

로봇 매니플레이터와 공작물의 상대운동에 의한 위치와 힘의 2차원 하이브리드 제어에 관한 연구

A Study on Two Dimensional Hybrid Control

by the Relative Motion between a Robot Manipulator and a Workpiece

진 상 호
(Sang-Ho Jin)

Abstract : A hybrid control method based on the relative motion between a manipulator and a workpiece is described for a two-dimensional manipulator, in which it is assumed that there are no collisions between the robot manipulator and the workpiece, and that we use a computed force law which is similar to the computed torque law in the trajectory tracking problem of a robot manipulator. The effectiveness of the proposed hybrid control method is illustrated through several simulations.

Keywords : hybrid control, robot manipulator, position control, force control, computed torque law

I. 서론

최근 산업현장에서 사용되고 있는 로봇 매니플레이터는 작업의 다양화에 의하여 면취작업, 연삭작업 또는 복잡한 조립작업 그리고 작업자와 협조작업 등의 외부환경(대상물체(workpiece))과의 접촉작업을 수반하는 상황을 많이 볼 수 있다. 이와 같은 경우 로봇 매니플레이터는 위치제어 뿐만 아니라 엔드 이펙트(end-effector)와 대상물체와의 기계적인 간섭력을 고려한 접촉력제어도 동시에 하여야 할 필요가 있다[1][2]. 이러한 문제에 대하여 위치를 제어하고 싶은 방향과 힘을 제어하고 싶은 방향을 각각 결정한 후 실제의 위치와 힘을 측정하여 이것을 피드백(feedback)시켜 목표값에 일치시키는 위치제어 루프(position control loop) 및 힘제어 루프(force control loop)를 가진 하이브리드 제어(hybrid control)가 제안되어 있다[3][4]. 이 방법은 힘제어의 분류에 의하면 직접적 힘제어 형식에 속한다[5]. 그리고 힘제어 관점에 관하여서는 로봇 매니플레이터에 가하는 힘과 로봇 매니플레이터의 운동과의 관계를 제어하므로 간접적인 로봇 매니플레이터와 작업환경 사이에 발생하는 간섭력을 제어하는 간접적 힘제어도 있다. 이 방법을 이용하는 것으로 각 관절의 강성특성을 조절하는 강성제어(또는 컴플라이언스 제어(compliance control)) [6], 속도와 힘의 관계를 조절하는 제동제어(damping control)[7], 그리고 질량특성, 제동특성 및 강성특성을 조절하는 즉, 로봇 매니플레이터의 위치, 속도, 가속도와 힘의 관계를 제어하는 임피던스제어(impedance control)[8] 등이 있다. 더구나 이러한 문제에 대해 엔드 이펙트와 대상물체와의 접촉동작의 안정성과 접근법 그리고 충돌력의 영향에 관한 연구도 진행되고 있다 [9].

본 논문은 로봇 매니플레이터와 대상물체 사이의 상대적인 운동에 주목하여[10] 토크 연산법(computed torque law)을 이용한 2차원 평면에서의 위치와 힘의 하이브리드 제어기 설계를 제안한다. 제안한 제어기의 유효성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증하고 고찰한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장은 로봇 매니플레이

터의 모델에 관하여 서술하며, III장에서는 공작물이 대상물체에 접촉해 있는 제 3 현상(phase)의 상황을 모델로 근거하여 토크 연산법에 의한 2차원 평면에서의 위치와 힘의 하이브리드 제어기를 설계한다. IV장에서는 제안한 제어기를 이용하여 계산기 시뮬레이션을 실시하고, V장은 시뮬레이션 결과에 관하여 고찰한다.

II. 매니플레이터의 모델링

이 장에서는 접촉동작을 포함한 기본적인 작업으로서 로봇 매니플레이터의 엔드 이펙트를 고정된 공작물에 접촉시켜 일정한 힘으로 미는 작업을 모델로 한다. 로봇 매니플레이터의 엔드 이펙트가 대상물체에 접촉되기까지는 위치제어계에 의하여 제어되며 엔드 이펙트가 대상물체에 접촉한 시점에서 X축 방향에 위치제어, Y축 방향에 힘제어를 행하는 하이브리드 제어를 한다. 접촉동작으로서 이하의 세가지의 현상으로 분류해서 모델링을 한다[9].

