

확장된 칼만필터를 이용한 2축 로봇 매니퓰레이터의 접촉힘 추정

이중욱*, 허건수**

Contact Force Estimation in 2-link Robot Manipulator Using Extended Kalman Filters

Jungwook Lee* and Kunsoo Huh**

Abstract

Recent requirements for the fast and accurate motion in industrial robot manipulators need more advanced control techniques. To satisfy the requirements, importance of force control is being continuously increased and the expensive force sensor is usually installed to obtain the contact force information in practice. This information is indispensable for the force control of maintaining the desired contact force. However, the sensor cost is too high to be used in industrial applications. In this paper, it is proposed to estimate the contact force occurring between the end-effector of 2 DOF robots and environment. The contact force estimation system is developed based on the static and dynamic models of 2 DOF robot manipulators, where the contact force is described with respect to the link torque. The Extended Kalman Filter is designed and its performance is verified in simulations.

Key Words : Robot manipulator (로봇 매니퓰레이터), Contact force (접촉힘), Extended Kalman Filter (확장된 칼만 필터), Force estimation(힘 추정)

1. 서론

산업 발달에 따른 로봇 수요의 증가로 인해 로봇 매니퓰레이터의 작업 부담이 가중되고 있다.

기존의 로봇 매니퓰레이터는 순수한 위치 제어만으로 요구되는 작업을 수행했지만 외부와 접촉하는 환경에서

도 사용 가능한 로봇 매니퓰레이터는 단순 위치 제어 작업에 국한되어 있었던 로봇 응용 작업의 영역을 크게 확대하였다. 특히, 산업의 자동화가 점차 고도화되면서 외부 환경과의 반력을 제어하는 중요성이 강조되고 이에 따라서 로봇과 외부 작업물 사이에 작용하는 힘을 센싱해야 할 필요성이 요구되고 있다.

* 현대자동차

** 한양대학교 기계공학부(khuh2@hanyang.ac.kr)

위치 제어 전략만을 가진 강체 로봇일 경우, 약간의 위치 오차만으로도 말단 장치(end-effector)가 접촉면에서 떨어지게 되거나 매우 큰 힘을 발생시켜 로봇 시스템이나 공작물을 손상시키게 된다. 조립 작업이나 협조 작업과 같이 로봇과 작업 대상물간의 접촉에 의해 힘이 발생하는 경우, 작업물의 외부 손상 없이 원하는 작업을 성공적으로 수행하기 위해서는 로봇 매니플레이터의 위치 제어 뿐만 아니라 말단효과 장치와 작업 대상물간에 작용하는 힘을 원하는 힘으로 유지시켜 주는 힘 제어가 필요하다. 지금까지 힘 제어에 사용되는 힘 정보를 얻는 방법은 Fig. 1과 같이 주로 힘 센서에 의존하고 있다. 하지만, 이 힘 센서는 그 가격이 고가이기 때문에 실용화에 큰 어려움이 있으며 로봇의 손목에 부착하기 어려운 점과 작업시 발생하는 고온등의 환경적 영향을 많이 받는다. 최근에는 로봇의 동역학적 모델을 기반으로 한 힘 정보를 추정(estimation)하여 힘 제어에 응용하는 예가 많아지고 있다. 그 예로 모델링 이외의 모든 값을 외란으로 간주하고 이를 추정하는 외란 관측기⁽¹⁾⁽²⁾를 이용하거나 외부 환경을 질량-댐퍼-스프링 시스템으로 모델링하여 접촉힘을 추정하였다.⁽³⁾ 그리고 로봇 매니플레이터의 동적 거동 상태변수를 추정하기 위해 관측기가 설계된 바 있다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

본 논문에서는 로봇 매니플레이터와 외부 환경과 접촉 힘(contact force)이 발생할 때 단순화된 로봇 매니플레이터의 정적, 동적인 모델식을 유도하고 이 모델식을 바탕으로 EKF(Extended Kalman Filter)를 구성하여 로봇과 외부 환경과의 접촉힘을 추정하고자 한다. 이는 각 축에서 발생

되는 위치와 그 속도의 정보를 통해 힘 센서를 쓰지 않고 외부에서 작용하는 힘이나 토크를 간접적으로 추정하게 된다.

