Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (2013) 19(5):462-467
http://dx.doi.org/10.5302/J.ICROS.2013.13.8001 ISSN:1976-5622 eISSN:2233-4335

가속도 센서기반의 변형된 외란 관측기를 이용한 로봇 매니퓰레이터의 위치 제어의 보상

Compensation for Position Control of a Robot Manipulator Using a Modified Disturbance Observer (DOB) based on an Accelerometer

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

Abstract: This paper presents a modified disturbance observer (MDOB) for controlling two arms of a manipulator designed for a home service robot. The MDOB is slightly different from the original DOB in that it uses an accelerometer to measure acceleration of the robot arm. Then it uses the acceleration to estimate the disturbance to cancel out in the control loop. Relying on the acceleration information of the robot arm, a partial model-based control structure is formed. Experimental studies of position control of 2 DOF robot arm are conducted to evaluate the performance of the proposed position control by an MDOB method.

Keywords: disturbance, position control, service robot, modified DOB

I. 서론

최근 로봇의 동향은 자동차 산업에 사용되는 산업용 로봇에서 가정용 서비스로봇과 같이 일상생활의 범위 안으로 확대되고 있는 추세이다[1]. 산업로봇 팔의 단순한 물건 옮김(pick and place)기능에서 벗어나 효율적인 서비스를 위해 이동성을 갖춘 모바일 매니퓰레이터 형태의 서비스 로봇에 대한 많은 연구가 진행되고 있다[2-4].

가사 지원 서비스 로봇의 경우는 실내 환경에서 다양한 자세로 작업을 해야 하기 때문에 매니퓰레이션 기능이 매우 중요하게 대두된다. 가정용 로봇은 가정에서 다양하고 섬세한 작업을 수행하여야 하므로 손동작의 움직임이 매우 섬세하여야 한다[2].

산업로봇과 달리 가정용 로봇의 팔의 길이는 인간의 팔과 유사한 모습을 가지므로 팔의 설계 및 요구되어지는 기준 및 기능이 다르다. 만족할 만한 부하(payload)에 대한 로봇 팔의 크기의 제약은 상대적인 설계의 어려움을 동반한다[3].

또한 적절한 작업, 예컨대 물건을 잡고 옮기는 작업을 수행하기 위해서는 다양한 payload에 대한 정확한 위치제어의 성능이 요구된다. 로봇의 구동은 각 관절에서 이루어지지만 로봇의 작업영역은 3차원의 카테시안 공간을 기준으로 정의된다. 실제 로봇 시스템에서는 관절 공간과 작업공간과의 관계를 정의하는 자코비안이나 순기구학, 역기구학 등에서 오차가 발생하게 된다.

본 논문에서는 작업 공간에서 제어기를 구성하였으며, 위치추종제어의 성능 향상을 위해 DOB를 적용하였다. DOB는 외란에 대한 강건 제어기로 많은 형태의 연구들이 수행되어져 왔다[5-11]. DOB는 로봇이나 모터제어, 특히 하드디스크 제어 등에 많이 사용되고 있다. 하지만 DOB의 경우 시스템의 역모델이 필요하고 시간지연 연산에 의한 문제가 발생하여 만족할 만한 Q필터를 설계하는 어려움이 있다.

따라서 본 논문에서는 가속도 정보를 구하기 위한 두 번의 미분과정에서 발생하는 잡음을 방지하고 시간지연의 영향을 최소화하기 위하여 변형된 DOB구조를 사용하였다. 변형된 DOB는 크게 두 가지 장점이 있다. 하나는 미분에 의한 가속도 정보를 사용하는 대신에 가속도 센서를 이용하여 정확한 가속도 정보를 사용하는 것이다. 두번째는 외란을 평가하기 위해 시간지연된 토크, $\tau(t-1)$를 이용하는 대신에 현재의 토크, $\tau(t)$를 평가하여 이를 이용하는 것이다. 전체 동역학 식을 모델로 사용하지 않고 가속도 정보만을 DOB에 이용하여 위치제어의 오차를 보상하므로 제어 성능 향상의 가능성을 살펴보았다.