제 1 현상(접근단계) : 엔드 이펙트가 물체와 접촉하는 단계이다. 이 단계에서는 로봇 매니플레이터는 위치제어계에 의해 제어된다.

제 2 현상(접촉 직후의 단계) : 엔드 이펙트가 물체와 접촉한 직후의 미소시간에 발생하는 과도적인 단계이다. 이 단계는 엔드 이펙트가 물체와 접촉할 때 운동량과 시스템이 불연속적으로 크게 변화하므로 제어대상의 대역이 넓어지며 로봇 매니플레이터, 엔드 이펙트, 물체의 질량특성 등 제어대상 고유의 특성이 지배적이다. 힘 신호의 필터링, 힘 센서 신호의 불감대 설정 등에 의한 접촉을 인식하는 검출 정보의 시간지연도 이 현상의 발생 원인이 된다.

제 3 현상(일정한 힘으로 미는 단계) : 제 2 현상 직후의 단계로서 엔드 이펙트와 물체는 접촉상태이며 하나의 몸체로써 움직인다. 제어대상은 피드백 제어에 의하여 행동이 지배된다.

그림 1에 로봇 매니플레이터의 접촉 동작으로 제 3 현상 [11] 상태의 모델을 나타낸다. 이것은 로봇 매니플레이터의 회전은 고려하지 않고 있으며 엔드 이펙트와 대상물체는 한 몸체로 제어입력 $u[N]$ 에 의해 움직인다. 그리고 모델을 세우기 위해 다음과 같은 가정을 설정한다.

가정 1 : 로봇 매니플레이터 및 엔드 이펙트에 부착되어 있는 힘 센서를 질량, 스프링, 댐퍼로 모델화한다.

접수일자 : 1997. 4. 28., 수정완료 : 1998. 1. 20.
진상호 : 두원공업전문대학 기계과
* 본 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 학술연구조성비로 부터 일부 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

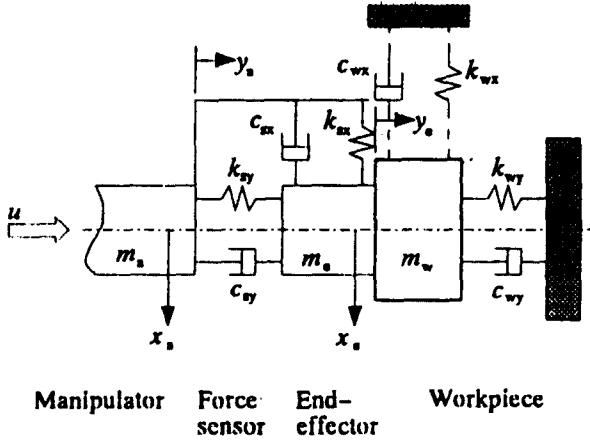


그림 1. 로봇 매니플레이터의 모델.
Fig. 1. Model of robot manipulator.

가정 2: 대상물체는 선형적인 질량, 스프링, 댐퍼로 한다.

가정 3: 충돌력은 발생하지 않는다.

이상의 가정에서 제 3 현상의 상태로 있는 엔드 이펙트와 대상물체가 한 몸체가 되어 동작하는 것으로 생각하면 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_a \ddot{x}_a(t) = u_x(t) - f_{sx}(t) \quad (1)$$

$$m_a \ddot{y}_a(t) = u_y(t) - f_{sy}(t) \quad (2)$$

$$m_e \ddot{x}_e(t) = f_{sx} - k_{wx}x_e(t) - c_{wx}\dot{x}_e(t) \quad (3)$$

$$(m_e + m_w) \ddot{y}_e(t) = f_{sy} - k_{wy}y_e(t) - c_{wy}\dot{y}_e(t) \quad (4)$$

$$f_{sx} = k_{sx}[x_a(t) - x_e(t)] + c_{sx}[\dot{x}_a(t) - \dot{x}_e(t)] \quad (5)$$

$$f_{sy} = k_{sy}[y_a(t) - y_e(t)] + c_{sy}[\dot{y}_a(t) - \dot{y}_e(t)] \quad (6)$$

