

하이브리드 위치/힘 제어방법에 의한 로봇 매니플레이터의 제어에 관한 연구

* 김 현 숙* 길 진 수** 한 상 완** 홍 석 교*
* 아주대학교 제어계측공학과 **아주대학교 전자공학과

A Study on Control of Robot Manipulator by Hybrid Position / Force Control

* Hyun-Suk Kim*, Jin-Soo Gil**, Sang-Wan Han**, Suk-Kyo Hong*
* Dept. of Control & Instrumentation Eng. AJOU University
** Dept. of Electronics Eng. AJOU University

Abstract - Position control for robot manipulator may not suffice when any contacts are made between the end-effector and various environments. Therefore interaction forces must be controlled in tasks performed by robot manipulator. In general, there are two types of force control for robot manipulator. One is a stiffness control and the other is a hybrid position/force control. Stiffness control is that environment can be modeled as a spring and utilizes the desired normal force to determine the desired normal position. Hybrid position/force control, however, can be used for robot manipulator to track position and force trajectories simultaneously. This paper will compare the result of the hybrid position/force control method with that of the stiffness control method.

I. 서론

로봇 매니플레이터를 이용하여 작업공간에서 원하는 궤적을 추종할 경우에는 위치 제어기만으로도 제어가 가능했지만 점차 로봇 매니플레이터의 사용이 증가됨에 따라 다양한 환경과 접촉하게 되었다[1]. 이러한 경우, 즉 유리창을 닦거나, 달걀을 집거나 부품조립을 하는 등의 경우 각각의 접촉표면에 적절하게 end-effector의 위치뿐만 아니라 그 표면에 인가되는 힘을 제어해야 할 필요성을 느끼게 되었다. 따라서 다양한 위치/힘 제어이론들이 제시되었고[2][3][4], 이러한 연구 분야중에 대표적인 것으로써 stiffness control, hybrid impedance control, reduced-state position/force 제어, 하이브리드 위치/힘 제어(hybrid position/force control)가 있다.

이들 연구중 Stiffness control은 환경을 하나의 스프링으로 모델화한 다음 동력학식을 stiffness상수를 이용하여 계산해서 원하는 힘을 추종하도록 제어하는 것이지만 원하는 힘이 상수일 경우에만 제어가 가능하다는 단점을 가지고 있다[5].

그러나 하이브리드 위치/힘 제어기는 매니플레이터가 자유공간에서 움직이고 있을 때, end-effector의 위치와 힘의 궤적을 동시에 원하는 방향으로 추종하도록 하는 것으로써 표면과 접하는 위치와 표면에 작용하는 힘을 동시에 제어하는 것이다. 우선 환경조건을 하나의 스프링으로 모델화하고 로봇 매니플레이터 방향성을 선형화하여 원하는 힘과 위치궤적을 추종하는 선형제어기를 설계한다.

본 논문에서는 위와 같은 두가지 제어방법을 FARA SM-3 ROBOT의 파라미터 값을 이용해서 시뮬레이션을 통해 서로 비교하여 로봇 매니플레이터가 접할 수 있는 다양한 환경에 대하여 동작할 수 있는 위치/힘 제어기를 설계하고자 한다.

II. 힘 제어기

2.1 Stiffness control

Salisbury 와 Craig (1980)에 의해 제안된 이론으로 로봇 매니플레이터가 접하는 환경을 하나의 스프링으로 모델화하여 다음과 같은 선형화된 식으로 표현한다.

이때 환경에 가해지는 힘은 다음식과 같다.

$$f = k_e(x - x_e) \quad (1)$$

여기서, k_e 는 environmental stiffness로서 양의 상수이다.

stiffness controller는 PD제어기형태로서 다음과 같은 구조로 되어있다[1].

$$\tau = J^T(q) (-K_v \dot{x} + K_p \tilde{x}) + G(q) + F(\dot{q}) \quad (2)$$

여기서, $G(q)$ 는 gravity matrix
 $F(\dot{q}) = F_v(\dot{q}) + F_d$
 F_v 는 viscous friction
 F_d 는 dynamic friction
 τ 는 매니플레이터에 입력되는 힘 이다.
 $J^T(q)$ 는 $J(q)$ 의 transpose
 $J(q)$ 는 자코비안 행렬
 $\dot{x} = \dot{x}_d - \dot{x}$

2.2 Hybrid Impedance Control

힘과 속도사이의 관계를 오옴의 법칙으로 표현한 것으로서 매니플레이터 임피던스는 환경을 모델화한 이후에 결정되고 스텝입력에 대한 정상상태 오차를 영으로 하는 임피던스가 선택되어진다. 그리고 환경 임피던스와 매니플레이터 임피던스는 쌍대성 원리(duality principle)에 의해 선택되어진다. 여러 형태의 환경에 대해 다음과 같은 선형 전달함수 관계를 이용한다.