변형된 DOB의 제어 성능 검증을 위해 가정용 서비스 로봇팔의 다축 중에서 2축만을 사용하여 위치 제어 실험을 수행하였다.

II. DOB 구조

1. 기존의 DOB

일반적인 DOB 구조는 그림 1과 같다. DOB의 목적은 외란, $D(s)$가 있을 경우에 이를 모델링을 통해 구한 다음 서

* 책임저자(Corresponding Author)
Manuscript received February 28, 2013 / revised March 8, 2013 / accepted April 2, 2013
배영걸, 정슬: 충남대학교 메카트로닉스공학과
(dinoyg@empal.com/jungs@cnu.ac.kr)
※ 본 논문의 일부는 2012 대전 충청지부 학술대회에서 발표되었음.
※ 본 논문은 지식경제부의 융복합형 로봇전문인력 양성사업 (NIPA-2012-H1502-12-1002)지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

Copyright© ICROS 2013

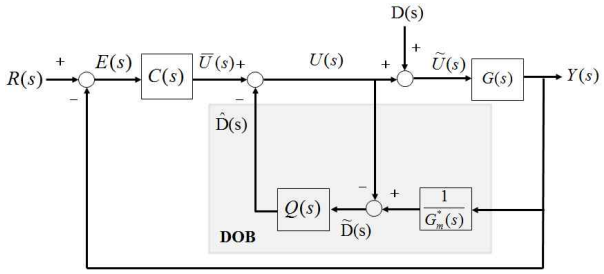


그림 1. 일반적인 모델 기반 DOB 구조.
Fig. 1. General structure of DOB.

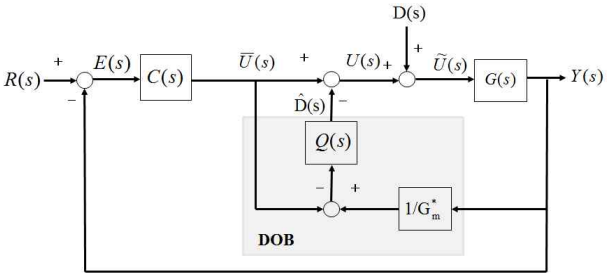


그림 2. 변형된 모델 기반 DOB 구조.
Fig. 2. Modified DOB structure.

로 상쇄시키는 것이다. 시스템 출력, $Y(s)$를 시스템의 역모델, $\frac{1}{G_m^*(s)}$을 통과시킴으로써 구한 외란의 평가치, $\hat{D}(s)$를 제어입력에서 빼 줌으로써 서로 상쇄시키는 것이다. 만약에 시스템의 모델이 정확하다면, 즉 $G_m^*(s) = G(s)$ 이면 외란은 다음과 같이 평가된다[4].

$$\begin{aligned}\hat{D}(s) &= Q(s)[\frac{1}{G_m^*(s)}Y(s) - U(s)] \\ &= Q(s)[\tilde{U} - U(s)] \\ &= Q(s)[D(s) + U(s) - U(s)] \\ &= Q(s)D(s)\end{aligned} \tag{1}$$

여기서 $Q(s)$ 필터를 크기가 1인 저주파 통과 필터로 선택을 하게 되면 $\hat{D}(s) = D(s)$로 외란을 정확하게 평가하게 된다.

일반적인 DOB는 구조상 한 주기만큼 지연된 토크값을 사용하게 되며 가속도 값을 추정하는 과정에서 두 번에 걸친 미분으로 값이 깨끗하지 않아 제어에 어려움을 겪는 경우가 있다. Q필터를 사용하여 성능을 높이지만 Q필터 설계에 어려움이 따른다.

2. 변형된 DOB

이러한 점을 고려하여 그림 2와 같이 현재 상태의 토크를 이용하고 가속도 센서를 이용하여 센서의 값을 직접 사용하는 구조를 제안한다. 그림 2의 구조에서는 외란을 평가하는데 있어 시간지연된 정보를 사용하지 않는 장점이 있다.