여기서 m_a 는 로봇 매니플레이터의 질량, m_e 는 엔드 이펙트의 질량, m_w 는 대상물체의 질량, x_a, y_a 는 로봇 매니플레이터의 X-Y축 방향의 각각의 위치, 같은 방법으로 x_e, y_e 는 엔드 이펙트의 각각의 위치, u_x, u_y 는 제어입력, f_{sx}, f_{sy} 는 힘 센서의 출력, $k_{wx}, k_{wy}, c_{wx}, c_{wy}$ 는 대상물체의 X-Y축 방향의 스프링 상수 및 댐퍼(점성)계수, $k_{sx}, k_{sy}, c_{sx}, c_{sy}$ 는 힘 센서의 X-Y축 방향의 스프링 상수 및 댐퍼계수이다.

III. 제어기 설계

엔드 이펙트가 대상물체에 접촉하여 제 3 현상의 상태로 있다고 가정하면 링크의 관절각도 및 관절 각속도를 사용하여 로봇 매니플레이터의 기하학적인 관계에 의해 엔드 이펙트에서 대상물체의 위치와 속도를 측정할 수 있다. 그러나 엔드 이펙트의 구조가 복잡하면 그 정보에서 대상물체의 정보를 구하기는 쉽지 않다. 그래서 여기서는 대상물체의 정보를 사용하지 않고 로봇 매니플레이터의 위치와 속도를 이용하여 로봇 매니플레이터와 엔드 이펙트(또는 대상물체)의 상대적인 운동을 생각하면 (1)과 (3)에서

$$m_a m_e (\ddot{x}_a - \ddot{x}_e) = u_x m_e - f_{sx}(m_a + m_e) + m_a(k_{wx}x_e + c_{wx}\dot{x}_e) \quad (7)$$

와 같이 생각할 수 있다. 그리고 (2)와 (4)에 의하여

$$m_a(m_e - m_w)(\ddot{y}_a - \ddot{y}_e) = u_y(m_e + m_w) - f_{sy}(m_e + m_w + m_a) + m_a(k_{wy}y_e + c_{wy}\dot{y}_e) \quad (8)$$

가 된다. 여기서 다음의 토크 연산제어 또는 힘 연산제어법 [12]을 사용한다.

$$u_i = \alpha u'_i + \beta, \quad i = x, y \quad (9)$$

1. X축 방향 서보

$$\alpha = m_a \quad (10)$$

$$\beta = \frac{f_{sx}(m_a + m_e)}{m_e} \quad (11)$$

로 하여 (10)과 (11)을 (9)에 대입하면 (7)은

$$\ddot{x}_a - \ddot{x}_e = u'_x + \frac{k_{wx}x_e + c_{wx}\dot{x}_e}{m_e} \quad (12)$$

가 된다. 여기서 대상물체의 목표위치 및 목표위치의 속도를 각각 $x_e^d \approx 0, \dot{x}_e^d \approx 0$ 로 하면 (12)는

$$\ddot{x}_a - \ddot{x}_e = u'_x - \frac{k_{wx}(x_e^d - x_e)}{m_e} - \frac{c_{wx}(\dot{x}_e^d - \dot{x}_e)}{m_e} \quad (13)$$

으로 바꾸어 쓸 수 있다. 로봇 매니플레이터의 위치와 속도의 루프에 PD 서보법을 추가한 힘 서보법은

$$u_x = K_{fpx}(f_{dx} - f_{sx}) + K_{pfx}(x_a^d - x_a) + K_{vfx}(\dot{x}_a^d - \dot{x}_a) + (\ddot{x}_a^d - \ddot{x}_a) \quad (14)$$

가 된다. 여기서 K_{fpx} 는 X축 방향의 로봇 매니플레이터의 힘 비례게인, K_{pfx} 는 X축 방향의 로봇 매니플레이터의 위치 비례게인, K_{vfx} 는 X축 방향의 위치 미분게인이다. 엔드 이펙트의 질량 대상물체의 스프링 상수 및 댐퍼계수를 알게 되면 K_{pfx} 와 K_{vfx} 는

$$K_{pfx} = \frac{k_{wx}}{m_e}, \quad K_{vfx} = \frac{c_{wx}}{m_e} \quad (15)$$

를 구할 수 있다. 상대위치 서보오차를 $e_x \triangleq x_a^d - x_e^d - (x_a - x_e)$ 로 하면 (13)-(15)에 의하여

$$\ddot{e}_x + (K_{fpx}c_{sx} + K_{pfx})\dot{e}_x + (K_{fpx}k_{sx} + K_{pfx})e_x = 0 \quad (16)$$

