Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (2014) 20(6):651-656
http://dx.doi.org/10.5302/J.ICROS.2014.13.1964 ISSN:1976-5622 eISSN:2233-4335

로봇 매니퓰레이터의 가속도 기반 외란관측제어를 위한 저가용 가속도 센서 보정 방법

A Compensation Method of an Accelerometer for an Acceleration-based Disturbance Observer Control of a Robot Manipulator

배 영 걸, 정 슬*
(Yeong-Geol Bae[1] and Seul Jung[1,*])
[1]Mechatronics Engineering Department, Chungnam National University

Abstract: This paper presents a compensation method for an accelerometer to measure acceleration data accurately when a robot manipulator moves slowly. Although the accelerometer works fine under the fast movement of a robot manipulator, low cost accelerometers provide relatively inaccurate acceleration data under slow movements. In order to correct the error of the sensor data in the slow motion, correction factors are obtained experimentally. Then those corrected data are used for the disturbance observer. Experimental studies of the position control of a robot manipulator are conducted by applying the DOB (Disturbance Observer) control using corrected acceleration data.

Keywords: disturbance observer, accelerometer, compensation, robot manipulator

I. 서론

로봇 산업이 대중화되고 다양해지면서 로봇에 대한 사람들의 관심이 높아지고 산업용으로 인식되었던 로봇이 서비스 로봇과 같이 일상생활의 범위 안으로 확대되고 있다[1]. 또한 로봇에 대한 기대치가 높아지면서 단순히 움직이기만 하는 로봇이 아닌 보다 다양한 기능을 갖춘 로봇에 대한 관심이 높아지고 있다. 기존에는 이동로봇을 이용한 정보 전달형 서비스 로봇이 많이 연구되었으나 최근에는 이동성에 매니퓰레이션 기능이 추가된 모바일 매니퓰레이터 형태의 서비스 로봇에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[2-4].

단순히 무거운 물건을 옮기는 기능을 하는 로봇이라고 여겨지던 매니퓰레이터가 이제는 가사지원 서비스 로봇에까지 적용되고 있다. 매니퓰레이터의 활용도가 증가하고 범위가 넓어지면서 제어에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 특히 가사지원 서비스 로봇의 경우는 상대적으로 복잡하고 좁은 실내 환경에서 운용되므로 다양한 자세로 작업이 가능해야하며 사람과 공존하는 공간에서 작업을 해야 하므로 안정된 매니퓰레이션 제어를 필요로 한다.

매니퓰레이터의 위치 제어 방법은 PID 제어, 중력보상 제어, 시간지연제어기 등 매우 다양하다. 특히 외란 관측제어 방법은 널리 알려진 강건 제어방법으로 외란의 영향을 줄이기 위한 많은 연구들이 진행되어 왔다[5-9]. 일반적으로 DOB 구조에서는 매니퓰레이터의 위치에 대한 가속도 값을 이용하게 되는데 이를 도출하는 방법으로 위치 데이터를 미분하는 방법을 많이 사용하고 있다. 그러나 이 방법은 미분에 의한 잡음 문제를 안고 있어 이를 해결해야 한다. 위치 데이터를 미분하는 방법을 대신하여 가속도 센서의 데이터를 직접 DOB에 적용하는 방법에 대한 연구도 진행되고 있다[10-12].

서비스 로봇에 적용되는 매니퓰레이터는 대부분 가속이나 감속이 크게 발생하는 작업을 수행하는 경우는 극히 적어 낮은 레벨의 가속도 데이터를 추출할 수 있는 센서가 필요하다. 그러나 이러한 로봇의 움직임의 범위를 모두

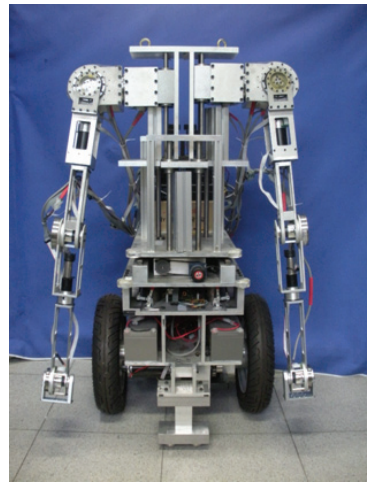

그림 1. 가사지원 서비스로봇.
Fig. 1. Home service robot.

