

다축힘센서의 노이즈신호 개선을 위한 신호처리 방법

김용찬*(건국대 대학원 기계공학과), 강철구(건국대 기계공학과),
남현도(단국대 전기전자컴퓨터공학부)

Signal Processing Method for Noise Reduction of Multi-Axis Force Sensors

Y.- C. Kim (Mechanical Eng. Dept., Konkuk Univ.), C.-G. Kang (Mechanical Eng. Dept., Konkuk Univ.)
H.-D. Nam (EECS, Dankook Univ.)

ABSTRACT

There are always some errors in force sensing of multi-axis force sensors that aggravate sensor performance. Error sources may be classified mainly in two groups. One is structural error due to inaccuracy of sensor body, and the other is error due to noise signals existing in the sensed information. This paper presents a brief review about the principle of multi-axis force sensors, and then a method that can reduce the effect of noise signals. The method is to read digital signals in computer instead of analog voltage signals. We can eliminate the bad effect of electromagnetic waves emitted from computer and of 60 Hz noise emitted from AC source by the proposed method.

The proposed method is investigated through experimental demonstration. The experimental results show the proposed method improves the sensor performance significantly.

Key Words : Signal Processing (신호처리), Noise Reduction (노이즈 제거), Multi-axis Force Sensor (다축힘센서), Electromagnetic Wave (전자파), Microcontroller (마이크로컨트롤러), LabVIEW (랩뷰)

1. 서론

다축힘센서에서 감지된 힘정보는 오차를 수반하고 있다. 이 오차는 여러 가지의 원인에 의하여 발생하는데, 크게 센서 몸체의 부정확성에 기인하는 구조적 오차와 저전압신호를 처리하는 과정의 노이즈에 기인하는 오차로 구성되어 있다. 다축힘센서의 구조적 오차는 설계를 잘 함으로써 어느 정도 줄일 수 있으나 완전히 피할 수는 없다. 이러한 구조적 오차는 컴플라이언스 행렬 (compliance matrix)을 이용하여 상당히 줄일 수 있으며, 이에 대한 연구는 참고문헌들[1-4]에서 이미 잘 수행되어 있다. 하지만 노이즈신호에 기인한 오차는 연구가 더 필요하다.

로봇을 사용하는 공정에 있어서 로봇의 힘제어, 특히 로봇 말단장치의 힘제어는 가공물 혹은 피조립물의 보호나 로봇자체의 보호를 위해 필수적이고, 로봇이 좀더 인간의 감각에 가까워 질 수 있도록 할 수 있다. 그런데 이러한 힘제어를

위해서는 힘을 측정할 수 있는 6 축 힘/토크 센서가 필요하다. 보통 힘센서를 로봇 손목에 장착하는 방식을 많이 사용하고 있는데, 이 경우에 센서 자체의 동역학적 영향을 작게 받도록 하기 위하여, 센서의 정확성을 유지하는 범위 내에서 센서를 소형화하여야 한다. 이러한 견지에서 스트레인게이지를 이용한 6 축 힘/토크 센서가 관심의 대상이 되고 있다.

스트레인게이지를 이용한 6 축 힘/토크 센서는 탄성 구조물에 스트레인게이지를 부착하여 탄성 구조물의 표면변형률을 측정하고, 이로부터 힘을 계산해낸다. 탄성구조물의 변형률은 작은 범위 내에서 가해진 힘에 비례한다고 볼 수 있다.

1990 년대에 들어와서 힘/토크 센서의 체계적인 설계 방법들이 제시되었다. Uchiyama et al. [5] 은 컴플라이언스 행렬의 상태수(condition number)를 다축힘센서의 성능지수로 사용할 것을 제안하였고, Nakamura et al.[6]은 상태수 대신에 스트레인게이지 감도(strain gauge sensitivity), 힘감도(force

sensitivity)와 최소강성도(minimum stiffness)를 성능지수로 사용할 것을 제안하였다. Bicchi[7]는 컴플라이언스 행렬의 상태수를 정방행렬이 아닌 경우로 확장하여 성능지수로 사용할 것을 제시하였다.

본 논문에서는 원구멍이 있는 십자형 탄성구조물, 스트레인게이지, Wheatstone 브리지 등으로 구성된 6 축 힘센서의 원리를 간단히 정리하고, 노이즈신호에 의한 센서성능의 악영향을 줄일 수 있는 디지털신호 통신방법을 제시하고, 이를 실험연구를 통하여 검증한다.

