

로봇 매니퓰레이터의 컴플라이언스 제어를 위한 자기조절형 강성제어 방법

A compliance control strategy for robot manipulators using a self-controlled stiffness function

오 상 룩*, 김 호 찬**, 유 범 재*, 서 일 흥***

*한국과학기술연구원 정보전자연구부 (Tel: 958-5757; Fax: 958-5709)

**제주대학교 전기공학과 (Tel: (064)54-3676; Fax: (064)56-5281)

***한양대학교 전자공학과 (Tel: (0345)400-5172; Fax: (0345)408-5803)

Abstracts A compliance control strategy is proposed by using a new type of self-controlled stiffness function, where no explicit wrist force/torque sensor is employed. Specifically, the stiffness gain is given as the exponential function of the error between virtually given desired trajectory and actual trajectory, where virtual desired trajectory is designed to be inside the surface of the object to be compliance-controlled. And, a motion speed scheduling technique is also proposed to avoid serious damages due to lack of environmental knowledge and to minimally maintain the task performances. It is experimentally shown that the proposed control method is useful for various manipulator motion types such as path following, initial contact with soft impact and force regulation during contact.

Keywords Compliance control, Self-controlled stiffness gain, Motion speed scheduling

1. 서론

일반적으로 매니퓰레이터 작업은 일련의 접촉(contact) 과정들을 필요로 하는데, 비접촉 상황인 비구속 동작(unconstrained motion)에서 구속 동작(constrained motion)으로 천이(transition)후에 접촉 동작이 나타난다. 따라서 천이과정에서는 접근(approach), 접촉 동작등이 존재하고 충돌 후에 접촉을 유지하지 못하는 경우에는 로봇이 튀는 현상까지 포함된다. 로봇은 이러한 여러 가지 동작들을 성공적으로 수행해야한다. 위치 서보(position servo)는 일반적으로 고이득 폐환(feedback)을 사용하므로 매우 강성(stiff)이고 매니퓰레이터가 비구속 동작에서 궤적(trajectory)을 추종하는 경우에 적절하다. 따라서 위치 서보는 시스템에 동작하는 외부잡음의 영향을 적게 받지만 매우 강성인 말단부(end-effector)나 주변(environment) 간에 접촉은 상당히 딱딱해지고 접촉이 이루어지지 않은 경우도 발생한다. 위치 정보의 부정확이나 위치 서보의 오차로 인해 발생하는 위치 오차는 바람직하지 않은 큰 접촉력(contact force)을 만들어 낸다. 가장 이상적인 힘 서보(force servo)는 강성을 영으로 만드는 것인데 이 경우에는 원하는 힘을 유지할 수 있도록 해주지만 외부잡음으로 인해 발생한 작은 위치 변이의 궤적 추종에는 부적절하다. 이와같은 문제를 해결하는 한 가지 방법은 순응 동작(compliant motion)을 하는 제어기를 사용하는 것으로, 작업을 수행하는 좌표중의 일부는 힘 제어를 위해 선택하고 나머지는 위치 제어를 위해 이용한다.

주변과 접촉하는 매니퓰레이터들을 대상으로 한 순응 동작 제어는 최근에 상당히 폭넓게 연구되어 왔다 [1]. 가장 잘 알려진 접근 방법 들로는 혼합 힘/위치 제어(hybrid position/force control) [2,3]와 임피던스(impedance) [4] 또는 강성 제어 [5] 등이 있다. 혼합 힘/위치 제어 방법은 작업공간의 직교 분해(orthogonal decomposition)에 의해 이루어진다. 이 구조에서 힘은 주변에 의해 구속된 방향으로 제어되고 위치는 비구속되고 움직이기에 자유로운 방향으로 제어된다. 그러나 이 방법에서는 구속 또는 비구속 동작이 되는 축이 작업이 시작되기 전에 미리 정해져야 하고 충돌하는 순간에 원하는 힘의 크기가 큰 경우에는 관절 구동 토크는 순간적으로 점프하게 된다. 이 경우 과도한 힘이 발생하게 되므로 실제 상황에서는 적용하기 힘들다. 혼합 제어와 달리 임피던스 (또는 강성) 제어의 목적은 원하는 위치/힘 궤적