그림 2에서 보면 외란의 평가치는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\hat{D}(s) &= Q(s)[\frac{1}{G_m^*(s)}Y(s) - \overline{U}(s)] \\ &= Q(s)[\tilde{U} - \overline{U}(s)] \\ &= Q(s)[D(s) + U(s) - \overline{U}(s)] \\ &= Q(s)[D(s) - \hat{D}(s) + \overline{U}(s) - \overline{U}(s)] \\ &= Q(s)[D(s) - \hat{D}(s)]\end{aligned} \tag{2}$$

식 (2)로부터 정리하면 외란의 평가치는 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{D}(s) = \frac{Q(s)}{1 + Q(s)}D(s) \tag{3}$$

여기서 Q필터의 크기가 1보다 크면, $|Q(s)| \gg 1$이면 외란의 평가치가 다음과 같이 $\hat{D}(s) \cong D(s)$ 근사화가 된다. 그림 1의 DOB에서처럼 외란이 정확하게 평가되지는 않지만 Q필터의 크기, 즉 게인을 크게 하면 근사화 될 수 있다.

III. 로봇의 DOB 제어

1. 카테시안 공간 제어

그림 3은 매니퓰레이터의 제어에 일반적으로 많이 사용되는 조인트 공간에서의 제어 블록도이다. 원하는 경로는 카테시안 공간에서 정의되지만 실제 모터는 각 조인트의 회전각을 조절하는 구조로 되어 있기 때문에 기구학을 이용한 변환 과정이 필요하다. 이때 사용되는 기구학은 정기구학과 역기구학이 있으며 그림 3에서 보는 바와 같이 역기구학 과정을 통해 원하는 카테시안의 경로를 각 조인트의 회전각으로 변환하게 되며 엔코더의 신호를 피드백 받아 오차가 정의되고 이를 기준으로 제어가 이루어진다. 이때 로봇의 움직임에 대해 각 조인트의 회전각만이 검출되는데 검출된 회전각을 정기구학을 통해 변환하여 현재 로봇의 카테시안 좌표를 알아낼 수 있다.

그림 4는 본 논문에서 사용한 카테시안 공간에서의 제어 블록도이다. 제어기의 기준이 카테시안 좌표의 데이터이며 카테시안 제어기의 출력은 힘과 토크의 상관관계를 나타내는 자코비안을 이용하여 각 조인트를 제어하기 위한 토크로 변환되어 진다.

본 논문에서는 이러한 카테시안 공간의 제어방식에 새로운 DOB 방식을 적용하여 매니퓰레이터를 제어하는 방법을 기술하였다.

2. 카테시안 공간 DOB제어

본 논문에서는 그림 5와 같이 딜레이된 이전 샘플의 토크 값이 아닌 현재 제어기에서 출력되는 토크 값을 사용하는 방법을 제안함과 동시에 가속도 센서를 이용하여 센서의 가속도 데이터를 직접 사용하는 구조를 제안하였다. 이

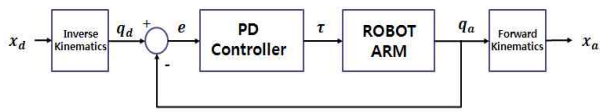


그림 3. 조인트 공간에서 로봇 팔의 제어.
Fig. 3. Joint Position control scheme of robot manipulator.

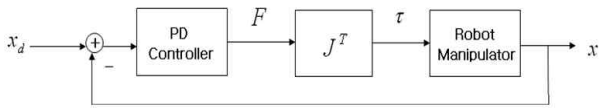


그림 4. 카테시안 공간에서 로봇의 제어.
Fig. 4. Cartesian position control scheme of robot manipulator.

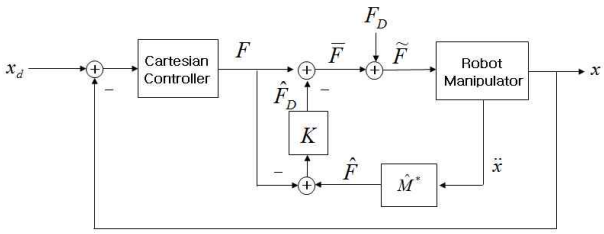


그림 5. 카테시안 DOB 제어 블록.