을 구할 수 있다. 임계감쇠(critical damping)를 만족시키기 위해서는

$$K_{fpx}c_{sx} + K_{pfx} = 2\sqrt{K_{fpx}k_{sx} + K_{pfx}} \quad (17)$$

의 관계가 있다. 여기서 힘 비례게인 $K_{fpx} > 0$ 는

$$K_{fpx} = \frac{-A \pm \sqrt{B}}{c_{sx}^2} \quad (18)$$

의 양의 부분에서 결정된다. 여기서

$$A = K_{pfx}c_{sx} - 2k_{sx}$$

$$B = (K_{pfx}c_{sx} - 2k_{sx})^2 - c_{sx}^2(K_{pfx}^2 - 4K_{vfx})$$

이다.

2. Y축 방향 서보

X축 방향과 같은 방법으로

$$\alpha = m_a \quad (19)$$

$$\beta = \frac{f_{sy}(m_e + m_w + m_a)}{m_e + m_w} \quad (20)$$

로 해서 (19), (20)을 (9)에 대입하면 (8)은

$$\ddot{y}_a - \ddot{y}_e = u'_y + \frac{k_{wy}y_e + c_{wy}\dot{y}_e}{m_e + m_w} \quad (21)$$

가 된다. 여기서 대상물체의 목표위치 및 목표위치의 속도를 각각 $y_e^d \approx 0, \dot{y}_e^d \approx 0$ 로 하면 (21)은

$$\ddot{y}_a - \ddot{y}_e = u'_y - \frac{k_{wy}(y_e^d - y_e)}{m_e + m_w} - \frac{c_{wy}(\dot{y}_e^d - \dot{y}_e)}{m_e + m_w} \quad (22)$$

로 바꿔 쓸 수 있다. 힘 서보법은

$$u_y = K_{fpy}(f_{dy} - f_{sy}) + K_{ppy}(y_a^d - y_a) + K_{vpy}(\dot{y}_a^d - \dot{y}_a) + (\ddot{y}_a^d - \ddot{y}_a) \quad (23)$$

로 한다. 여기서 K_{fpy} 는 Y축 방향의 로봇 매니플레이터의 힘 비례게인, K_{ppy} 는 Y축 방향의 로봇 매니플레이터의

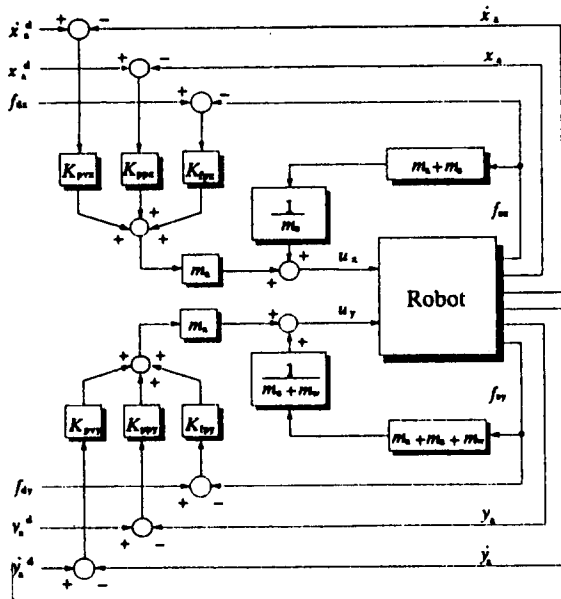


그림 2. 대상물체와 상대운동에 의한 위치와 힘의 2차원 하이브리드 제어 시스템.

Fig. 2. Two-dimensional hybrid control system of position and force by using the relative motion between the manipulator and an end-effector.