을 추종하는 것이 아니라 로봇 말단부의 기계적 임피던스를 조절하는 것이다. 이 방법은 구속 및 비구속 상황을 하나로 포함할 수 있는 통합된 제어 방법으로 알려져있다. 구속된 동작을 성공적으로 수행하기 위해 가상의 원하는 궤적(virtual desired trajectory), $X_d(t)$, 이 가로막힌 벽의 표면(surface) 안쪽으로 주어진다. 그러나 로봇 말단부의 위치, X , 는 표면에 존재하므로 이들 간의 위치 오차, $(X_d - X)$, 와 매니퓰레이터의 강성의 곱이 접촉력으로 나타난다. 강성 제어에서 힘 추종은 가상 위치의 추종을 통하여 간접적으로 수행된다. 그러므로 출력 위치의 측정에서 오차가 발생하면 많은 접촉력 오차를 가져오므로, 주변에 대한 강성과 위치에 대한 정확한 모델링이 이루어져야만 원하는 힘 추종 성능을 발휘할 수 있다.

본 논문에서는 로봇 매니퓰레이터의 순응성 동작 제어를 위해 새로운 종류의 자기조절형(self-controlled) 강성 함수를 제안한다. 이때 강성 이득(gain)은 주어진 가상의 원하는 궤적과 실제 궤적간의 오차의 지수 함수로 주어진다. 그리고 동작 속도 스케줄링(motion speed scheduling) 방법을 도입하여 외부에 관한 지식의 부족으로 인한 로봇의 심각한 손상을 막고 작업 성능을 적절하게 유지하도록 한다.

2. 역학 및 강성 제어

n 링크 로봇의 동역학은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + G(q), \tag{1}$$

여기서 q , \dot{q} 와 \ddot{q} 는 각각 관절 위치, 속도 및 가속도를 나타내는 $n \times 1$ 벡터이고 τ 는 액츄에이터에 의해 제공되는 관절 토크를 나타내는 $n \times 1$ 벡터이다. $M(q)$ 는 대칭이고 정칙(positive definite)인 $n \times n$ 관성 행렬이고 $H(q, \dot{q})$ 는 원심력과 전향력을 $G(q)$ 는 중력을 나타내는 $n \times 1$ 벡터이다.

로봇이 주변과 접촉할 때 로봇이나 주변이 변형되며, 말단부에서의 접촉력이 각 관절에 전달될 것이다. 만약 F 가 직교 좌표(Cartesian coordinates)에서 말단부의 접촉력이라면 (1)의 동역학은 다음의 형태를 갖는다.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + G(q) + J(q)^T F, \quad (2)$$

여기서 $J(q)$ 는 $n \times n$ 자코비안(Jacobian) 행렬을 나타낸다.

로봇 매니퓰레이터의 말단부를 원하는 위치로 이동시키려면 각 관절에서 이에 해당하는 관절 토크를 주어야 한다. 이때 필요한 관절 강성 행렬 K_q 는 다음과 같이 주어진다 [5].

$$K_q = J^T K_c J, \quad (3)$$

여기서 K_c 는 직교 좌표에서 강성을 나타내는 $n \times n$ 행렬이다. 강성 제어 [5]에서 제어 입력은 다음과 같다.

$$\tau = K_q(q_d - q) + K_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_f(K_q(q_d - q) - J^T F) + G(q) \quad (4)$$

여기서 q_d 와 \dot{q}_d 는 각각 원하는 관절 위치와 속도를 나타내는 $n \times 1$ 벡터이고 K_d 와 K_f 는 각각 속도의 감쇠와 힘 제한 이득을 나타내는 행렬이다. (4)에서 페루프 힘 제어 시스템 구성을 위해 손목 힘/토크 센서가 필요함을 알 수 있다. 센서를 이용하지 못하면 힘 응용의 다양성은 많이 줄어들 수 있다[5]. 그러나 센서를 사용할 경우에도 실제 공정에서 적용하는 주변의 강성을 정확하게 모르면 충돌시 원하지 않은 튀는 현상이 발생하기 때문에 힘 보상 이득을 결정하는 것이 어렵다.

이와같은 문제점을 줄이기 위해 본 논문에서는 순응성 제어를 위해 다음과 같이 단지 위치와 속도 정보만을 사용한다.

$$\tau = K_q(X, X_d)(q_d - q) + K_d(X, X_d)(\dot{q}_d - \dot{q}) + G(q), \quad (5)$$

여기서 $X_d = [x_1^d \dots x_n^d]^T$ 와 $X = [x_1 \dots x_n]^T$ 는 각각 말단부의 원하는 위치와 실제 위치를 나타내고 함수 $K_q(X, X_d)$ 와 $K_d(X, X_d)$ 는 각각 직교 좌표에서 위치 오차로 결정된다.