Fig. 5. Cartesian DOB Control block diagram.

러한 구조에서는 시간지연 성분을 배제함으로써 외란을 평가하는데 있어 시간지연된 정보를 사용하지 않는 장점이 있다.

가속도 센서를 시스템에 장착하여 가속도 데이터를 직접 센서로부터 피드백 받는 방법을 사용함으로써 시스템의 현재 가속도 값을 정확하게 얻을 수 있으며 가속도 데이터 추정을 위한 추가적인 구성도 필요가 없어 프로세서에서의 부담도 적다.

외란을 포함하는 카테시안 좌표계에서의 동역학식은 다음과 같다.

$$M^*\ddot{x}+h^*+F_D=F \tag{4}$$

여기서 $\ddot{x}$는 $n\times 1$ 카테시안 공간에서의 가속도이고 M^*는 $n\times n$ 카테시안 관성 행렬, h^*는 $n\times 1$ 카테시안 공간에서의 코리올리스와 중력텀이고 F_D는 $n\times 1$ 외란 힘, F는 $n\times 1$ 힘이다.

외란은 다음과 같이 표현된다.

$$F_D=F-M^*\ddot{x}-h^* \tag{5}$$

따라서 관성 모델의 평가치를 $\widehat{M^*}$ 이라 가정하면 외란은 다음과 같이 평가된다.

$$\begin{aligned}\widehat{F_D}&=F-\widehat{M^*}\ddot{X}-\widehat{h^*}\\&=F-\hat{F}-\widehat{h^*}\end{aligned} \tag{6}$$

본 논문에서는 그림 2에 나타난 것처럼 가속도 센서만을 사용하는 것으로 가정하였으므로 동력학 모델 $\widehat{h^*}$은 고려하지 않았다. 실제로 full 동역학 모델을 사용하면 시간지연제어 방식과 같은 구조가 된다.

그림 5는 가속도 센서 기반 DOB 제어 블록을 나타낸다.

IV. 실험

1. 서비스로봇

그림 6은 본 논문에서 DOB 알고리즘을 적용하기 위해 사용된 시스템으로 5자유도 양팔 매니퓰레이터의 전체 모습을 나타낸 것이다. 각 매니퓰레이터의 무게는 약 7kg 이며 payload 는 1.5kg/arm 이다. 표 1은 매니퓰레이터의 간단한 제원을 나타낸다.

2. 실험에 적용된 매니퓰레이터 구조

그림 7은 개선된 DOB (Modified DOB) 알고리즘을 적용한 실험에 실제로 사용된 시스템을 나타낸 것이다. Joint 1

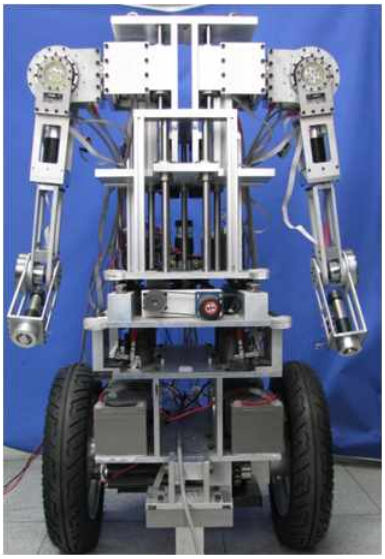


그림 6. 서비스로봇.

Fig. 6. Service robot.

표 1. 각 관절의 구동기의 제원.

Table 1. Specification of actuators for each joint.

관절	모터 사양	기어 및 하모닉드라이브	Range
1	Flat 90W	HarmonicDrive (160:1)	-180°~180°
2	Flat 90W	HarmonicDrive (160:1)	0°~180°
3	Flat 50W	Gear (156:1)	-180°~180°
4	Flat 50W	HarmonicDrive (160:1)	-135°~135°
5	powermax22 90W	Gear (190:1)	-180°~180°

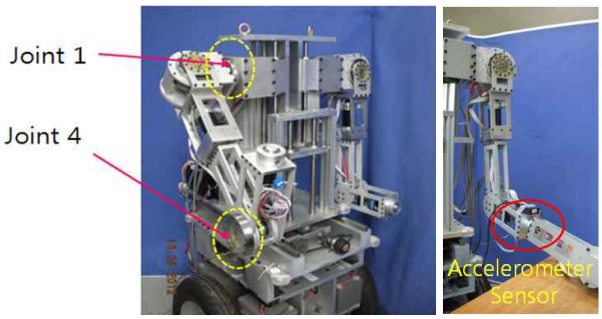


그림 7. 실험을 위해 재구성된 시스템.