위치 비례게인, K_{ppx} 는 Y축 방향의 위치 미분게인이다. 엔드 이펙트의 질량 대상물체의 질량, 스프링 상수 및 댐퍼계수를 이용하면 K_{bpx} 와 K_{bpy} 는

$$K_{bpx} = \frac{k_{wy}}{m_e + m_w}, \quad K_{bpy} = \frac{c_{wy}}{m_e + m_w} \quad (24)$$

로 구할 수 있다. 상대위치 서보오차를 $e_y \triangleq y_a^d - y_e^a - (y_a - y_e)$ 로 하면 (22)-(24)에 의하여

$$\ddot{e}_y + (K_{bpy}c_{sy} + K_{ppy})\dot{e}_y + (K_{fpy}k_{sy} + K_{bpy})e_y = 0 \quad (25)$$

가 구하여 진다. 그리고 임계감쇠를 만족시키기 위한 조건은 X축 방향과 같은 관계로서 구할 수 있는 것에 주의하기 바란다. 그림 2는 대상물체와 상대운동에 의한 위치와 힘의 2차원 하이브리드 제어 시스템이다.

IV. 시뮬레이션 및 결과고찰

이 장에서는 위에서 설명한 제어기를 이용하여 X축 방향에 위치제어, Y축 방향에 힘제어를 하는 하이브리드 제어의 계산기 시뮬레이션의 방법과 그 결과에 대하여 설명한다. 표 1은 본 계산기 시뮬레이션의 조건을 나타낸다. 표 2에는 시뮬레이션에 사용한 로봇 매니플레이터의 파라미터를 나타

표 1. 시뮬레이션의 파라미터.
Table 1. Parameters for simulation.

Reference point of manipulator : x_a^a	0.01 [m]
Reference force of manipulator : f_{dy}	0.2 [N]
Initial point of manipulator : $y_a(0), x_a(0)$	0 [m]
Initial point of end-effector : $x_e(0), y_e(0)$	0 [m]
Sampling interval	10 [ms]
Step width of integration	0.4 [ms]

표 2. 로봇 매니플레이터의 파라미터.
Table 2. Parameters for a manipulator.

Manipulator mass : m_a	1 [kg]
End-effector mass : m_e	0.1 [kg]
Workpiece mass : m_w	3 [kg]
Workpiece stiffness of X axis : k_{ux}	0.002 [N/m]
Workpiece stiffness of Y axis : k_{wy}	2000 [N/m]
Workpiece damping of X axis : c_{ux}	0.000001 [Ns/m]
Workpiece damping of Y axis : c_{wy}	1 [Ns/m]
Sensor stiffness of X-Y axis : k_{sx}, k_{sy}	5000 N/m
Sensor damping of X-Y axis : c_{sx}, c_{sy}	25 [Ns/m]

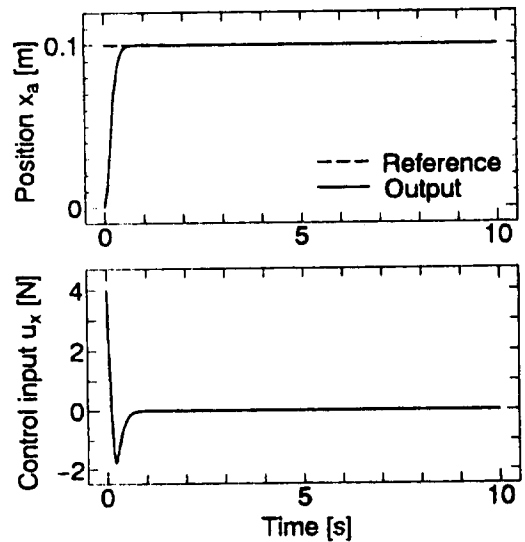


그림 3. 하이브리드 제어의 위치 결과.
Fig. 3. Position response of hybrid control.