본 논문의 구성은 2장~4장에서 접촉힘이 발생할 때의 2축 로봇을 모델링하였고 5장에서 접촉힘 추정을 위한 감지 방식을 제안하였으며 6장에서 시뮬레이션을 수행하였으며 마지막 7장에서 결론을 맺고자 한다.

2. 로봇 매니플레이터의 모델링

EKF⁽⁷⁾를 이용하여 접촉힘을 추정하기 위해서는 실제 플랜트의 운동을 잘 표현하는 모델식이 필요하며 이 매니플레이터를 모델링하기 위해서는 정역학과 동역학이 동시에 고려되어야 한다.⁽⁸⁾ 먼저 매니플레이터가 물체에 가하는 힘을 제어하거나 힘을 받고 있을 때 일정한 궤적이거나 정지상태를 유지하기 위해서 말단부에 가해지는 힘/토크사이의 관계를 알아야 하며 둘째로는 매니플레이터의 운동을 제어하기 위한 여러 가지 동적 힘/토크를 알아야 한다. 매니플레이터는 일반적으로 링크의 직렬 연결로 이루어지기 때문에 말단부에 가해진 힘과 토크는 한 링크에서 다음 링크로 전달되어 기저 링크까지 전달된다. 외부에서 가해지는 힘/토크와의 평형을 이루기 위해 요구되는 관절 토크에 대해 살펴보면, 외력은 매니플레이터가 물체를 밀때 생기는 반력이나 그리퍼가 파지하고 있는 물체의 중량에 의한 힘 등이다. 링크 질량과 평형을 이루기 위해 요구되는 힘과 토크는 매니플레이터의 형상에 따라 변하며, 외부 환경과의 상호작용으로 인한 힘/토크와 평형을 이루기 위해 요구되는 힘/토크는 수행하는 작업에 따라 변한다.

2.1 로봇 매니플레이터의 정역학

매니플레이터가 물체에 가하는 힘을 제어하거나 힘을 받고 있는 매니플레이터를 정지 상태로 유지시키기 위해서는 우선, 말단부에 가해지는 힘/토크와 관절에 가해지는 힘/토크 사이의 관계를 알아야 한다. 먼저 외력에 의해 단일 링크에 작용하는 합력과 합토크를 보면, 이웃 링크들의 질량에 의한 힘/토크, 매니플레이터 말단부와 물체와의 접촉에 의한 힘/토크, 이웃 링크의 가속시 이 링크에 의해 가해지는 힘/토크 등이 있다. 만약 어떤 링크가 분리되어 정지해 있다면, 이 링크에 작용하는 합력과 합토크는 액츄에이터에 의해 공급되는 힘/토크에 의해 평형이 이루어져야 한다.

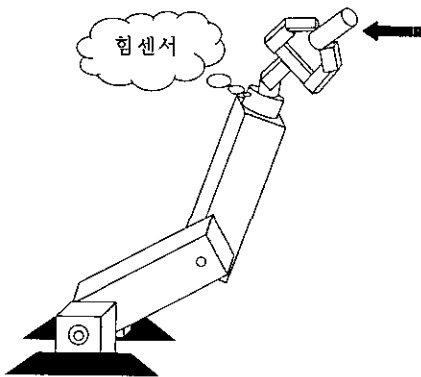


Fig. 1 Force/torque sensor in Robot manipulator

로봇 매니플레이터의 정적 힘과 토크 평형 관계를 알기 위하여 Fig. 2와 같이 단일 링크에 작용하는 외력과 토크 평형을 고려해 보기로 하자.

정적 평형에 대한 힘/토크 방정식은 다음과 같이 나타내어진다.