3. 강성 이득 함수의 설계

로봇 매니퓰레이터가 주변과 효과적으로 상호작용을 하려면 물체와 자주 접촉해야 한다. 이 경우 비구속 동작에서 높은 강성 이득 값을 필요로 하는 위치 추종과 구속 동작에서 낮은 이득을 필요로 하는 힘 추종을 서로 절충해야 한다. 구속 동작에서도 주변의 강성이 비선형이면 강성 이득은 변해야 할 필요가 있다 [6,7]. 특히 로봇 말단부가 예상치 못한 장애물을 만나거나 외부잡음으로 인해 대상 물체의 자세가 바뀌면 직교 좌표에서 강성 값은 더 이상 유용하지 않으므로 고정된 강성 이득 값을 갖는 강성 제어 방법은 효과적이지 못하다.

본 논문에서는 위치 오차에 근거한 자기조절형 강성 이득 함수를 제안한다. 접촉 정보를 얻기 위해 손목 힘/토크 센서를 사용하지 않는 대신에 위치 오차로 접촉을 탐지한다. 특히 장애물과 충돌과 같은 예상치 못한 접촉이 발생하는 경우에는 접촉 순간에 상대적으로 큰 위치 오차가 발생한다. 또한 디버링(deburing), 그라인딩(grinding), 그리고 정밀 조립 등과 같은 구속 동작을 수행하는 경우에도 로봇의 원하는 궤적을 실제 표면 안쪽으로 이동하도록 잡으면 위치 오차 신호를 이용하여 접촉여부를 판단할 수 있다 [4].

본 논문에서는 직교 좌표에서 고정된 강성 이득 대신에 (5)에서 다음과 같은 비선형 강성 함수를 사용한다.

$$K_q(X, X_d) = J^T K_c(X, X_d) J$$

여기서

$$K_c(X, X_d) = \text{diag}\{K_{c1}e^{-k_1|x_1 - x_1^d|}, \dots, K_{cn}e^{-k_n|x_n - x_n^d|}\} \quad (6)$$

이고 K_{c1}, \dots, K_{cn} 은 비구속 동작에서 점근적인 안정성(asymptotic stability)을 만족하는 양수들로 선택된다. 그리고 (6)에서 k 는 감쇠 속도를 결정하는 상수이다.

제어 입력식 (5)에서 $K_d(X, X_d)$ 를 결정하는 방법으로 다음과 같은 간단한 공식을 사용한다.

$$K_d(X, X_d) = \alpha K_q(X, X_d) \quad (7)$$

여기서 $\alpha > 0$ 는 감쇠량을 결정하는 스칼라 스케일링 계수이다.

제안된 방법의 특징을 몇 가지로 나누어 살펴보자. 첫째, 강성 이득 행렬 K_c 는 직교 공간에서 작업 좌표에 해당하고 그 크기는 접촉이 발생하고 있는 해당 좌표의 값만 줄어들기 때문에 해당 작업마다 미리 원하는 강성 이득 행렬의 크기를 미리 정할 필요없이 스스로 결정할 수 있다. 둘째, 제안된 방법은 특별한 전환 장치없이 구속 및 비구속 동작에 동시에 적용할 수 있으므로 충돌시 말단부의 원하지 않은 진동 동작을 많이 방지할 수 있다. 그리고 마지막으로 제안된 구조는 주변의 접촉력에 대한 명시적인 측정을 필요로 하지 않는다.

4. 동작 계획

일반적으로 표면 추종 매니퓰레이터 작업은 다음의 두 가지 목표를 동시에 만족하도록 수행되는데, 첫째는 주어진 경로에 아주 가깝게 지나야 하고 둘째는 경로 추종을 위한 위치나 속도 제어를 해야 하는 축과 직교된 축들에서는 말단부와 주변 간에 적당한 접촉력을 유지해야 한다.

본 논문에서는 원하는 동작의 양을 고정된 시간의 함수로 미리 정하지 않고 수행하는 작업과 관련하여 동작의 양을 정한다. 각 관절의 실제로 원하는 속도는 직교 좌표에서 실제 위치 X 와 가상의 원하는 위치 X_d 간의 위치 오차에 의해 결정된다. 본 논문에서는 그림 1 과 같이 동작 계획자가 작업 수행의 현재 상태에 따라 적절한 동작 명령을 내린다. 동작 속도 스케일링의 목적은 크게 두 가지인데, 첫째는 주변에 관한 지식의 부족으로 인한 심한 로봇의 손상을 피하는 것이고 둘째는 적절한 작업 성능을 얻기 위함이다.