* Corresponding Author
Manuscript received August 28, 2013 / revised January 2, 2014 / accepted April 2, 2014
배영걸, 정슬: 충남대학교 메카트로닉스공학과
(dinoyg@empal.com/jungs@cnu.ac.kr)
※ 본 논문의 일부는 2013 ICROS 학술대회에서 발표되었음.
※ 본 논문은 한국연구재단과 지식경제부의 융복합형 로봇전문인력 양성사업(NIPA- 2012-H1502-12-1002)지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

Copyright© ICROS 2014

포함할 수 있는 정도의 가속도 센서들은 특수한 용도로 분류되어 그 가격이 매우 높게 형성되어 있다.

본 논문에서는 가정이라는 작업 공간에서 매니퓰레이터의 위치 제어 성능을 향상시키기 위하여 가속도 센서를 이용한 DOB 구조를 적용하였다. 센서의 추가로 인해 발생하는 비용을 줄이고자 비교적 저가형 센서를 이용하는 방법에 대하여 연구하였다. 저가형 센서를 사용함으로써 발생하는 오차를 줄이기 위해 실험적인 분석을 통해 보정 계수를 찾았다. 보정된 계수값을 이용하여 보정된 가속도 데이터를 DOB에 적용함으로써 매니퓰레이터의 위치 제어 성능을 향상시키도록 하였다.

센서 보정 실험과 제어 성능 검증을 위해 그림 1에 보이는 가정용 서비스 로봇의 매니퓰레이터를 이용하여 위치 제어 실험을 수행하였다.

II. 가속도센서를 이용한 DOB 구조

1. 가속도센서를 이용한 외란관측기

그림 2는 로봇 매니퓰레이터의 위치 제어를 위해 사용된 DOB 제어구조를 나타낸다. 미분에 의한 가속도 정보를 사용하는 대신에 가속도 센서의 데이터를 직접 이용함으로써 가속도 정보에 대한 정확도를 높일 수 있다.

로봇에 입력되는 힘은 다음과 같이 표현된다[12].

$$\begin{aligned}\tilde{F}(t) &= \bar{F}(t) + F_D(t) \\ &= F(t) - \hat{F}_D(t) + F_D(t)\end{aligned} \tag{1}$$

여기서 $\hat{F}_D(t) = F_D(t)$이면 외란이 제거된 힘이 입력되어진다.

외란의 평가치는 다음과 같다. 관성 모델의 평가치를 $\hat{M}^*$ 이라 가정하면 외란은 다음과 같이 평가된다.

$$\begin{aligned}\hat{F}_D(t) &= K(\hat{F}(t) - F(t)) \\ &= K(\hat{M}^*(t)\ddot{x}(t) - F(t))\end{aligned} \tag{2}$$

여기서 K는 필터이다.

2. 미분에 의한 가속도와 센서 데이터 비교

그림 3은 매니퓰레이터를 제어할 때 나타나는 가속도 값을 나타낸 것으로 위치데이터를 기준으로 두 번 미분하여 추출한 가속도 값과 가속도 센서에서 측정된 가속도 값을 비교한 것이다. 가속도 센서의 데이터에 비해 미분에 의한 가속도 값은 잡음(파란색 실선)이 많은 성분들이 나타나고 있으며 이러한 부분들이 실제 매니퓰레이터의 제어 성능을 저하시키는 영향을 미친다.

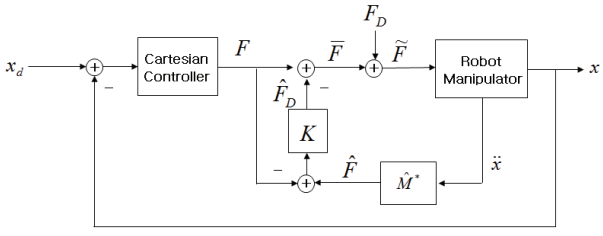

그림 2. 로봇 팔의 DOB 위치제어 블록.

Fig. 2. DOB Control block diagram for a robot manipulator.

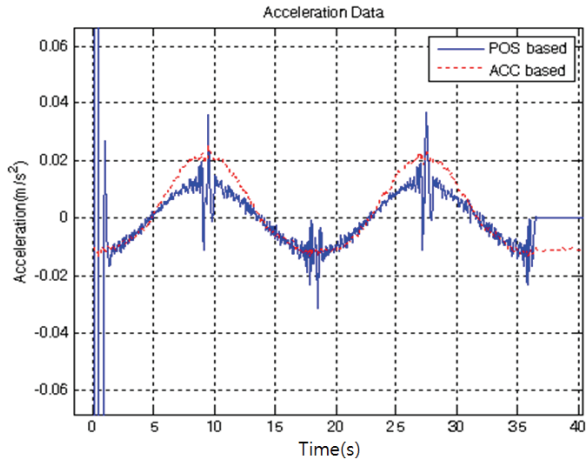

그림 3. 미분에 의한 가속도와 센서 데이터 비교.