Fig. 7. Manipulator for experiment.

과 Joint 4의 두 개의 조인트를 사용하여 평면을 움직이는 2축 매니퓰레이터 형태로 구성하였다. 이것은 end-effect의 움직임이 1축에 대해 직선 운동을 할 수 있는 최소한의 조인트를 이용한 것으로 제어에 영향을 줄 수 있는 외부적 요인을 최소화하기 위함이다.

3. 제어 하드웨어 시스템

매니퓰레이터를 제어하기 위한 시스템은 크게 주제어기인 DSP, 모니터링 및 데이터의 저장을 위한 PC, 그리고 각 모터와 드라이버 및 엔코더로 구성된 구동 모듈로 구성되어 있다. DSP에서는 기구학 해석 및 제어기의 출력을 계산하게 된다. 모터모듈과 DSP는 CAN 통신을 통해 엔코더 데

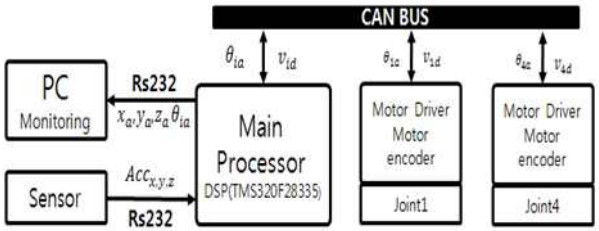


그림 8. 제어 하드웨어 구성도.

Fig. 8. Control hardware structure.

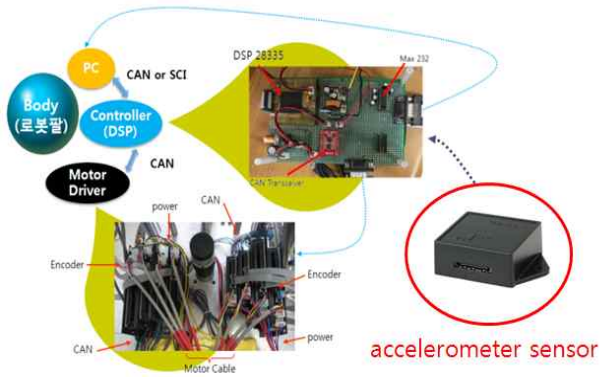


그림 9. 주제어기 및 전체 시스템 구현.

Fig. 9. Overall system.

이터와 계산된 제어 출력을 주고받는다. 이러한 과정의 반복으로 각 조인트를 제어하게 되며 원하는 작업을 수행하게 된다.

그림 8은 이러한 제어의 흐름을 나타내는 제어 구성도를 나타낸 것이며 그림 9는 실제 시스템에 구성된 주제어기 DSP와 맥슨 사의 모터드라이버와 센서의 모습을 보여주는 그림이다.

매니퓰레이터의 제어는 DSP와 motor driver 사이의 CAN 통신에 의해서 대부분 이루어진다. 매니퓰레이터의 주제어기로는 DSP28335 모델을 사용하였으며, CAN 통신을 위해 최대 1Mbps의 송수신을 지원하는 3.3V CAN 트랜시버 SN65HVD235D 모델을 사용하였다.

4. 실험결과

본 논문에서는 개선된 DOB (Modified DOB) 구조의 효과를 검증하기 위하여 PD 제어기와 PD제어기에 제안된 개선된 DOB (Modified DOB) 구조를 접목한 두가지 경우에 대하여 각각 매니퓰레이터의 end-effecor에 대한 위치제어 실험을 수행하였다. 또한 제어 성능의 일관성을 확인하기 위하여 다양한 속도로 실험을 수행하였다.