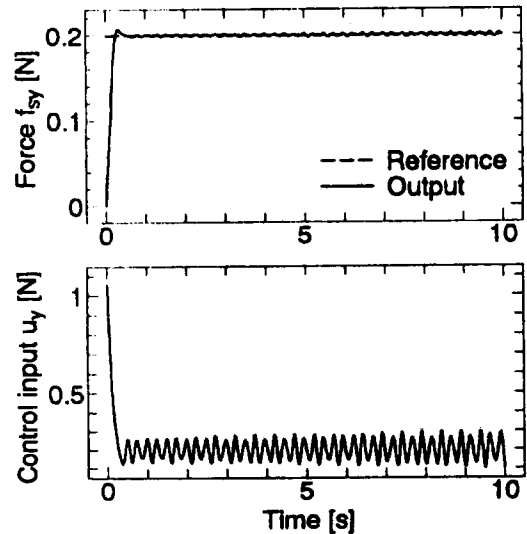


그림 4. 하이브리드 제어의 힘 결과 : case 1.
Fig. 4. Force response of hybrid control : case 1.

낸다. 그리고 Y축의 힘 서보를

$$u_y(t) := u'_y(t) + K_{fy} \int_0^t [f_{dy}(\tau) - f_{sy}(\tau)] dt \quad (26)$$

로 하여 적용한다. 여기서 (26)의 우측 항의 u'_y 는 (23)에서 구한 것이며 힘의 적분계인은 K_{fy} 이다. 그림 3에 위치제어, 그림 4에는 힘제어 결과를 나타낸다(case 1). 표 3, 4는 그때에 사용한 피드백 계인을 나타낸다. 결과의 그림에서 위치와 힘이 만족한 제어가 되고 있음을 알 수 있다.

여기서, 각각의 피드백 계인은 임계감쇠 조건 $K_{fpx}c_{sx} + K_{pux} = 2\sqrt{K_{fpx}k_{sk} + K_{pux}}$ 을 만족 시킬 수 있는 폐루프(closed loop) 강성 $K_{fpx}k_{sk} + K_{pux}$ 를 지정하고 각각의 계인을 설정하여 이것을 중심으로 시뮬레이션을 통하여 약간의 시행착오를 거쳐 피드백 계인을 구하였다. 그리고 그림 5는 그림 4의 힘 피드백 계인 K_{pvy} , K_{fpy} 를 표 5와 같이 약간 수정하였을 때의 제어 결과이다(case 2). 이 결과에서도 위치제어는 그림 3과 같이 만족한 결과를 얻을 수 있었다(동일하므로 생략). 그리고 Y축 방향의 힘제어는 약간의 진동이 보이지만 이것은 로봇 매니플레이터 위치의 미분계인과 힘의 비례계인을 약간 수정하므로 개선되는 것을 이해 할 수 있다.

표 3. 위치제어의 피드백 계인.

Table 3. Feedback gains of position control.

K_{pux}	K_{pux}	K_{fpx}	K_{fix}
40	7	5	0

표 4. 힘제어의 피드백 계인 : case 1.

Table 4. Feedback gains of force control : case 1.

K_{pvy}	K_{pvy}	K_{fpy}	K_{fvy}
645.2	0.3226	5.1	20

표 5. 힘제어의 피드백 계인 : case 2.

Table 5. Feedback gains of force control : case 2.

K_{pvy}	K_{pvy}	K_{fpy}	K_{fvy}
645.2	3.226	4.0	20

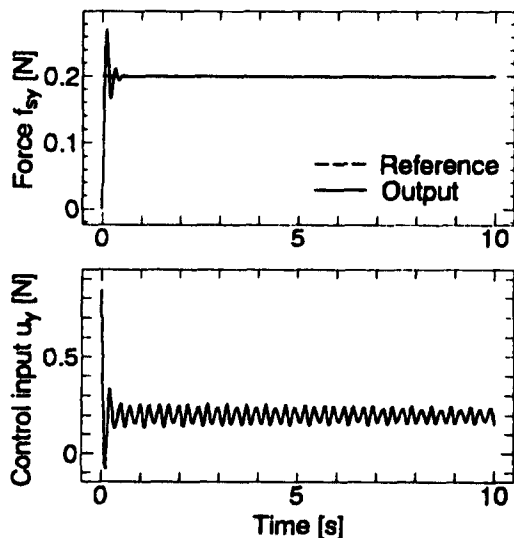


그림 5. 하이브리드 제어의 힘 결과 : case 2.

Fig. 5. Force response of hybrid control : case 2.