Fig. 3. Acceleration by an accelerometer and differentiation.

III. 가속도 센서 선정 및 성능 실험

1. 센서검증실험

실험을 위해 휴먼 모션 센싱과 서비스로봇, 휴머노이드 로봇, 소형 무인기 등의 자세측정 시스템에 많이 사용되고 있는 마이크로인피니티 사의 XA3300 모델을 사용하였다.

XA3300은 자이로와 가속도계, 마그네틱 센서가 내장된 Evaluation Kit 형태의 초소형 6축 자세측정센서이다. 안정적인 롤, 피치, 요 자세정보와 3축 가속도, 각속도정보를 100Hz의 주기로 제공하면서도 상대적으로 저렴한 가격이 장점이다. 이 센서의 가속도 데이터의 신뢰도는 0.1g 이상에서 보장된다. 그러나 서비스로봇의 다양한 실험 결과 서비스 수행시에 예상되는 가속도의 범위는 최저 0.001g 까지도 내려간다. 따라서 본 논문에서는 실험을 통해 0.1g 이하의 범위에서 센서의 보정이 가능한지의 여부를 확인하였다. 표 1은 논문에 사용된 가속도센서의 성능을 나타낸 것이다.

가속도센서의 성능을 검증하고 센서 데이터의 한계점을 확인하기 위해 그림 4와 같은 위치제어 정밀도가 뛰어난 3축 산업용 로봇을 이용하여 다양한 가속도에 대한 센서 성능 시험을 수행하였다.

설정 가속도에 대한 실험 결과를 표 2에 비교하였다. 센서의 스펙에서 기준으로 공지된 0.1g 보다 빠른 실험에서는 비교적 정확한 가속도 값을 나타내고 있으나 0.1g 이하의

표 1. 가속도센서 사양.

Table 1. XA3300 performance characteristics.

Parameter	Condition	Value	m
Rate Input Range	Continuous	± 100	°/sec
	Instantaneous	± 300	°/sec
Acceleration Input Range	Continuous	± 1.7	G
	Instantaneous	± 1.7	G
Roll, Pitch, Heading Accuracy	Static Error	<0.5	°
	Dynamic Error	<2	°
	Heading Error	<1	°
Resolution		0.05	°
Bandwidth		20	Hz
Update Rate		< 100	Hz

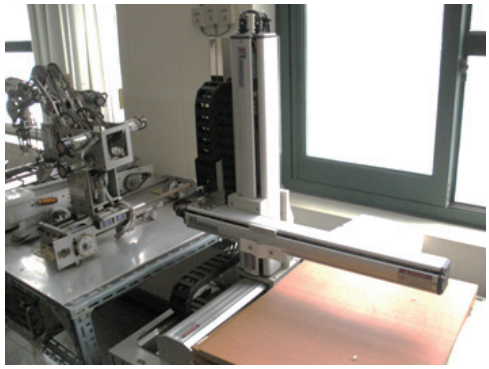

그림 4. 가속도센서 성능 검사를 위한 시스템.

Fig. 4. Accelerometer performance test system.

표 2. 실험 결과.

Table 2. Performance of test result.

Desired acceleration (g)	Experiment result (g)
± 0.3	± 0.3
± 0.15	- 0.15 / +0.18
± 0.1	- 0.11 / +0.14
± 0.075	- 0.09 / +0.12
± 0.05	- 0.06 / +0.12

실험에서는 확연히 정확도가 떨어지고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 실제 매니퓰레이터를 이용한 실험에서도 같은 결과가 나타나는지 실험하였다.

IV. 매니퓰레이터를 이용한 실험

1. 실험환경

그림 5는 매니퓰레이터의 위치 제어 실험을 위해 실제 매니퓰레이터에 가속도 센서를 부착하고 실험하는 모습을 나타낸 것이다.

서비스로봇의 매니퓰레이터는 6개의 Joint를 갖고 있지만 Joint 1과 Joint 4의 두 개의 조인트를 사용하여 평면에서만 움직이는 2축 매니퓰레이터 형태로 구성하였다. 1축에 대해 직선 운동을 할 수 있는 최소한의 조인트를 이용한 것이다.