$$f(s) = Z_e(s) \dot{x}(s) \quad (3)$$

여기서, s 는 라플라스 변환변수
 f 는 환경에 가해지는 힘
 \dot{x} 는 매니플레이터가 환경에 접촉하는 속도
 $Z_e(s)$ 는 환경 임피던스

2.3 Reduced-state Position/Force Control

McClamroch 와 Wang (1988)와 Kankaabranta 와 Koivo (1988)에 의해 이론적으로 공식화된 것으로 힘제어에서 접하는 환경이 로봇 매니플레이터보다 훨씬 더 강인할때 적용할 수 있지만 환경을 compliant할 경우에는 적용이 불가능하다는 단점을 가지고 있다.

III. 하이브리드 위치/힘 제어

3.1 위치 제어기

로봇 매니퓰레이터의 작업공간을 직교 좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x &= h(q) \\ \dot{x} &= J(q)\dot{q} \\ \ddot{x} &= J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q)\dot{q} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $J(q) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} \frac{\partial h(q)}{\partial q}$ 이다.
 I 는 identity matrix
 T 는 transformation matrix
 $J(q)$ 는 Jacobian matrix

식(4)에서 \ddot{q} 에 대해서 정리하면 다음 식으로 된다.

$$\ddot{q} = J^{-1}(q)(\ddot{x} - \dot{J}(q)\dot{q}) \quad (5)$$

외부환경과 접촉하는 경우, 로봇 매니퓰레이터의 동역학 방정식은

$$\tau = M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q}) + G(q) + F(q) + J^T(q)f \quad (6)$$

여기서, $\begin{cases} M(q) \text{는 inertia matrix} \\ V_m(q) \text{는 Coriolis/centrifetal matrix} \\ G(q) \text{는 gravity matrix} \\ F(q) = F_v\dot{q} + F_d \\ F_v \text{는 viscous friction} \\ F_d \text{는 dynamic friction} \\ T \text{는 매니퓰레이터에 입력되는 힘} \\ f \text{는 작업공간에서 접촉하는 힘과 토크 벡터} \end{cases}$

가 되고, 식(5)을 식(6)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \tau &= M(q)J^{-1}(q)(\ddot{x} - \dot{J}(q)\dot{q}) + V_m(q, \dot{q}) \\ &\quad + G(q) + F(q) + J^T(q)f \end{aligned} \quad (7)$$

동역학 방정식 식(7)과 대응하는 피드백 선형제어기는 다음과 같이 설계될 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau &= M(q)J^{-1}(q)(a - \dot{J}(q)\dot{q}) + V_m(q, \dot{q}) \\ &\quad + G(q) + F(q) + J^T(q)f \end{aligned} \quad (8)$$

따라서, 제어 입력인 식(8)과 동역학 방정식인 식(7)을 비교하면 $\ddot{x} = a$ 가 되고, 이것을 외부 환경과 접하는 공간과 수직하는 공간으로 분리하여 나타내면

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_T \\ \ddot{x}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_T \\ a_N \end{bmatrix} \quad (9)$$

가 된다. 여기서, T 는 환경과 접하는 공간(tangent space)이고, N 는 환경과 수직하는 공간(normal space)을 나타낸다.

위치 제어를 설계하기 위해서 환경과 접하는 공간을 취하면

$$\ddot{x}_{T_s} = a_T \quad (10)$$

이고, 환경과 접하는 공간에서의 오차는 다음과 같다.

$$\overline{x}_{T_s} = x_{T_s} - \overline{x}_{T_s} \quad (11)$$

단, 여기서 a_T 는 접하는 공간에 대한 선형 제어기이고 x_{T_s} 는 i 번째 조인트의 원하는 위치이다.

본 논문에서는 다음과 같은 PD형태의 Computed-Torque Method를 적용하였다.

$$a_{T_s} = \ddot{x}_{T_s} + k_{T_s}\overline{x}_{T_s} + k_{T_s}\dot{\overline{x}}_{T_s} \quad (12)$$

여기서, k_{T_s} 와 k_{T_s} 는 양의 제어 이득으로서 v 는 속도항을

나타내고 ρ 는 위치항이다. ($k_{oi} = 2\sqrt{k_p}$ 의 관계)