다축힘센서는 어떤 방식을 이용하든지 간에 저전압신호를 증폭하여 힘정보를 얻게 된다. 이 과정에서 유용한 신호에 각종 노이즈신호가 첨가되고 이 노이즈신호가 증폭되면서 S/N 비가 나빠지게 된다. 이러한 노이즈신호는 다양한 소스에 의하여 발생하지만 가장 두드러진 것은 컴퓨터를 비롯한 각종 전자기기에서 나오는 전자파(electromagnetic wave)와 60Hz의 AC 전원에 의해 발생한다. 따라서 힘센서의 정도를 향상시키기 위해서는 이러한 오차를 줄일 수 있는 방안이 필요하다.

본 논문에서는 스트레인게이지를 이용한 6 축 힘센서의 전압신호를 컴퓨터로 읽어 들이는 과정에서 발생하는 노이즈신호를 줄이고 힘감지 성능을 향상시키기 위하여 센서측에 마이크로 컨트롤러를 부착하여 애널로그신호를 디지털신호로 바꾸고 이를 컴퓨터로 읽어 들임으로써 위에서 언급한 노이즈의 영향을 개선해보고자 한다. 어셈블러 프로그래밍을 한 다음 PIC 마이크로 컨트롤러에 다운로드하고, 이로부터 6 채널의 센서신호를 디지털화하고, 이를 컴퓨터의 I/O 카드로 읽어 들여서, 기존의 애널로그 방식에 비하여 어느 정도 노이즈의 영향을 개선할 수 있는지를 해석한다. 해석을 위한 GUI는 Windows 환경에서 National Instruments 사의 LabVIEW를 활용한다.

2. 다축힘센서의 힘감지 원리

다축힘센서는 대체로 센서내부에 있는 탄성 구조물의 탄성변형을 측정한다. 다음, 탄성변형과 힘의 선형 관계식으로부터, 센서에 작용하고 있는 세 방향의 힘과 세 방향의 토크(또는 그것의 일부)를 구하는 것이다.

탄성구조물의 거동이 재료의 탄성한계 이내에 있다고 하면, 내부 탄성구조물의 표면변형률과 센서에 작용하는 외력은 다음과 같은 선형적인 관계를 가진다.

$$Cf = \epsilon \quad (1)$$

여기서 f 는 센서에 작용하는 3개의 힘성분과 3개의 모멘트성분으로 구성된 힘벡터이고, ϵ 은 탄성 구조물의 6 지점에서 측정되는 표면변형률벡터이고, C 는 이 두 벡터 사이의 관계를 표시하는 컴플라이언스 행렬이다. 컴플라이언스 행렬은 상수행렬로서, FEM 해석으로부터 얻을 수 있으나, 실험에 의하여 구하는 것이 힘감지오차를 줄일 수 있다. 일차독립인 6개의 힘 f 에 대해 6번의 실험을 수행하고, 이때 얻어지는 ϵ 으로부터 C 를 얻을 수 있다. 그런 다음 임의의 힘이 주어지면 측정되는 ϵ 값과 C 의 역행렬로부터 식 (1)의 관계식을 이용하여 힘 f 를 구할 수 있다. 이 컴플라이언스행렬을 사용함으로써 탄성구조물에 필연적으로 존재하는 축간의 커플링효과를 제거할 수 있다.

이 때 측정되는 힘 f 는 ϵ 의 측정오차와 C 의 오차의 영향으로 구조적인 오차를 수반한다. 즉, 참값에 대한 측정된 힘의 상대오차 $\|\Delta f\|/\|f_0\|$ 는 변형률 상대오차 $\|\Delta \epsilon\|/\|\epsilon_0\|$ 과 컴플라이언스 행렬의 상대오차 $\|\Delta C\|/\|C_0\|$ 를 합한 것에 대략 컴플라이언스행렬의 상태수 $c(C)$ 를 곱한 것만큼 증폭되어 나타난다는 것이 알려져 있다[1-3].

다축힘센서의 힘정보 생성과정을 블록선도로 표시하면 Fig. 1과 같다.

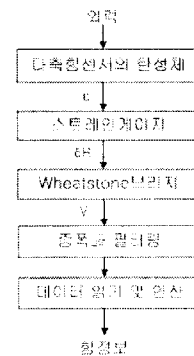


Fig. 1 Functional diagram of force-sensing procedure

3. 노이즈신호 개선

다축힘센서에서 센서성능은 구조적인 오차와 더불어 힘정보에 존재하는 노이즈신호에 큰 영향을 받는다. 센서본체는 로봇손목에 부착되는 등의 공간적 제약으로 크기가 제한되고 따라서 그 안에 장착할 수 있는 일렉트로닉스도 제한된다. 본 연구실에서 개발한 기존의 다축힘센서는 이러한 제약으로 인하여 센서본체에서는 6개의 Wheatstone 브리지와 증폭기만 내장하고, 증폭기에서 오는 애널로그 전

압신호를 컴퓨터의 I/O 보드를 통해 읽어서 힘정보를 추출하고 있다. 이 때 전원에서 오는 60 Hz의 노이즈와 컴퓨터가 방출하는 전자파에 의한 노이즈로 인하여 감지된 힘정보가 많이 흔들리는 경향이 있다.