정적 힘평형:

$${}^R f_n = {}^R f_{n-1, n} - {}^R f_{n, n+1} + m_n {}^R g = 0 \text{ (정적 평형의 경우)} \quad (1)$$

정적 토크평형:

$${}^R \tau_n = {}^R \tau_{n-1, n} - {}^R \tau_{n, n+1} - {}^R c_{n-1, n} \times {}^R f_{n-1, n} + {}^R c_{n, n} \times {}^R f_{n, n+1} = 0 \text{ (정적 평형의 경우)} \quad (2)$$

여기서 ${}^R f_n$: 링크 n에 가해지는 합력

${}^R \tau_n$: 링크 n에 가해지는 토크 합력

${}^R c_{n-1, n}$: 링크 n의 질량 중심까지의 위치 벡터

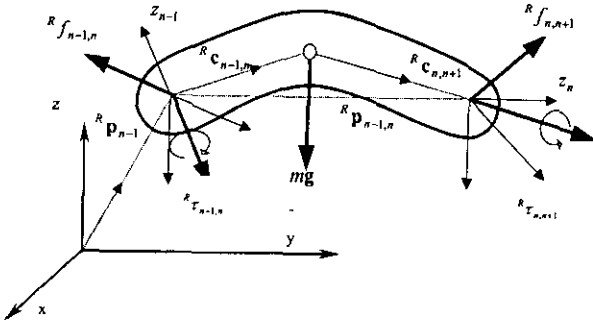


Fig. 2 Static force and torque balance for an isolated link

2.2 로봇 매니플레이터의 동역학

말단부가 원하는 궤적을 따라 움직이도록 운동을 제어하려면 링크가 가속될 때 관성을 극복하기 위한 동적 토크도 발생시켜야 한다. 동역학에 대한 고려가 없이, 로봇이 단지 위치나 속도에 대한 피드백 제어만을 사용한다면 로봇의 말단부는 가속 시에 원하는 궤적보다 지연되고 궤적의 종점에서는 오버슈트(overshoot)가 발생하게 된다. 동적 토크는 매니플레이터의 운동으로부터 발생하는데, 관성 토크(inertia torque), 구심 토크(centripetal torque), 코리올리 토크(Coriolis torque)로 분류할 수 있다. 정적 모델링과 마찬가지로 힘과 토크가 작용하는 분리된 링크를

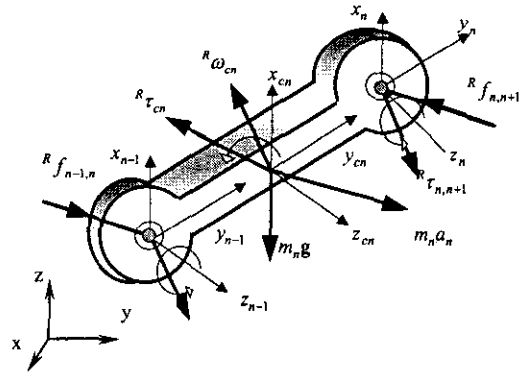


Fig. 3 Dynamic force and torque balance for an isolated link

Fig. 3에 보이고 있다. 중심 좌표계는 링크의 질량 중심에 설정되어 있으며, 이 좌표계는 링크에 고정되어 있어 고정된 관성 기준 좌표계에 대하여 운동한다. 동적 평형에 대한 힘/토크 방정식은 다음과 같이 나타내어진다.

동적 힘평형:

$${}^R f_n = {}^R f_{n-1, n} - {}^R f_{n, n+1} + m_n {}^R g = m_n {}^R a_n = 0 \text{ (힘의 평형이 이루어질 때)} \quad (3)$$

동적 토크평형:

$$\begin{aligned} {}^R \tau_n &= {}^R \tau_{n-1, n} - {}^R \tau_{n, n+1} - {}^R c_{n-1, n} \times {}^R f_{n-1, n} + {}^R c_{n, n} \times {}^R f_{n, n+1} \\ &= I_n \times {}^R \alpha_n + {}^R \omega_n \times I_n {}^R \omega_n \\ &= 0 \text{ (힘의 평형이 이루어질 때)} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 ${}^R a_n$: 절대 좌표계에서 본 링크의 가속도