또한 제안된 DOB에 적용되는 그림 5의 K를 실험적으로 구하였다. 실험 결과에서도 K 값은 식 (3)에 기술된 바와 같이 그 크기가 클수록 제어 성능이 좋아지는 경향을 보였다. 그러나 일정 범위 이상을 벗어나는 경우 시스템이 불안정해지는 것을 확인하였으며 매니퓰레이션 속도에 따라 그 범위도 달라짐을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 다양한 속도의 실험에서 안정적인 결과를 보이는 값으로 K=12를 결정하였다.

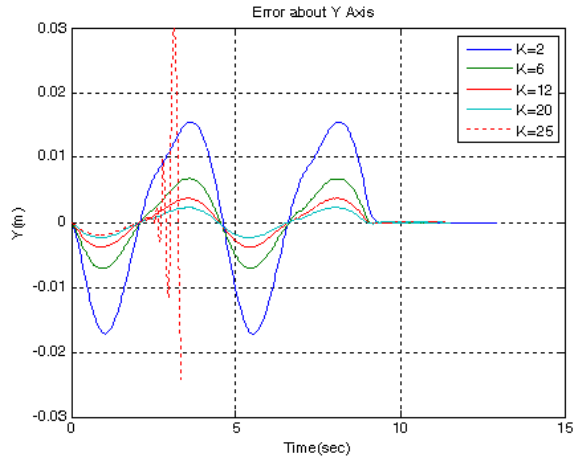


그림 10. K의 변화에 따른 제어 성능.

Fig. 10. Control performance according to K.

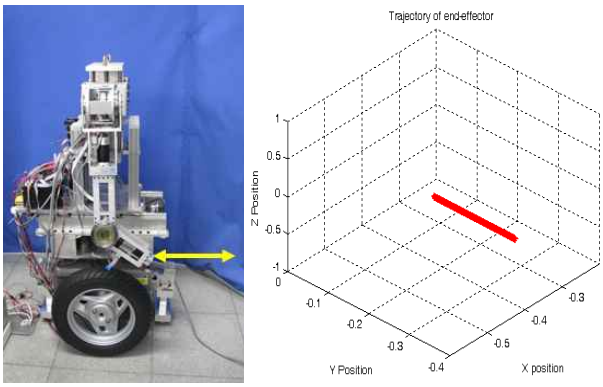


그림 11. End-effector 경로 설정.

Fig. 11. Trajectory generation.

그림 10은 K값의 변화에 따른 제어 성능 변화의 대표적인 예를 나타낸 그래프이다.

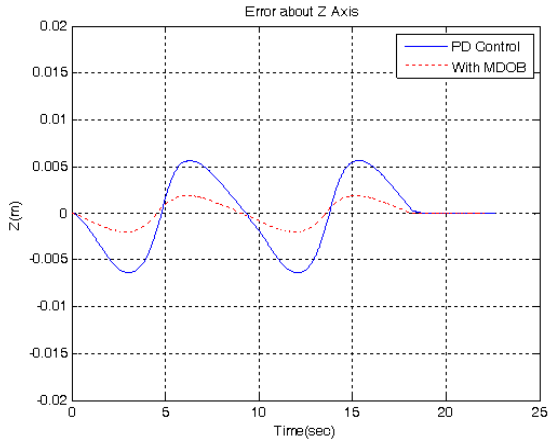
2축 매니퓰레이터를 이용하여 그림 11과 같이 팔끝이 y축으로 약 200mm 직선 경로를 왕복하도록 설정하고 경로를 추종하는 실험을 수행하였다. 식 (7)과 같이 가속과 감속이 모두 나타나는 간단한 경로인 코사인 함수 형태로 경로를 설정하였다.