그림 6은 매니퓰레이터를 제어하는 흐름을 나타내는 제어 구성도를 나타낸 것으로 주제어기인 DSP, 데이터의 저장을 위한 PC, 각 모터와 드라이버 및 엔코더로 구성된

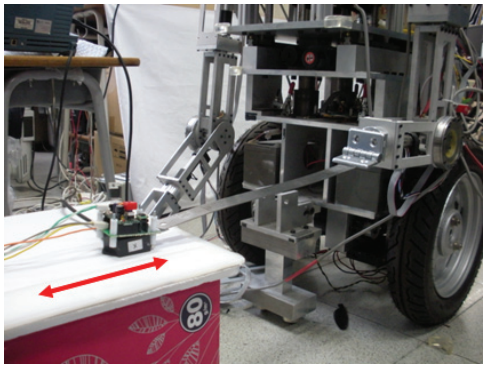

그림 5. 매니퓰레이터를 이용한 실험환경.

Fig. 5. Experimental setup of using a manipulator.

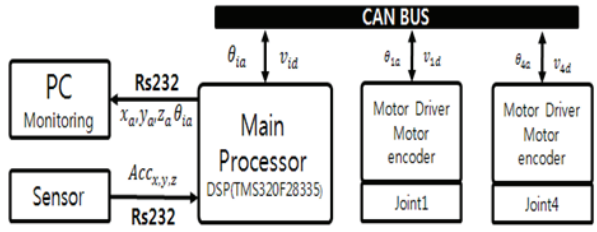

그림 6. 제어 하드웨어 구성도.

Fig. 6. Control hardware structure.

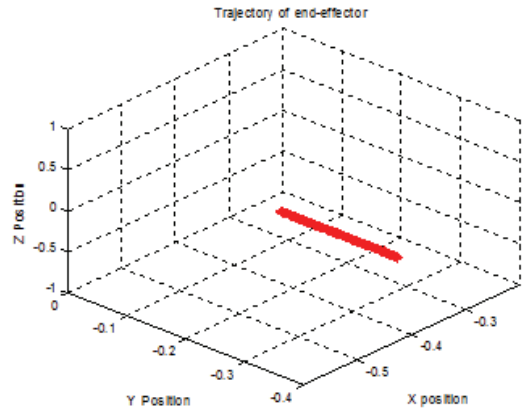

그림 7. End-effector 경로 설정.

Fig. 7. Trajectory generation of end effector.

구동 모듈, 그리고 가속도 센서로 구성되어 있다. 가속도 센서 데이터는 SCI통신을 이용하여 DSP에 전달되며 모터 모듈과 DSP는 CAN 통신을 통해 엔코더 데이터와 계산된 제어 출력을 주고받는다. DSP에서는 센서데이터와 엔코더 데이터를 기준으로 제어알고리즘을 실행하고 이러한 과정의 반복으로 각 조인트를 제어하게 되며 원하는 작업을 수행하게 된다.

2. 실험경로

그림 7은 2축 매니퓰레이터의 팔끝이 y축으로 약 200mm 직선 경로를 왕복하도록 설정한 경로를 나타낸 것이다. 식 (3)과 같이 가속과 감속이 모두 나타나는 간단한 경로인 코사인 함수 형태로 경로를 설정하였다.

$$y_d = y_0 + 0.1\cos(\Delta t\frac{\pi}{600}) - 0.1 \qquad (3)$$

$$\Delta t = 10ms, \quad y_0 = 0.196m$$

그림 5의 시스템을 이용하여 설정된 경로를 추종하는 실험을 수행하였다.

3. 가속도 센서 보정 전 실험 결과

그림 8은 경로의 최고 속도가 0.04m/s인 매우 느린 경우의 실험에서 얻어진 가속도이다. 각 조인트의 엔코더 데이터를 이용하여 역기구학을 통해서 산출된 위치데이터를 미분하여 실제의 가속도 데이터를 계산하였으며 끝단에 부착된 가속도 센서의 데이터와 비교한 것이다. 엔코더 기준의 데이터와 가속도 센서의 데이터 간의 차이가 매우 크게 나타났다.