${}^R \omega_n$: 링크의 각속도

${}^R \alpha_n$: 링크의 각가속도

I_n : 각 링크의 관성 모멘트

3. 제1형 2링크 로봇 매니플레이터의 모델링

앞에서 구한 로봇 매니플레이터의 정적, 동적 모델식을 바탕으로 우선 가장 간단한 제 1형 2링크 로봇 매니플레이터가 Fig. 4에 도시되어 있다. 로봇과 외부환경과의 접촉에 의해서 발생하는 접촉힘/토크 ${}^2 f_3$ 와 ${}^2 \tau_3$ 가 말단부에 가해지고 링크 좌표계 2의 원점에 작용하여 xy평면에

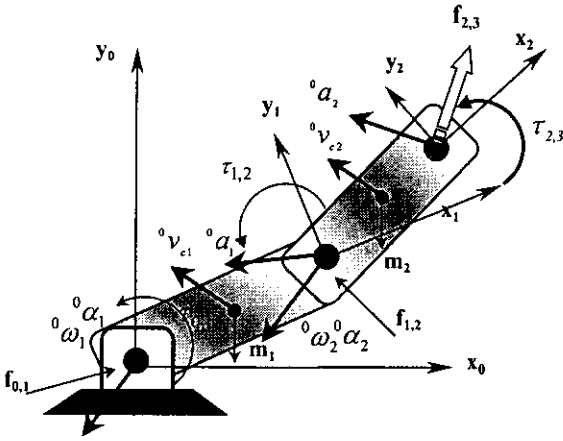


Fig. 4 Dynamics of a type 1 2-link robot manipulator

$${}^0\tau_{0,1} = {}^0c_{0,1} \times m_1 {}^0a_1 + {}^0P_{0,1} \times {}^0f_{1,2} - {}^0c_{0,1} \times m_1 {}^0g + I_1 {}^0\alpha_1 + {}^0\omega_1 \times I_1 {}^0\omega_1 \quad (5)$$

$${}^0\tau_{1,2} = {}^0c_{2,3} + {}^0c_{1,2} \times m_2 {}^0a_2 + {}^0P_{1,2} \times {}^0f_{2,3} - {}^0c_{1,2} \times m_2 {}^0g + I_2 {}^0\alpha_2 + {}^0\omega_2 \times I_2 {}^0\omega_2 \quad (6)$$

여기서 ${}^R p_{n-1,n}$: 링크 n의 길이 벡터

윗 식에 각 링크의 길이와 변위로 표현된 자세한 로봇 모델식은 부록 A에 나타나 있다.

4. 말단장치를 고려한 매니플레이터의 모델링

말단장치가 고려된 로봇 매니플레이터의 모델링을 고려해 보기로 하자. 지금까지는 외부환경과 접촉을 이루는 부분이 링크의 끝이라고 가정하여 접촉힘을 추정하였다. 하지만 실제로 외부환경과의 접촉이 이루어지는 부분은 로봇의 끝에 달려 있는 말단장치이다.⁽¹⁰⁾ 2차원 상에서 로봇 매니플레이터가 연삭이나 절삭을 하는 경우 공구와 손목이 모두 하나의 강체로서 고려 되는 경우가 Fig. 6에 도시되어 있다. 이 경우 마치 3개의 링크로 이루어진 로봇 매니플레이터의 말단부에 접촉힘이 가해진다고 가정할 수 있다. 이 가정을 토대로 말단장치가 고려된 정적, 동적 평형 방정식을 이용하여 로봇 매니플레이터를 모델링할 수 있다.⁽⁹⁾