이를 개선하기 위하여 본 연구에서는 증폭기에서 나오는 전압신호를 컴퓨터 외부에서 디지털 숫자신호로 바꾸어준 다음 이를 병렬통신으로 컴퓨터가 읽게 한다. Fig. 2는 실험장치의 개략도를 보여주고 있다.

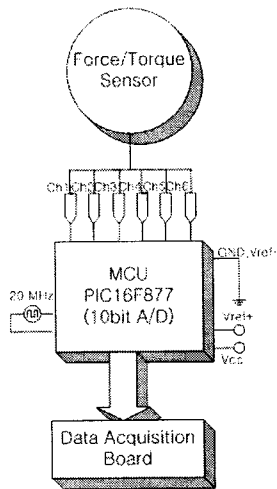


Fig. 2 Schematics of the experimental setup for digital data acquisition

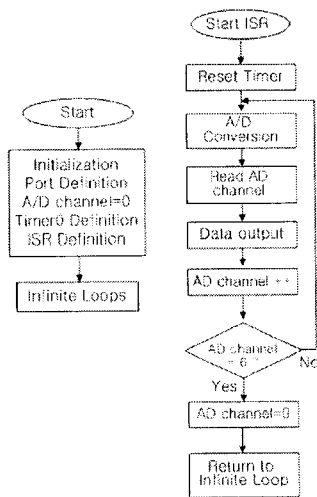


Fig. 3 Flowchart of a microcontroller program

본 연구에서는 Microchip사의 8 비트 PIC16F877 마이크로컨트롤러를 사용하여 센서에서 오는 6 채널의 아날로그 전압신호를 10 비트 A/D 컨버터로 컴퓨터 외부에서 매 200 μ sec 마다 디지털신호로 바

꾸게 하였다. 이 디지털신호를 컴퓨터 PCI I/O 보드로 LabVIEW 소프트웨어의 소프트웨어 타이머를 사용하여 매 6 msec 마다 읽는다. 본 연구에서 실행한 마이크로컨트롤러의 어셈블리 프로그램의 순서도는 Fig. 3 과 같고, LabVIEW 프로그램은 Fig. 4 와 같다.

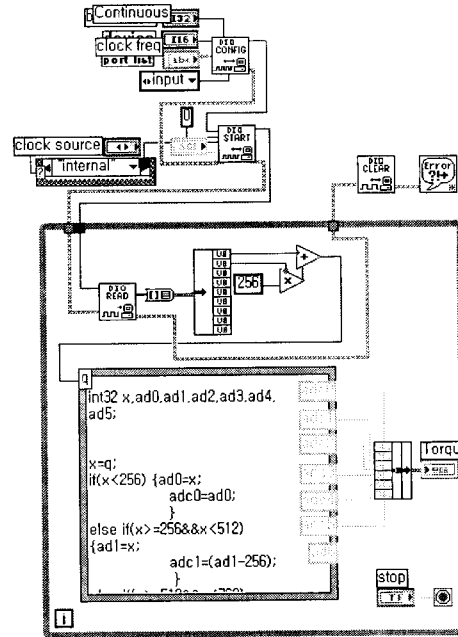


Fig. 4 LabVIEW program for data reading and plotting

4. 실험결과 및 논의

본 절에서는 힘정보에 실린 노이즈신호의 영향이 어떻게 개선되는지를 해석하였다. 먼저 x 방향으로 10 kg의 힘을 주었을 때 생성되는 아날로그 전압신호를 컴퓨터에서 직접 읽어 들였을 때 6 채널의 전압신호는 Fig. 5와 같다. 동일한 신호를 3절에서 제안한 방법으로 읽어 들였을 때 6 채널의 신호는 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 전압은 읽은 숫자를 다시 전압으로 환산한 것이다. 이 그림들은 LabVIEW 창에서 자동으로 생성된 것을 화면캡처한 것이다. 이것과 더불어 여러 방향의 힘과 모멘트를 주었을 때의 결과를 분석하여 보면, 아날로그 전압신호를 읽어 들일 경우에 S/N 비는 약 2.5이다. 같은 조건에서 디지털 신호로 변환한 다음 읽어 들일 경우에 S/N 비는 약 100이다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법으로 신호를 처리함으로써 약 40배의 S/N 비 향상을 얻을 수 있었다. Fig. 7은 6 채널의 신호로부터 컴플라이언스 행렬을 통째로 얻은 센서의 출력값이다. Fig. 5는 100 msec 동안의 데이터

값을 보여주고 있고, Fig. 6 과 Fig. 7 은 1000 msec 동안의 데이터 값을 보여주고 있다. Fig. 7 에서 가장 위쪽의 흰 선이 F_x 성분이다. 이 Fig. 7 에서 F_x 이외의 성분이 약간 존재하는 것은 주로 센서에 힘을 가할 때 부정확성에 기인한다.