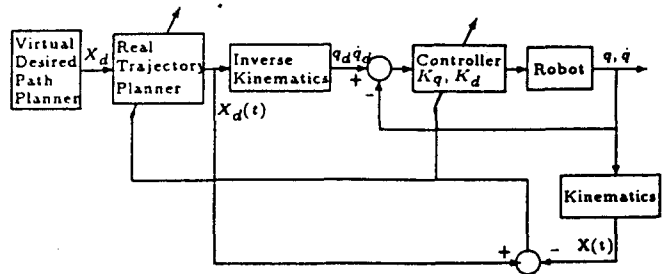


그림 1. 자기조절형 강성 제어 구조.

Fig. 1. Self-controlled stiffness control strategy.

직교 좌표에서 원하는 속도 $\dot{X}_d = [\dot{x}_{d1} \dots \dot{x}_{dn}]^T$ 가 미리 주어졌을 때, 실제 위치와 가상의 원하는 위치 간의 오차의 크기 $\|X_d - X\|_\infty$ ($:= \max\{|x_{d1} - x_1|, \dots, |x_{dn} - x_n|\}$) 가 미리 정해진 값보다 커지면 실제의 원하는 속도 \dot{X}_{dreal} 와 위치 X_{dreal} 는 다음과 같다.

$$\dot{X}_{dreal} = [\gamma(t) \dot{x}_{d1} \dots \gamma(t) \dot{x}_{dn}]^T, \quad (8)$$

$$X_{dreal} = [\int \gamma(t) \dot{x}_{d1} dt \dots \int \gamma(t) \dot{x}_{dn} dt]^T \quad (9)$$

여기서 $\gamma(t)$ 는 스케일링 함수로서

$$\gamma(t) = \frac{1}{1 + \text{int}(k_1 \|X_d - X\|_\infty)} \quad (10)$$

이고 $\text{int}(x)$ 는 x 를 넘지않은 최대정수이며 k_1 는 스케일링 값이다.

5. 실험 검증

제안된 강성 제어 알고리즘의 실험적인 검증을 위해 그림 2와 같은 2 링크 직접 구동형(direct drive) 매니플레이터를 사용하였다. 이때 로봇의 실제적인 매개변수는 표 1과 같다.

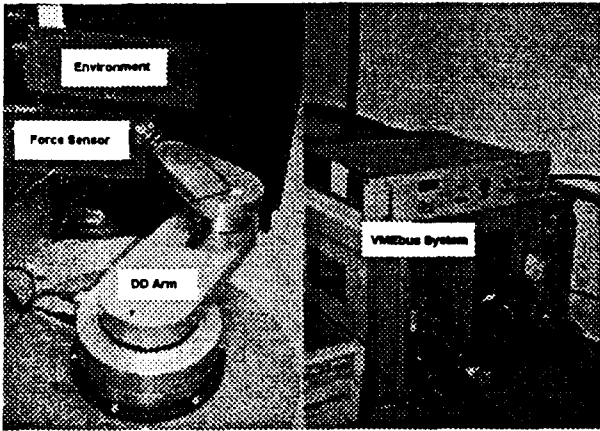


그림 2. 2 링크 직접 구동형 로봇 매니플레이터와 제어 시스템.
Fig. 2. 2 link direct drive robot arm performing the task and its control system.

표 1. 로봇의 실제적인 매개변수.

Table 1. Physical parameters of the robot arm.

	Link 1	Link 2
Mass of link	22 Kg	12 Kg
Length	0.395 m	0.365 m
Mass of motor	73 Kg	13 Kg
Rotor inertia	1.07 Kgfm ²	0.031 Kgfm ²
Friction coefficient	1.0 Kgfm	0.01 Kgfm

5.1 실험 장치

실시간 로봇 제어 시스템의 구성도는 그림 3과 같은데, 각 관절은 각각 관절의 위치와 속도를 측정하기 위해 리졸버와 타코메터를 갖고 있다. 제어 알고리즘은 C 언어로 실시간 운영체제인 VxWorks[8] 환경하에서 프로그램되었으며, 데이터 전송모듈인 MVME-712를 통하여 주프로세서인 MVME-147로 전송된다. 센서로부터 얻어진 아날로그 신호는 A/D 변환보드인 MACRO-6780에 의해 샘플링되고 모터를 구동하기 위한 토오그 신호는 D/A 변환보드인 MACRO-6781를 통과시켜 액츄에이터로 전송된다. 위치를 측정하기 위해 펄스 카운터 모듈인 HIMV-607A를 사용하면 레졸버로부터 펄스 신호가 계산되고 매 샘플링 시간마다 MVME-147로 전송된다. 각 관절에 대한 제어 신호의 갱신과 데이터의 교환은 실시간 운영체제인 VxWorks의 도움으로 매 5[msec]마다 수행된다.