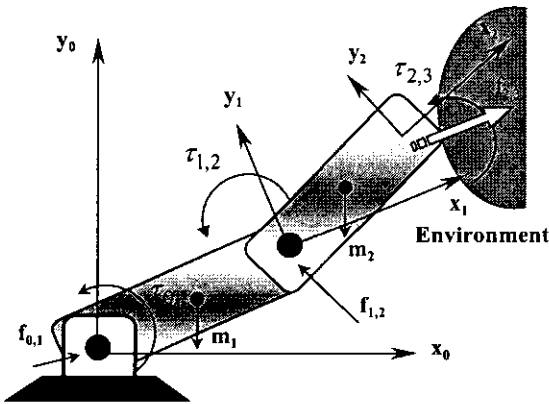


Fig. 5 Static force and torque balance for a type 1 2-link robot manipulator

다음과 같이 놓여진다. 앞 장에서 구한 정적 힘/토크 평형 방정식을 이용해 제1형 2링크 매니플레이터에서 접촉힘이 발생했을 때의 힘/토크 평형방정식을 구할 수 있다. 그럼에서 m_n 은 링크 n의 질량, Rg 는 중력벡터, Rf_n 는 링크 n에 가해지는 합력, ${}^Rf_{n-1,n}$ 는 링크 n-1에 의해 링크 n에 가해지는 힘, ${}^Rf_{n,n+1}$ 는 링크 n에 의해 링크 n+1에 가해지는 힘이다. 모든 힘들은 기준 좌표계 R에 관하여 표시 되었다. 그리고 Fig. 5를 토대로 제1형 2링크 매니플레이터의 동적 힘/토크 평형방정식을 구하고 정적, 동적 힘/토크 평형방정식을 결합하여 접촉힘/토크가 고려된 매니플레이터에 가해지는 모든 힘/토크방정식을 얻게 된다.

5. 접촉힘 모니터링

5.1 EKF(Extended Kalman Filter)를 이용한 접촉힘 추정

앞에서 구한 여러 가지 로봇 매니플레이터의 모델링을 토대로 EKF를 설계하여 힘 센서를 사용하지 않고 로봇과 작업 대상물과의 접촉힘 정보를 얻고자 한다. 그러므로 이 장에서는 접촉힘을 추정하기 위한 모니터링 방법을 제시 하고 있다. 앞장에서 구한 모델식과 접촉힘을 추가 상태 변수로 가정하여 다음과 같은 EKF를 설계한다.

$$y_k = h(x_{A,k}, u_k, k) + v_k \quad (7)$$

여기서 x_k, y_k 는 제1형 2링크 로봇 매니플레이터의 경우 다음과 같이 주어지며

$$x_k = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ f_x \ f_y]^T$$

$$y_k = [\theta_1 \ \theta_2]^T \quad (8)$$

상태변수는 구분적으로 일정하다고 가정된 접촉힘을 포함하여 각 링크의 변위와 속도를 나타내고 출력벡터는 각 링크의 변위로 하였다. $w_k \sim N(0, Q_k)$, $v_k \sim N(0, R_k)$ 는 각각 플랜트 섭동과 센서 잡음을 나타낸다. 접촉힘을 추정하기 위한 방식은 식(7)과 식(8)을 토대로 칼만 필터를 설계하였으며(7) 그 구조는 Fig. 7과 같이 구성하였다. 여기서 외란 토크는 로봇 매니퓰레이터에 작용하는 구분적으로 일정한 값을 갖는 마지의 입력으로 가정하고 식(7)로부터 설계된 EKF에 의해 추정된다. 모터 토크의 값은 편의상 모터 전류와 모터 토크 상수로부터 알 수 있다고 가정한다.

5.2 EKF를 이용한 외란관측기의 설계

실제로 우리가 힘 정보를 얻는 것은 그 힘 정보 자체를 얻기 보다는 일반적으로 힘 제어를 수행하기 위해서이다.