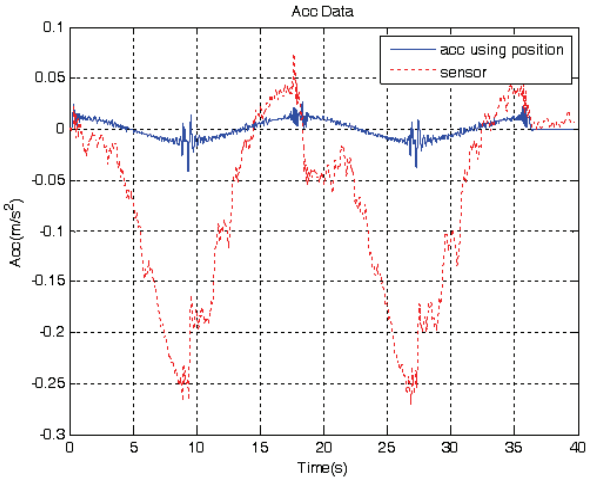

그림 8. 느린 속도 실험에서의 가속도 센서의 데이터.

Fig. 8. Data of accelerometer under slow motion.

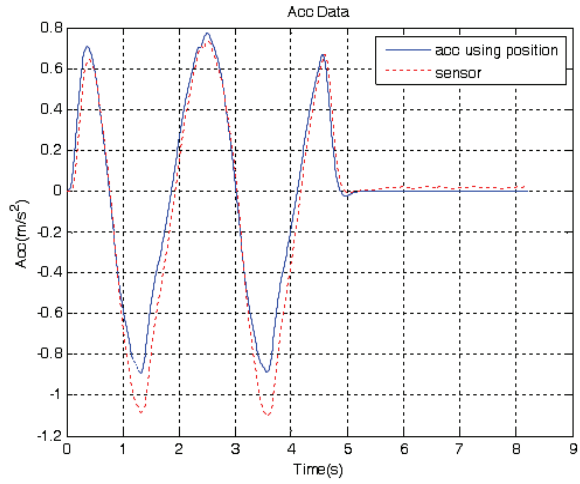

그림 9. 빠른 속도 실험에서의 가속도 센서의 데이터.

Fig. 9. Data of accelerometer on fast motion.

그림 9는 경로의 최고 속도가 0.28m/s인 빠른 움직임의 실험에서 얻어진 가속도이다. 가속도 센서의 데이터가 엔코더 기준의 데이터와 큰 차이를 보이지 않음을 확인할 수 있다.

이와 같이 매니퓰레이터를 이용한 실험에서도 산업로봇을 이용한 실험에서와 마찬가지로 빠른 가속의 경우에는 실제 가속도값에 비해 센서의 데이터가 정확한 값을 나타내주었으나 느린 움직임의 경우에는 오차가 크게 나타났다. 그림 8에서 보면 가속도의 경향은 같게 나타나지만 실제 데이터값은 차이가 많이 난다. 이러한 문제점을 해결하고자 반복적인 실험을 통해 느린 속도에서 가속도 센서와 실제 가속도 데이터의 선형성을 알아보았다.

4. 센서 보정

위의 실험에 사용된 센서는 비용의 최소화를 위해 선별된 저가형 센서로서 센서의 성능 범위가 매니퓰레이터의 움직임에 적용되는 가속도 값의 범위를 모두 포함하지는 못하고 있다. 위의 실험 결과와 같이 가속도의 크기에 따라

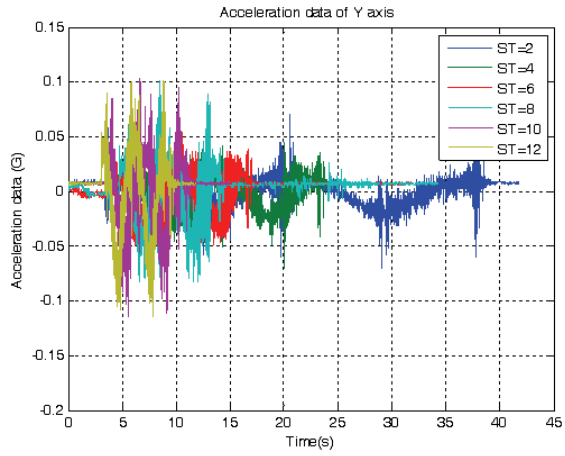

그림 10. 다양한 가속도 실험 데이터.

Fig. 10. Experimental data of various acceleration values.