V. 결론 및 향후 연구방향

로봇 매니플레이터의 작업이 다양화됨에 따라 위치제어 뿐만 아니라 로봇 매니플레이터의 엔드 이펙트와 대상물체와의 기계적인 간섭력을 고려한 접촉력의 제어도 동시에 필요하게 되었다. 따라서 로봇 매니플레이터와 대상물체 사이의 상대적인 운동에 주목하여 토크 연산법에 의한 2차원 평면에서 위치와 힘의 하이브리드 제어를 설계하였다. 제안한 제어기의 유효성을 계산기 시뮬레이션을 실시하여 검증하였다.

앞에서 설명한 로봇 매니플레이터 링크 기구의 운동방정식은 하이브리드 제어를 하기전에 비선형 피드백 보상 등으로서 선형 또한 비간섭적인 것으로 되어 있다고 가정하고 있다. 따라서 차후의 연구로서 로봇 매니플레이터 링크 기구의 운동식도 포함한 제어계 구성법으로 실제 로봇 매니플레이터에의 응용을 검토 중에 있다.

참고문헌

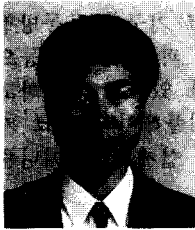
- [1] G. M. Bone, M. A. Elbestawi, R. Lingarkar and L. Liu, "Force control for robotic demurring," *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, September, vol. 113, pp. 395-400, 1991.
- [2] 진상호, 게이고 와타나베, 이석규, "고무인공근 로봇 매니플레이터의 위치 및 힘 제어에 관한 연구," 한국정밀공학회, 제12권, 제1호, pp. 97-103, 1995.
- [3] O. Khatib, "A unified approach for motion and force control of robot manipulators : The operational space formulation," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-3-1, pp. 43-53, 1987.
- [4] T. Noritsugu, T. Wada, T. Tadera, "Hybrid type position and force control of a pneumatic robot with improved sliding mode control method," *Journal of the Society of Instrument and Control Engineers*, vol. 26 no. 3, pp. 331-338, 1990. (in Japanese)
- [5] 小菅一弘, "力制御の分類と制御システムの設計法," *日本ロボット學會誌*, vol. 9, no. 6, pp. 751-758, 1991.
- [6] M. G. Her and H. Kazerooni, "Automated robotic demurring of parts using compliance control," *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 113, March, pp. 60-66, 1991.
- [7] 和田洋外 4人, "對象物体の特性を考慮したダンピング制御システム," 第10回日本ロボット學會學術講演會, no. 2, pp. 633-634, 1992.
- [8] T. Noritsugu, T. Wada and T. Asanoma, "Impedance control of a pneumatic servo system with adaptive control method," *Journal of the Society of Instrument and Control Engineers*, vol. 26 no. 12, pp. 1414-1420, 1990. (in Japanese)
- [9] K. Kitagaki, M. Uchiyama, "An optimal approach velocity of manipulators to external environments," *Journal of the Robotics Society of Japan*, vol. 8, no. 4, pp. 413-420, 1990. (in Japanese)
- [10] K. Watanabe, T. Fukuda and G. Tzafestas, "A force control method using the manipulator and a

workpiece," *IFAC World Congress 1993*, Sydney, Australia, 18-23, pp. 513-516, July, 1993.

- [11] K. Yamada, T. Suzuki and S. Okuma, "Betterment process of contact motion by learning method," *Journal of the Society of Instrument and Control*

Engineers, vol. 27, no. 9, pp. 1009-1017, 1991. (in Japanese)

- [12] J. J Craig, "Introduction to robotics : Mecanics and control," Addison and Wesley Publishing Co. 1986.



진 상 호

1989년 일본 Fukuoka 공업대학 전자기계공학과 학사. 1991년 일본 Saga대학교 생산 기계공학 석사. 동대학원 시스템생산과학 박사(1994). 1976년 2월~1985년 2월 (주) 대철. 1994년 4월~1995년 3월 일본 Saga대학교 생산기계공학과 강사. 1995년 3월~현재 두원공업전문대학 기계과 조 교수. 관심분야는 로봇제어, 퍼지제어, 자동화시스템, 메카트로닉스.