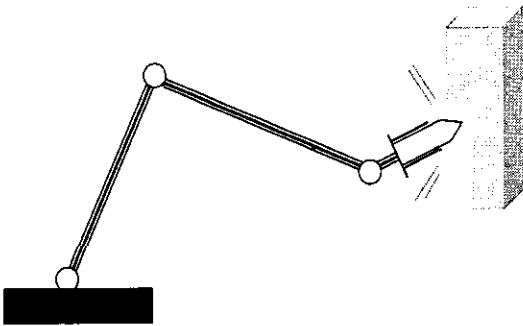


Fig. 6 End-effector as one rigid body

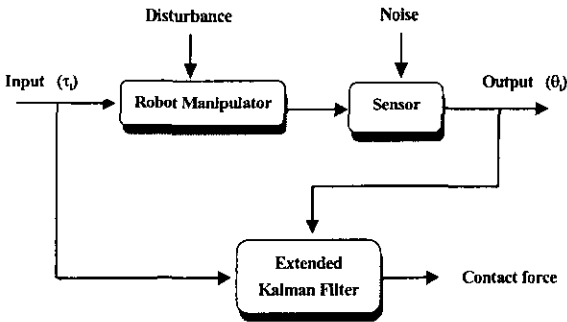


Fig. 7 Block diagram of the contact force monitoring system

그러므로 본 절에서는 접촉힘 그 자체를 추정하기 보다는 각 축에서 접촉힘에 의해 발생하는 외란 토크를 직접 추정하고자 한다.

이 추정된 외란 토크를 보상함으로써 우리가 원하는 로봇의 힘 제어를 수행하게 되는 것이다.

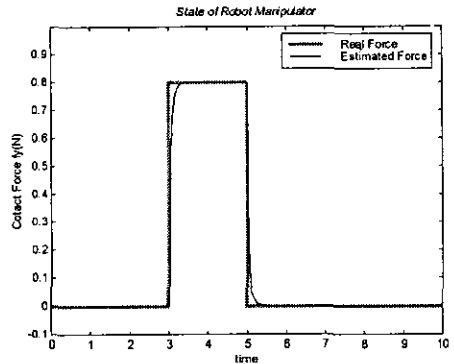
한편, 각 축에서 발생하는 외란 토크는 힘에 의해서 뿐만 아니라 모델링 오차와 같은 여러 가지 환경조건에 의해서도 생성될 수 있다. 이 외란 관측기를 구성하기 위해서는 식(5)와 식(6)에서 접촉힘에 의해 표현되는 항들을 모두 외란 토크로 놓고 EKF를 구성하면 되며 기본 구조는 Fig. 7과 동일하게 된다.

6. 시뮬레이션 결과

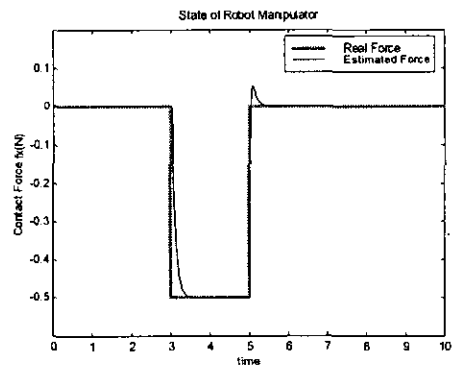
접촉힘 추정성능을 비교, 검토하기 위해 다음과 같이 시뮬레이션을 수행하였다.

6.1 접촉힘 추정결과

2차원상에서 각 링크의 모터제어를 고려하지 않았을 경



(a) Contact force, f_x



(b) Contact force, f_y

Fig. 8 The result of contact force estimation in 2-D

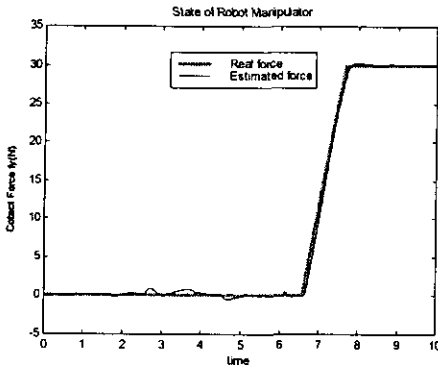
우 3~5초 사이에 로봇과 외부환경과의 접촉힘이 발생한 경우 접촉힘을 추정 한 결과는 Fig. 8과 같다. 그림에서 보면 추정된 접촉힘은 약간의 시간지연을 제외하고는 실제 값과 거의 일치함을 볼 수 있다.