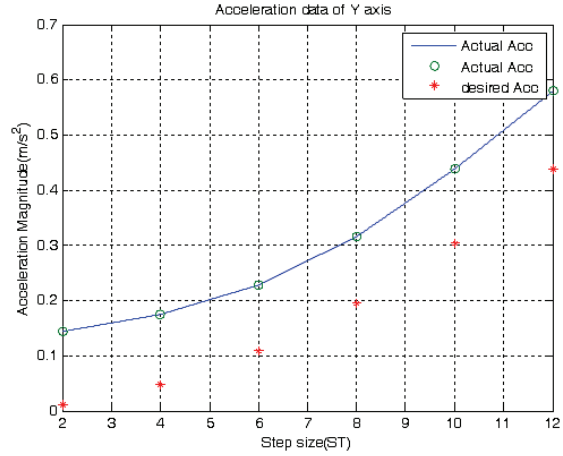

그림 11. 미분에 의한 가속도와 센서 데이터 비교.

Fig. 11. Data comparison between difference method and an accelerometer.

성능의 차이를 보이고 있으므로 이를 보정하는 작업이 필요하다. 보정을 위해서는 가속도의 크기와 센서 데이터의 관계를 파악하는 것이 필요하다. 그림 10은 이를 위해 동일한 경로에 대해 다양한 가속도 값을 적용하여 반복 실험한 데이터이다.

그림 11은 실제 가속도 데이터와 실험에서 얻어진 가속도 데이터를 비교한 것으로 Desired Acc는 원하는 경로를 정확하게 추종하였을 경우의 가속도 값이며 Actual Acc는 실험에서 실제로 측정된 센서의 가속도 값이다. 비록 실제 가속도 데이터와 오차를 보이고 있지만 가속도의 증감에 따라 선형적인 변화를 보이는 것을 확인하였다. 이와 같이 보정 가능성을 확인하였으며 반복적인 실험을 통해 다음과 같은 보정 계수와 바이어스를 설정하였다.

그림 12는 표 3의 보정계수와 바이어스를 이용하여 제어 알고리즘 내부에 식 (4)와 같이 적용하여 실험을 수행한 결과이다.

$$Acc_c = k_c \cdot Acc_s + b \tag{4}$$

표 3. 최대 속도에 따른 보정계수.

Table 3. Compensation gain in relation to maximum velocity.

최대속도(m/s)	보정계수(k_c)	bias(offset)
0.037	0.1	0.01
0.074	0.3	0.03
0.143	0.6	0.07
0.279	0.85	0.1

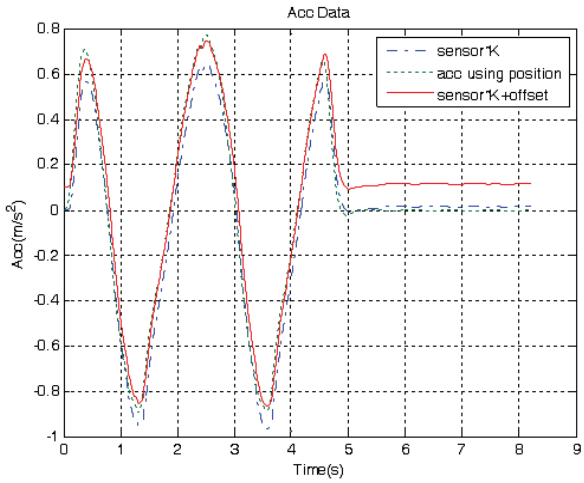

그림 12. 식 (4)를 적용한 보정 결과.

Fig. 12. Compensation result using equation (4).

Acc_s는 센서의 가속도 데이터, Acc_c는 보정된 가속도 데이터, k_c는 보정계수, b는 bias를 나타낸다.

식 (4)를 이용하여 보정한 결과는 그림 12에서 나타나듯이 경로 제어 중에는 실제 가속도 데이터와 매우 유사하게 나타나지만 움직임이 없는 상태(그림 12에서 5초 이후)에서 즉, 가속도 성분의 변화가 거의 없는 부분에서 바이어스의 영향을 받아 오히려 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이 문제점을 해결하기 위하여 식 (5)와 같이 시스템의 성능을 고려하여 보정 기준치를 적용하였다.

$$\begin{cases} \text{if } Acc_s > \epsilon\ , & Acc_c = k_c \cdot Acc_s + b \\ \text{if } Acc_s < \epsilon\ , & Acc_c = k_c \cdot Acc_s \end{cases} \tag{5}$$

ϵ는 바이어스 보정 기준치를 나타낸다.