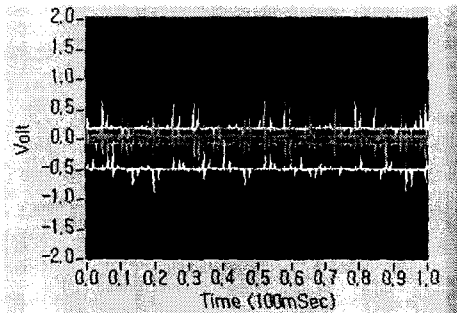


Fig. 5 Experimental 6 channel values when 10kg_f is applied in x direction (analog data acquisition)

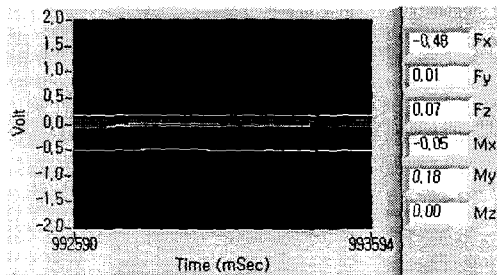


Fig. 6 Experimental 6 channel values when 10kg_f is applied in x direction (digital data acquisition)

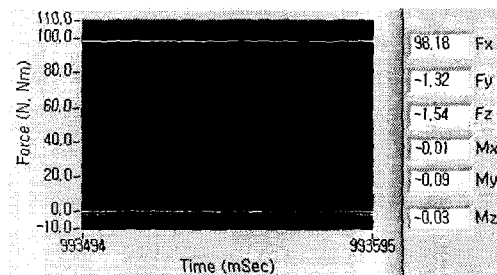


Fig. 7 Force sensor output when 10kg_f is applied in x direction (digital data acquisition)

5. 결론

본 연구에서는 다축힘센서의 성능을 저하시키는 노이즈의 영향을 줄이기 위하여, 종래 애널로그 전

압신호를 컴퓨터가 읽던 것을 컴퓨터 외부에서 디지털 신호로 바꾸어 읽게 하였다. 컴퓨터 외부에서 전압신호를 마이크로컨트롤러 내부에 있는 10 비트 ADC 로 매 200 μ sec 마다 읽은 다음 이를 컴퓨터 내부의 I/O 보드에서 LabVIEW 를 통해 매 6 ms 마다 읽게 하였다. 그 결과 애널로그 전압신호를 읽을 때와 비교하여 S/N 비가 약 2.5 에서 100 으로 40 배 가량 향상되었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R01-2002-000-00124-0) 지원으로 수행되었습니다. 감사를 드립니다. 실험과 자료정리에 도움을 준 박철호군에게도 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Chul-Goo Kang, "Maximum Structural Error Propagation of Multi-Axis Force Sensors," JSME International Journal Series C-Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, Vol. 44, No. 3, pp. 676-681, 2001.
2. 강철구, "힘토크 센서의 힘감지 오차에 대한 해석," 대한기계학회논문집 A, 제 22 권, 제 7 호, pp. 1250-1257, 1998.
3. 강철구, "다축 힘센서에서 힘감지 오차의 전파," 대한기계학회논문집 A, 제 24 권, 제 11 호, pp. 2688-2695, 2000.
4. 김주용, 강철구, "원구멍이 있는 십자형 탄성체를 가진 6 축 힘-토크 센서의 변형률 해석," 한국정밀공학회지, 제 16 권, 제 2 호, pp. 5-14, 1999.
5. Uchiyama, M., Nakamura, Y. and Hakomori, K., "Evaluation of the Robot Force Sensor Structure Using Singular Value Decomposition," Advanced Robotics (Int. J. of the Robotics Society of Japan), Vol. 5, No. 1, pp. 39-52, 1991
6. Nakamura, Y., Yoshikawa, T., and Futamata, I., "Design and Signal Processing of Six-Axis Force Sensor," Proc. 4th International Symposium of Robotics Research, No. 1, pp. 75-81, 1988.
7. Bicchi, A., "A Criterion for Optimal Design of Multi-Axis Force Sensors," J. of Robotics and Autonomous Systems, Vol.10, No. 4, 1992.