6.2 말단장치를 고려한 접촉힘 추정 결과

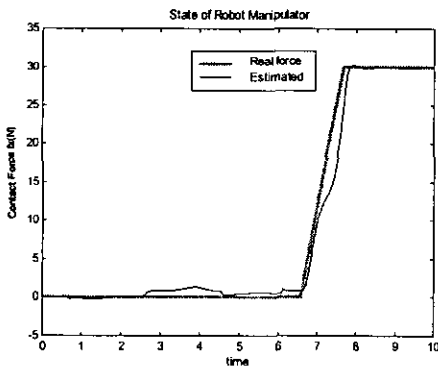
로봇의 운동 중 7~10초 사이에 약 30N의 힘이 발생 하는 경우 2차원상에서 말단장치를 고려한 접촉힘 추정결 과를 Fig. 10에 나타내었다. 이 때는 각 링크에서 PD모터 제어를 고려하였으며 약간의 떨림이 존재 하지만 정상상 태에서 실제값을 매우 잘 추정함을 볼 수 있다.

6.3 외란관측기를 이용한 외란토크 추정 결과

임의의 접촉힘에 의해서 발생한 각 축의 외란토크를 추 정한 결과는 Fig. 10에 나타내었다. 이 경우도 각 축에서 의 모터제어는 고려하지 않았으며 3초 이후에 변화하는 접촉힘이 발생할 경우에 외란토크를 직접 추정 한 결과이 다. 그 추정성능은 약간의 오차가 있으나 매우 우수한 성 능을 나타내고 있다.

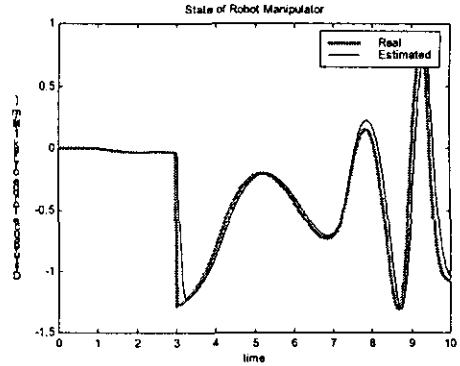


(a) Contact force, f_x

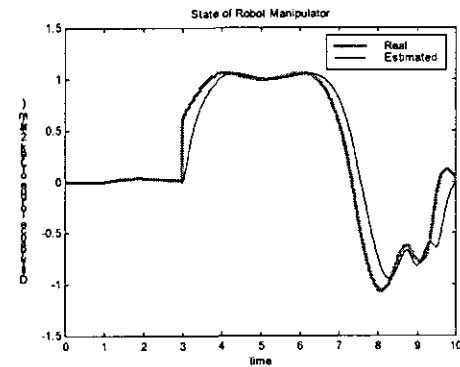


(b) Contact force, f_y

Fig. 9 The result of contact force estimation considered end-effector



(a) Disturbance torque in link 1



(b) Disturbance torque in link 2

Fig. 10 Disturbance torque estimation in a type 1 2-link robot manipulator

7. 결 론

로봇과 작업 대상물간에 발생하는 접촉힘을 센서를 사 용하지 않고 추정하기 위하여 제1형 2링크 로봇 매니플 레이터의 정적, 동적 그리고 접촉힘과 각 링크에서 발생하 는 외란 토크와의 관계를 모델링하였으며 이 모델식을 바 탕으로 Extended Kalman Filter로 접촉힘을 추정하였다. 또한 실제로 접촉이 일어나는 말단장치를 고려한 접촉힘 도 추정하였다.

추정된 접촉힘은 대부분 약간의 시간 지연과 함께 좋은 추정 성능을 보이고 있으며 적은 힘을 추정하는 경우 오 버슈트가 발생하는 것을 볼 수 있다. Extended Kalman Filter를 이용하여 외란 관측기를 설계하여 힘에 의해 발 생되는 외란 토크를 직접 추정하였고, 이는 힘을 추정하는 것 보다 적은 계산 시간을 갖는 것을 볼 수 있었다. 따라 서 본 논문에서는 로봇의 변위와 속도를 측정할 수 있는 엔코더(encoder)와 같은 저가의 센서와 EKF를 이용하여 로봇 매니플레이터에 작용하는 접촉힘이나 외란을 추정 할 수 있음을 보이고 있다.