그림 13과 그림 14는 식 (5)를 적용하여 보정하기 전과 보정한 후의 실험에서 나타난 가속도 데이터를 나타낸 것이다. 그림 14에서와 같이 경로 제어 중에는 물론이고 경로 제어가 끝난 후에도 보정된 가속도 센서의 값이 실제의 가속도 데이터와 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

5. 보정된 센서 값을 적용한 DOB 제어 실험 결과

그림 15는 표 3의 보정 계수와 식 (5)의 가속도 센서의 보정 함수를 적용한 DOB 알고리즘을 이용하여 매니퓰레이터의 위치 제어 실험을 한 결과를 PD제어기의 실험 결과와 비교하여 나타낸 것이다. DOB를 사용하는 경우에 제어 성능이 확연히 향상됨을 확인할 수 있다. 또한 그림 16은 센서 보정을 한 경우와 하지 않은 경우의 제어 결과 오차를 비교한 것으로 센서 보정이 실제 매니퓰레이터의

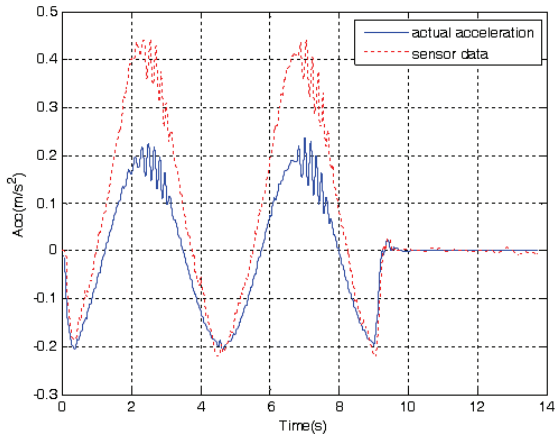

그림 13. 보정 전 가속도 데이터.

Fig. 13. Acceleration data before compensation.

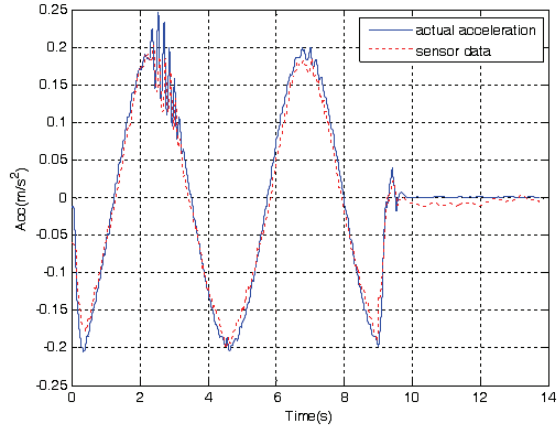

그림 14. 식 (5)를 적용한 후의 가속도 데이터.

Fig. 14. Compensation result using equation (5).

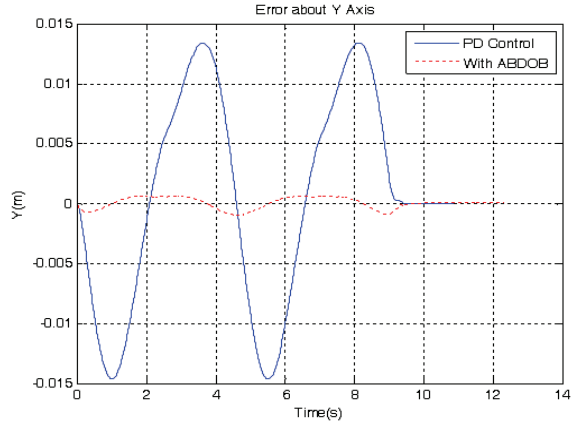

그림 15. 보정된 데이터를 이용한 DOB 제어 결과.

Fig. 15. Result of DOB using compensated data.

제어에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 센서 보정의 경우에도 추종 오차가 나타나는 것은 DOB에서 다른 동역학요소를 무시하고 관성만을 고려했기 때문으로 판단된다.

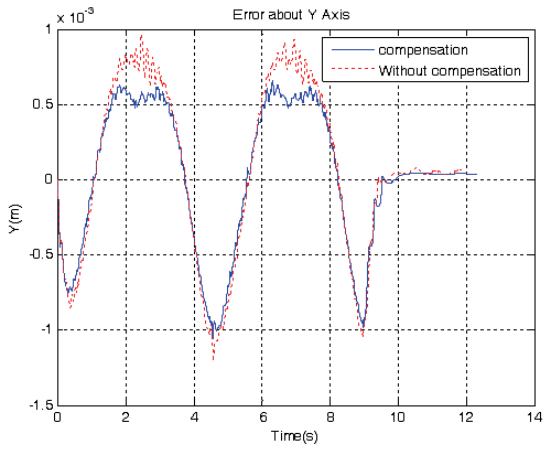

그림 16. 매니퓰레이터의 위치제어와 센서 보정의 관계.