$$y_d = y_0 + 0.1\cos(\Delta t \frac{\pi}{600}) - 0.1 \qquad (7)$$

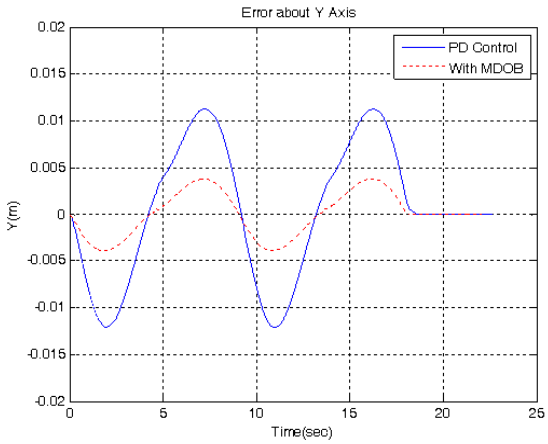
$$\Delta t = 10ms, \quad y_0 = 0.196m$$

그림 12는 PD제어기와 제안한 개선된 DOB를 이용하여 2축 매니퓰레이터의 위치 제어에 대한 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다. PD제어기의 결과와 비교하면 DOB를 사용하는 경우에 제어 성능이 2배 이상 향상됨을 확인할 수 있다. 단, Y축으로의 실험에서 Z축에 대한 오차가 발생하였으며 이는 제어 구조상 서로 커플된 형태의 제어이기 때문인 것으로 추정된다.

여기서 DOB를 사용하여도 오차가 나타나는 이유는 토크를 평가하는데 있어 다른 동역학 요소들은 무시하고 관성만 사용하였기 때문이다.



(a) Error of Z axis.



(b) Error of Y axis.

그림 12. 위치추종에 대한 실험 결과.

Fig. 12. Experimental result of position control.

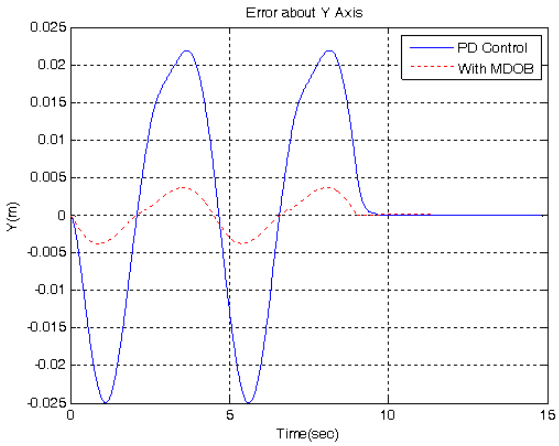


그림 13. Δt=8 인경우의 위치추종 실험 결과.

Fig. 13. Position control results when Δt=8.

그림 13와 15는 여러 가지 속도에 대한 실험 중 대표적인 두 가지 속도에 대한 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 실험 결과에서 PD제어기의 결과와 비교하면 두 가지의 다른 속도에서 모두 DOB를 사용하는 경우에 제어 성능이 2 배 이상 향상됨을 확인할 수 있다.

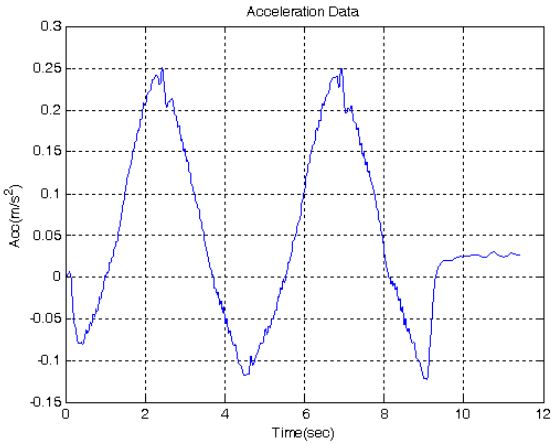


그림 14. Δt= 8 실험의 가속도 데이터.

Fig. 14. Acceleration when Δt= 8.