후 기

본 논문은 1998년도 한국학술진흥재단의 연구비 지원으로 이루어졌습니다. 감사합니다.

참 고 문 헌

- (1) Kaneko, K., Ohnishi, K. and Komoriya, K., "Design method for manipulator control based on disturbance observer", Proceedings of IEEE Int. Con. On Intelligent Robots and System, vol 2, pp. 1405~1412, 1994.
- (2) Eom, K.S., Suh, I.H., Chung, W.K. and Oh, S.R., "Disturbance observer based force control of robot manipulator without force sensor", Proceedings Of IEEE int. Con. on Robotics and Automation, vol 4, pp. 3012~3017, 1998.
- (3) Huang, H.P. and Tzeng, W.L., "Robotic Force Control by Using Estimated Contact Force", Proceedings of IEEE conference on Decision and Control, vol 3, pp. 2158~2163, 1989.
- (4) Hacksel, P.J. and Salcudean, S.E., "Estimation of Environment Force and Rigid-Body Velocities using Observer", Proceedings Of IEEE int. Con. on Robotics and Automation, pp. 931~936, 1994.
- (5) Bona, B. and Indri, M., "Analysis and Implementation of observers of for robotic manipulators", Proceedings of IEEE Int. Con. On Robotics & Automation, pp. 3006~3011, 1998.
- (6) Huang, H.P. and Tseng, W.L., "An observer design for constrained robot systems", Proceedings of IEEE conference on Decision and Control, pp. 2261~2263, 1998.
- (7) Grewal, M.S and Andrew, A.P., *Kalman Filtering theory and practice*, 1st ed., Prentice Hall, 1993.
- (8) Mckerrow, P.J, *Introduction to Robotics*, 1st ed., Addison Wesley, 1995.
- (9) 이중욱, "확장된 칼만필터를 이용한 로봇매니 플레이터의 접촉힘 추정", 석사학위논문, 한양대학교, 2000.
- (10) Boojoong Yong, "Preview control for edge-following using robot force control", 한국공작기계학회, 제8권, 제1호, pp.100~111, 1999.

부 록 A

로봇 매니플레이터의 정적, 동적 평형 방정식을 결합하면 다음과 같은 방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
 {}^0\tau_{0,1} = & \ddot{\theta}_1 \left(\frac{m_1}{4} L_1^2 + m_2 L_1^2 + \frac{m_2 L_1 L_2 C_2}{2} + I_1 \right) \\
 & + \ddot{\theta}_2 \frac{m_2 L_1 L_2 C_2}{2} - \frac{m_2 L_1 L_2 S_2}{2} \dot{\theta}_1^2 - \frac{m_2 L_1 L_2 S_2}{2} \\
 & - m_2 L_1 L_2 S_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + L_1 C_1 {}^0f_{2,3y} - L_1 S_1 {}^0f_{2,3x} \quad (A.1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 {}^0\tau_{1,2} = & {}^0\tau_{2,3} + \ddot{\theta}_1 \left(\frac{m_2}{4} L_2^2 + \frac{m_2 L_1 L_2 C_2}{2} + I_2 \right) \\
 & + \ddot{\theta}_2 \left(\frac{m_2}{2} L_2^2 + I_2 \right) - \frac{m_2 L_1 L_2 S_2}{2} \dot{\theta}_1^2 \\
 & + L_2 C_{12} {}^0f_{2,3y} - L_2 S_{12} {}^0f_{2,3x} \quad (A.2)
 \end{aligned}$$

여기서

- ${}^0f_{2,3y}$, ${}^0f_{2,3x}$: 로봇과 외부환경과의 2차원상에서의 접촉힘
- m_n : 각 링크의 질량
- L_n : 각 링크의 길이
- $\ddot{\theta}_n$: 각 링크의 각 가속도
- $\dot{\theta}_n$: 각 링크의 각 속도
- I_n : 각 링크의 관성 모멘트
- C_n, S_n : $\cos \theta_n, \sin \theta_n$