5.2 실험 결과

제안된 강성 제어 알고리즘의 유용성을 확인하기 위해 간단한 작업을 수행하였는데, 가상의 원하는 위치 X_d 는 반지름이 7.5cm인 원으로 잡았다. 이때 단단한 벽이 원의 안쪽에 놓이도록 한다. 이 작업은 제안된 강성 제어기의 성능을 검증하는데 유용한데, 비구속 동작에서는 위치 추종 능력, 구속 동작에서는 상호작용을 하면서 접촉을

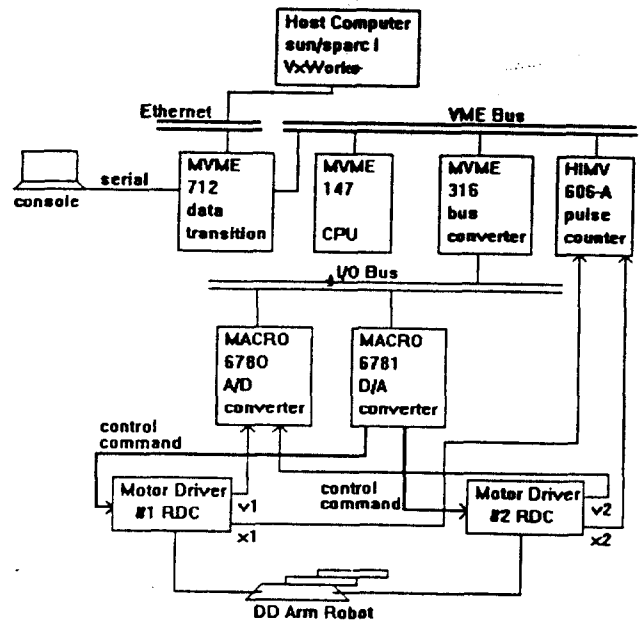


그림 3. 2 링크 로봇 제어 시스템을 위한 제어기의 하드웨어 구성
Fig. 3. The hardware configuration of the controller for two-links robot arm control system.

유지하는 능력과 경로 제어와 힘 제어 간의 전이 시 매끄러운 충돌 전이를 다룰 수 있기 때문이다.

비구속 동작일 때 힘은 0이고 말단부의 경로는 원의 호를 그린다. 말단부가 벽 표면과 접촉할 때 말단부는 벽 표면에 의해 정의된 원의 현을 따라 벽 표면에 부드럽게 접촉한다. 말단부의 관성과 단단한 표면 간의 충돌로 인해 약간의 임펄스 힘(impulse force)이 발생하지만 급방 힘은 0으로 간다. 그리고 원하는 위치 X_d 가 표면안으로 들어가도 말단부는 실제 위치 X 는 표면위에 남아있다. 따라서 두 위치 간의 오차가 발생하게 되므로 순응성 제어를 해야한다. 본 실험에서 힘/토크 센서는 말단부와 벽의 표면의 상호작용력을 측정하는 데만 사용하였다.

강성 제어 방법을 실제 시스템에 적용하여 얻은 결과가 그림 4와 5에 나타났다. 강성의 크기를 일정하게 잡을 때와 본 논문에서 제안한 방법으로 수행할 때, 시스템은 모두 안정하게 동작하였다. 말단부의 경로만을 살펴보면 두 방법의 결과는 비슷하게 나타났는데, 제안한 방법이 원호를 좀더 가깝게 추종하였다. 그러나 작업에서 구속 동작을 수행할 때의 상호작용력은 다른 결과를 보여준다. 그림 4에서 강성의 크기를 일정하게 잡으면 말단부와 벽면의 상호작용력은 위치 오차 $\|X_d - X\|$ 에 비례하여 증가하고 외부잡음에 민감하게 된다. 그러나 그림 5에서 강성의 크기를 조절하므로 상호작용력은 적절하게 유지되고 외부잡음에 덜 민감하게 된다.