식(10)을 식(12)에 대입하면

$$\ddot{x}_{T_s} = \ddot{x}_{T_s} + k_{T_s}\overline{x}_{T_s} + k_{T_s}\dot{\overline{x}}_{T_s} \quad \text{가 되고, 정리하면}$$

$$\ddot{\overline{x}}_{T_s} - \ddot{x}_{T_s} + k_{T_s}\overline{x}_{T_s} + k_{T_s}\dot{\overline{x}}_{T_s} = 0 \quad (13)$$

가 된다. 식(11)을 이용하면 다음 관계식을 얻게 된다.

$$\overline{\ddot{x}}_{T_s} + k_{T_s}\overline{\dot{x}}_{T_s} + k_{T_s}\overline{x}_{T_s} = 0$$

결과적으로, 이 미분방정식은 지수해를 가지는 2차 미분 방정식이고 k_{T_s} 와 k_{T_s} 가 positive이므로

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \overline{x}_{T_s} = 0 \quad \text{가 되어 추종오차는 점근적으로 수렴하게 된다.}$$

따라서, 선택한 위치 제어기는 안정성을 가지게 된다.

3.2 힘 제어기

힘 제어를 설계하기 위해 환경에 수직하는 공간을 취하면 식(9)에서 다음과 같고

$$\ddot{x}_N = a_N \quad (14)$$

외부 환경을 하나의 스프링으로 모델화하면 환경에 미치는 수직방향의 힘은 다음 식으로 된다.

$$f_N = k_e(x_{N_j} - x_{e_j}) \quad (15)$$

여기서, $\begin{cases} k_{e_j} \text{는 } j \text{번째 조인트의 stiffness} \\ x_{N_j} \text{는 매니퓰레이터의 실제 위치} \\ x_{e_j} \text{는 } x_{N_j} \text{방향으로의 환경의 정해진 위치} \end{cases}$

x_{e_j} 는 상수이므로 식(15)을 미분하면

$$\dot{f}_N = k_e \dot{x}_N \quad (16)$$

가 되고, 식(12)에 의해 다음과 같이 된다.

$$\dot{\ddot{x}}_N = \frac{1}{k_e} \dot{f}_N = a_N \quad (17)$$

이때, 힘 오차(tracking error)는

$$\overline{f}_N = f_{N_s} - f_N \quad (18)$$

가 된다.

단, f_N 는 j 번째 조인트의 환경에 대한 수직방향의 힘이다.

식(12)의 PD형태의 CT제어기를 적용하면

$$a_{N_j} = \frac{1}{k_{e_j}} (\dot{f}_{N_j} + k_{N_s}\overline{f}_{N_j} + k_{N_s}\overline{f}_{N_j}) \quad (19)$$

가 된다. 여기서, k_{N_s} 와 k_{N_s} 는 j 번째 조인트의 위치 제어 이득을 의미한다.

식(17)을 식(19)에 대입하면

$$\frac{1}{k_{e_j}} \dot{f}_N = \frac{1}{k_{e_j}} (\dot{f}_{N_j} + k_{N_s}\overline{f}_{N_j} + k_{N_s}\overline{f}_{N_j}) \quad (20)$$

가 되고, 정리하면

$$\dot{f}_{N_j} - \dot{f}_N + k_{N_s}\overline{f}_{N_j} + k_{N_s}\overline{f}_N = 0 \quad \text{가 된다. 결과적으로, 식(18)}$$

을 적용하면

$$\overline{\ddot{f}}_N + k_{N_s}\overline{\dot{f}}_N + k_{N_s}\overline{f}_N = 0 \quad \text{가 되어 } k_{N_s} \text{와 } k_{N_s} \text{가 양수일 때}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \overline{f}_N = 0 \quad \text{임을 알 수 있다.}$$

따라서, 선택한 힘 제어기는 안정성을 가진다.

이상과 같이 설계한 하이브리드 위치/힘 제어기의 전체 블록 다이어그램을 그림 1에 나타내었다.

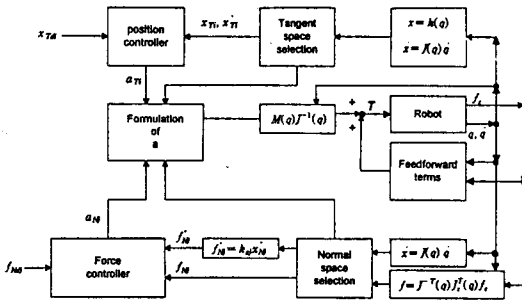


그림.1 하이브리드 위치/힘 제어기의 블록 다이어그램.