Fig. 16. Relationship of the position control and the compensation of sensor.

V. 결론

본 논문은 서비스 로봇의 매니퓰레이션 제어 성능 향상을 위해 DOB 구조를 적용함에 있어 위치 데이터를 미분하는 방식을 대신하여 가속도 센서 데이터를 직접 DOB에 적용하는 방법에 대해 기술하였다. 시스템에 센서의 추가로 인해 발생하는 비용을 최소화하기 위하여 비교적 저가의 센서를 선정하였으며 센서의 성능 및 한계점을 실험을 통해 확인하였다. 또한 저가속의 움직임에서 나타나는 센서 데이터의 오차를 보정하기 위해 실험적으로 보정 계수를 추출하여 가속도 값을 보정하였다.

이와 같은 과정으로 보정된 가속도 센서 데이터를 이용한 DOB를 실제 개발된 매니퓰레이터 시스템에 적용하여 실험하였으며, 매니퓰레이터의 위치 제어 실험 결과를 일반적인 PD제어기와 비교하여 성능이 향상되었음을 확인하였다.

REFERENCES

[1] J. K. Ahn and S. Jung, “Implementation and control of an extendable and separable mobile robot manipulator for indoor service,” *Journal of IEEK*, vol. 48, SC, no. 1. pp. 38-46, Jan. 2011.

[2] H. Iwata and S. Sugano, “Design of human symbiotic robot TWENDY-ONE,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 580-586, May 2009.

[3] Y. G. Bae and S. Jung, “Design, implementation, and control of two arms of a service robot for floor tasks,” *Journal of IEEK*, vol. 50, no. 3, pp. 203-211, Mar. 2013.

[4] Y. Chen, L. Liu, M. Zhang, and H. Rong, “Study on coordinated control and hardware system of a mobile manipulator,” *World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp. 9037-9041, 2006.

[5] K. Ohnishi, M. Shibata, and T. Murakami, “Motion control for advanced mechatronics,” *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 1, no. 1, pp. 56-57, Mar. 1996.

[6] Y. G. Choi, K. J. Yang, W. K. Chung, H. R. Kim, and I. H. Suh, “On the robustness and performance of disturbance observer for second order systems,” *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 48, no. 2, pp. 315-320, Feb. 2002.

[7] H. Kobayashi, S. Katsura, and K. Ohnishi, “An analysis of parameter variation of disturbance observer for motion control,” *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 6, pp. 3414-3421, Dec. 2007.

[8] U. T. Kaneko and Y. Hori, “Robust servo system design with two degree of freedom and its application to novel motion control of robot manipulator,” *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 40, no 5, pp. 473-485, Oct. 1993.

[9] J. H. Back and H. B. Shim, “Design of nonlinear disturbance observer guaranteeing global stability and robust stability condition,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 12, pp. 1188-1193, Dec. 2011.

[10] S. H. Jeong, S. Jung, and M. Tomizuka, “Attitude control of a quad-rotor system using an acceleration-based disturbance observer: empirical approach,” *IEEE Conf. on AIM*, pp. 916-921, Jul. 2012.

[11] Y. G. Bae and S. Jung, “Control of a robot manipulator using a modified DOB,” *ICROS Daejeon-Chungchung Region Conference*, pp. 196-197, Dec. 2012.

[12] Y. G. Bae and S. Jung, “Compensation for position control of a robot manipulator using a modified DOB (Disturbance Observer) based on an accelerometer,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 5, pp. 462-467, 2013.

배 영 걸

2004년 충남대 메카트로닉스공학과 졸업. 2006년 동 대학원 석사졸업. 2009년~현재 충남대 메카트로닉스공학과 박사과정. 관심분야는 가정용 로봇, 매니퓰레이터, 힘 제어 응용.

정 슬

1988년 미국 웨인 주립대 전기 및 컴퓨터공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 및 컴퓨터 공학과 석사. 동 대학 박사. 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 지능 제어 시스템 및 지능 로봇 시스템, 다양한 밸런싱 메커니즘의 제어 및 응용, 유무인 수송체 시스템, 로봇교육.