6. 결론

본 논문에서는 다양한 종류의 매니플레이터에 동작을 제어하기 위한 자기조정형 강성 함수를 제안하였는데, 경로 추종, 부드러운 충돌, 그리고 구속 및 비구속 동작에서 적절한 과정이나 주변에 관한 사전지식 없이 접촉할 때 상호작용력을 적절하게 유지하는 방법에 대해 다루었다. 직접 제작한 2 링크 매니플레이터에서 실험한 결과 제안한 방법은 순응성 제어 작업에서 만족스러운 결과를 나타내었다.

참고문헌

- [1] M. W. Spong and M. Vidyasgar, *Robot dynamics and control*. John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- [2] M. H. Raibert, and J. J. Craig, "Hybrid position/force control of manipulators," *ASME J. Dyn. Syst. Meas. Contr.*, vol. 102, no. 1, pp. 126-133, 1981.
- [3] R. Volpe and P. Khosla, "A theoretical and experimental investigation of explicit force control strategies for manipulators," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 38, no. 11, pp. 1634-1650, 1993.
- [4] N. Hogan, "Impedance control: An approach to manipulation, Part 1: Theory; Part 2: Implementation; Part 3: Applications," *ASME J. Dyn. Syst. Meas. Contr.*, vol. 107, no. 1, pp. 1-24, 1985.
- [5] J. K. Salisbury, "Active stiffness control of manipulator in Cartesian coordinates," *Proc. IEEE 19th Conf. on Decision and Control*, pp. 95-100, 1980.
- [6] I. H. Suh, K. S. Eom, H. J. Yeo, B. H. Kang, S. R. Oh, and B. H. Lee, "Explicit fuzzy force control of industrial manipulators with position servo drives," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and System*, (Munich), pp. 657-664, September 1994.
- [7] I. H. Suh, K. S. Eom, H. J. Yeo, B. H. Kang, and S. R. Oh, "Adaptive fuzzy force control of industrial manipulators with position servos," *Proc. IROS'95, August 1995, Pittsburgh, PA, U.S.A.*
- [8] VxWorks Manual, *Real-Time Operating System*. Ready System Co., 1992.

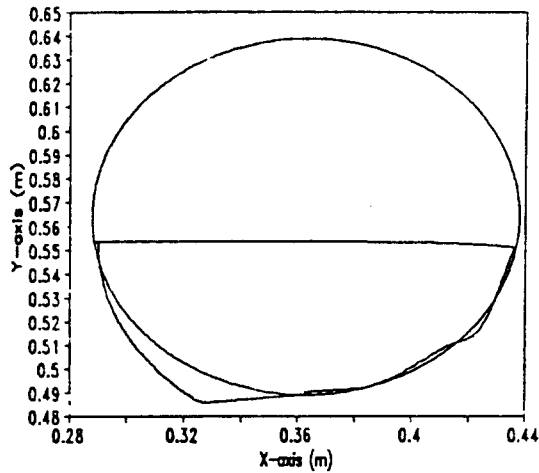


그림 4. 자기조절형 강성을 사용하지 않았을 경우의 실제 구동 매니퓰레이터의 성능 (위의 그림은 말단부의 경로이고 밑의 그림은 상호작용한 접촉력의 크기)

Fig. 4. Actual performance of the experimental apparatus on the task when self-learning stiffness was not used. The path of the end-point is shown on the top. The time history of interaction force is shown on the bottom.

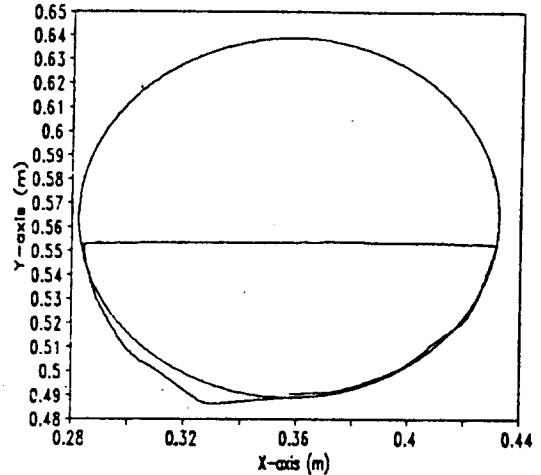


그림 5. 자기조절형 강성을 사용한 경우의 실제 구동 매니퓰레이터의 성능 (위의 그림은 말단부의 경로이고 밑의 그림은 상호작용한 접촉력의 크기)

Fig. 5. Actual performance of the experimental apparatus on the task when self-learning stiffness was used. The path of the end-point is shown on the top. The time history of interaction force is shown on the bottom.