IV. FARA SM-3 ROBOT에 대한 시뮬레이션

3축에 대한 모의실험을 하기 위해 표 1과 같은 기구학적 파라미터를 이용 로봇의 기구학 방정식을 풀고, 3.1절의 식(4)를 만족하는 차코비안 행렬을 구한다. 그리고 기존에 있는 문헌에 제시된 방법으로 식(6)과 같이 동역학 방정식의 각 항들을 유도하고 로봇 매니퓰레이터의 작업공간에 대해 접하는 공간과 수직 공간을 선택하여 식(12)와 식(19)를 만족하는 위치 제어기와 힘 제어기를 시뮬레이션하였다. 이때, $k_p=1000N/m$, $k_v=2$, $k_f=1$ 로 설정하였다. 이상과 같은 경로를 통해 FARA SM-3 로봇의 3축에 적용되었을 때 얻어지는 힘과 그 오차를 그림.3에 나타내었다. 그림.3에 나타난 것처럼 힘의 오차가 거의 영으로 수렴함을 알 수 있다.

[표 1] FARA SM-3 ROBOT의 기구학적 파라미터.

joint	angle (θ)	distance (d)	length (a)	twist angle (α)	mass
1	q1	518mm	350mm	180°	1kg
2	q2	0	260mm	0°	1kg
3	0	q3	0	0°	1kg

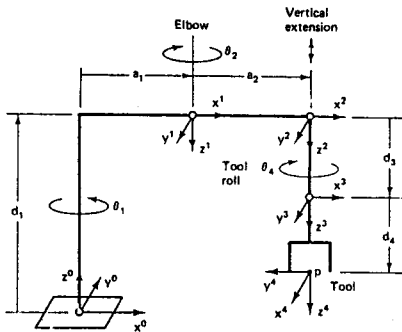


그림.2 FARA SM-3 ROBOT 시스템.

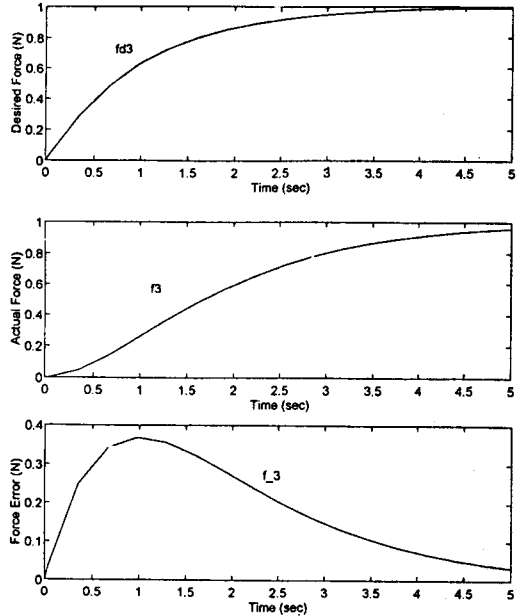


그림.3 하이브리드 제어 방법의 의한 결과.

V. 결론

본 연구에서는 기존에 있는 여러 힘 제어방식을 소개했고 하이브리드 위치/힘 제어 방식으로 end-effector좌표계의 x,y좌표계를 환경과 접하는 공간으로 선택하고 end-effector좌표계의 z방향을 환경과 수직하는 공간으로 선택하였다. 그리고 환경과 접하는 공간에 대해서는 등속위치로, 수직하는 공간에 대해서는 추종하려는 힘을 지수함수의 형태로 하여 모의 실험을 하였다. 모의실험 결과 위치와 힘의 오차가 영으로 수렴함을 알 수 있었다.

현재 힘제어에 관한 연구는 sensor dynamics와 surface uncertainty, environmental impact instability등과 같은 다양한 연구가 진행되고 있으므로 추후 연구과제로써 미지의 환경에 대해 적용할 수 있는 보다 강인하고 개선된 제어기를 설계하고자 한다.

참고 문헌

- [1] S.D.Eppinger, W.P.seering, "Introduction to Dynamic Models for Robot Force Control", IEEE Control System Magazine, 1987.
- [2] M.Ohto, H.mayeda, "A Hybrid Position / Force Control for Robot Manipulators with Position Controllers", IECON, 1991.
- [3] T.Yoshikawa, "Dynamic Hybrid Position / Force Control of Robot Manipulators Description of Hand Constraints and Calculation of Joint Driving Force", IEEE.J.of Robotics and Auto., Vol.Ra3, No.5, 1987.
- [4] D.E.Whitney, "Historical Perspective and State of The Art in Robot Force Control", Int. J. of Robotics Research, Vol.6, No.1, Spring 1987.
- [5] F.L.Lewis, C.T.Abdallah, D.M.Dawson, "Control of Robot Manipulator", Macmillan, 1993.
- [6] R.J.Schilling, "Fundamentals of Robotics : Analysis