하여

각각의 3축에 대한 회전각에 따른 출력특성을 분석한 결과를 그림 10에 나타내었다.

4. 결 론

Brushless 모터의 회전각을 검출하기 위한 3축 수직 Hall 센서를 제작하여 특성을 분석하였다. 제작된 센서는 축의 폭이 $150\ \mu\text{m}$ 이고, 중앙 전극에서 Hall 전극 사이의 거리가 $300\ \mu\text{m}$ 이며, 패키징된 감지부가 $2.5 \times 3\ \text{mm}^2$ 인 센서이다. 자계를 0.1 T로 일정하게 인가하고 구동전류를 1 mA로 인가하는 경우, 센서의 감도는 $200\ \text{V/A} \cdot \text{T}$ 이다. 이것은 모터가 회전하면서 120° 의 정확한 Hall 출력 특성을 보여주므로써 모터 제어에 이용될 수 있다. 제작된 센서의 검출한계를 측정하기 위하여 센서의 잡음 특성을 실험하였다. 구동전류가 1 mA, 측정주파수가 1 kHz, 밴드폭(Δf)이 1 Hz인 경우 센서의 최소 측정 자장은 $20\ \mu\text{T}$ 로 나타났다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 제작된 3축 수직 Hall 센서는 감도에 대한 특성이 우수하며 brushless 모터의 회전각 검출용으로 사용되기에 충분함을 알 수 있었다. 앞으로 센서의 제작 공정과 검출 회로 시스템을 보완하여 brushless 모터뿐만 아니라 여러 적용분야에서 응용되도록 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고 문헌

- [1] J. E. Lenz, "A review of magnetic sensors", Proc. of the IEEE, Vol. 78, No. 6, p. 110, 1990.
- [2] R. S. Popovic, J. A. Flanagan, and P. A. Besse, "The future of magnetic sensors", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 56, Iss. 1-2, p. 39, 1996.
- [3] K. Mohri, T. Uchiyama, and L. Panina, "Recent advances of micro magnetic sensors and sensing application", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 59, Iss. 1-3, p. 1, 1997.
- [4] T. Nakamura and K. Maenaka, "Integrated magnetic sensors", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 22, Iss. 1-3, p. 762, 1990.
- [5] R. S. Popovic, "Hall Effect Devices", Adam Hilger, p. 194, 1990.
- [6] M. Paranjape, L. M. Landsberger, and M. Kahrizi, "A CMOS-compatible 2-D vertical Hall magnetic-field sensor using active carrier confinement and post-process micro-machining", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 53, Iss. 1-3, p. 278, 1992.
- [7] M. Paranjape, I. Filanovsky, and L. J. Ristic, "A 3-D vertical hall magnetic-field sensor in CMOS technology", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 34, Iss. 1, p. 9, 1992.
- [8] F. Burger, P.-A. Besse, and R. S. Popovic, "New fully integrated 3-D silicon hall sensor for precise angular-position measurements", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 67, Iss. 1-3, p. 72, 1998.
- [9] F. Burger, P.-A. Besse, and R. S. Popovic, "New single chip hall sensor for three phases brushless motor control", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 81, No. Iss. 1-3, p. 320, 2000.
- [10] Ed Ramsden, "Hall Effect Sensors: Theory & Application", Advanstar Communications, p. 31, 2001.
- [11] H. Blanchard, C. de R. Iseli, and R. S. Popovic, "Compensation of the temperature-dependent offset drift of hall sensor", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 60, Iss. 1-3, p. 10, 1997.
- [12] C. Schott, "High accuracy analog hall probe", IEEE Trans. Instr. Meas., Vol. 46, No. 2, p. 613, 1997.