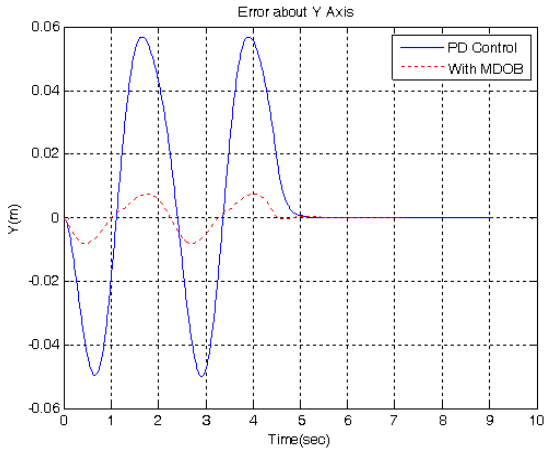


그림 15. Δt=16 인경우의 위치추종 실험 결과.

Fig. 15. Position control results when Δt=16.

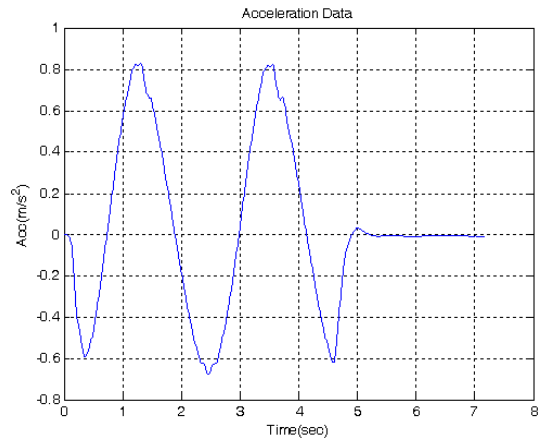


그림 16. Δt= 16 실험의 가속도 데이터.

Fig. 16. Acceleration when Δt= 16.

다만 예상과 달리 DOB를 사용하여도 오차가 남아있는 것을 확인할 수 있었는데 이것은 토크를 평가하는데 있어 다른 동역학 요소들은 무시하고 관성만 사용하였기 때문으

로 분석된다. 그림 14와 16은 제안된 개선된 DOB(Modified DOB) 구조를 적용하는 실험에서 제어에 사용된 가속도 센서 데이터를 나타낸 것이다.

V. 결론

본 논문은 서비스 로봇의 매니퓰레이션 제어 성능 향상을 위해 제안된 새로운 DOB 구조에 대해 기술하였다. 제안하는 DOB는 위치 데이터를 미분하는 방식을 대신하여 가속도 센서를 사용하여 직접 가속도 값을 피드백 받아 토크를 평가하였으며, 시간지연된 토크가 아닌 현재 시점의 토크를 사용하여 구조적으로 시간지연이 없이 나타나는 것을 볼 수 있다. 가속도 센서에 기반한 DOB를 실제 개발된 매니퓰레이터 시스템에 적용하여 실험하였으며, 매니퓰레이터의 위치 제어 실험 결과를 일반적인 PD제어기와 비교하였으며 다양한 속도에서의 제어에 대해 성능이 향상되었음을 확인하였다.

하지만 가속도 정보만을 사용하여 보상하므로 그에 따른 추종오차가 발생하였다. 따라서 추후연구는 전체 동력학 기반의 DOB를 사용하여 실험하여 오차를 줄이는 것이다.

참고문헌

[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, 2011.

[2] H. Iwata and S. Sugano, “Design of Human Symbiotic Robot TWENDY-ONE,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 580-586, 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*, 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, 1996.

[6] 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, 2012.

[7] 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, 2002.

[8] 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, 2007.

[9] 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, 1993.

[10] 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.

[11] Y. G. Bae and S. Jung, “Control of a robot manipulator using a modified DOB,” *Proc. of Daejeon & Chungcheong Regional Conference of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, pp. 196-197, Dec. 2012.

배 영 걸

2004년 충남대학교 메카트로닉스공학과 학사 졸업. 2006년 충남대학교 메카트로닉스 공학과 석사졸업. 2009년~현재 동 대학원 지능 로봇 시스템 전공 박사 과정. 관심분야는 로봇 팔, 지능형 서비스 로봇.

정 슬

1988년 미국 웨인 주립대 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 및 컴퓨터 공학과 석사. 동 대학 박사. 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 지능제어 및 지능로봇 시스템, 장애우를 위한 보행 및 휠체어 로봇 설계 및 개발, 가정용 서비스 로봇 개발, 로봇교육.