비선형 강성 조절 방법을 이용한 로봇 매니퓰레이터의 컴플라이언스 제어 방법

A Compliance Control Method for Robot Manipulators Using Nonlinear Stiffness Adaptation

김 병 호, 오 상 록, 서 일 홍, 이 병 주
(Byoung-Ho Kim, Sang-Rok Oh, Il Hong Suh, and Byung-Ju Yi)

Abstract : This paper proposes a compliance control strategy for the robot manipulators accidentally interacting with an unknown environment. In the proposed method, each entry in the diagonal stiffness matrix corresponding to the task coordinate in a Cartesian space is adaptively adjusted during contact along the corresponding axis based on the contact force with its environment. This method can be used for both unconstrained and constrained motions without any switching mechanism which often causes undesirable instability and/or vibrational motion of the end-effector. The experimental results show the effectiveness of the proposed method by employing a two link direct drive manipulator interacting with an unknown environment.

Keywords : compliance control, robot manipulator

I. 서론

서비스 작업이나 산업용 자동화에 로봇 매니퓰레이터가 적용될 때, 일련의 접촉이 요구되는 다양한 작업이 있다. 이러한 작업들은 크게 비구속 공간에서의 동작과 매니퓰레이터와 외부환경간에 접촉이 발생되는 구속된 공간에서의 작업으로 분류할 수 있고, 접촉 동작은 비구속 공간에서 구속 공간으로 작업 공간이 바뀌는 순간 발생된다. 기존의 산업용 로봇을 위한 위치 제어기는 비구속 공간에서 원하는 경로를 잘 추종하도록 하고, 또한 외란에 대한 영향을 줄이기 위해 큰 강성 이득을 갖도록 하고 있다. 그러나 매니퓰레이터의 엔드이펙터(end-effector)와 외부환경 사이에 접촉이 발생되면, 크게 설정된 강성 이득으로 인하여 작은 위치 오차에도 불구하고 원하지 않는 큰 접촉력이 유발될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 직관적인 방법으로서 비구속 공간에서의 제어 알고리즘과 구속 공간에서의 제어 알고리즘을 각각 설계하고 접촉이 일어나는 순간 두 방법을 스위칭하여 사용하는 방법이 있는데, 이러한 방법은 실제 적용시 접촉을 감지하는 힘 센서 신호의 잡음 성분 등으로 인하여 접촉되는 순간 바운싱 현상을 유발하고 심한 경우는 시스템을 불안정하게 하기도 한다. 이러한 문제를 완화시키기 위한 방법으로서 컴플라이언스 제어 방법이 많이 연구되고 있는데[1], 대표적인 방법으로서 하이브리드(hybrid) 위치 및 힘 제어 방법이 있다[2][3]. 이 방법은 작업 공간을 힘 제어 방향과 위치 제어 방향으로 나누어 각각 제어 방법을 적용하는 직교 분해(orthogonal decomposition)에 기반을 둔 방법이다. 그러나 이러한 제어 구조는 사전에 주어진 작업의 특성을 파악하여 위치 제어 축과 힘 제어 축을 결정하여야 하기 때문에 매니퓰레이터의 엔드이펙터가 불확실한 외부환경과 접촉하는 경우에는 적합하지 않다. Oh[4] 등은 위치 오차에 기반을 둔 강성이득 조절 방법을 제시하였는데, 이 방법에서는 비구속 공간에서 큰 강성 이득으로 정확한 경로제어가 보장될 경우를 가정하였기 때문에 비구속 공간에서 원하지 않는 위치 오차 발생에 대한 강성 조정 메커니즘이 추가적으로 고려되어야 한다. 또한 Chiaverini[5]등은 강성 이득의 동조 과정을 갖는 병렬 제어 구조를 제안하였는데, 이 방법은 강성 이득 동조 알고리즘에 강성 회복 메커니즘이 포함되어 있지 않기 때문에 구속 공간에서 강성 이득이 동조 된 후, 작업공간이 비구속 공간으로 바뀌었을 때 원하는 경로를 추종하지 못하게 된다.

본 논문에서는 불확실한 접촉환경에 대응하기 위한 새로운 컴플라이언스 제어 방법을 제안하였다. 제안한 방법에서는 로봇 매니퓰레이터의 강성 이득이 매니퓰레이터의 엔드이펙터가 외부환경과 접촉할 때 발생되는 접촉력에 따라 자동으로 조정되기 때문에 작업공간에 관계없이 사용할 수 있다. 또한, 컴플라이언스 제어가 요구되는 협조 동작이나 부드러운 접촉 및 로봇 손의 파지 등에 응용할 수 있다. 본 논문에서는 2 관절 직접 구동 로봇을 이용한 실험을 수행하여 제안한 방법의 효용성을 확인하였다.

II. 비선형 강성 조절 방법을 이용한 새로운 컴플라이언스 제어 방법

1. 비선형 강성 이득 조절 방법

일반적으로, n 링크 로봇 매니퓰레이터가 외부환경과 접촉하는 경우, 로봇 매니퓰레이터의 엔드이펙터에서 느끼는 접촉력을 f 라고 하면, 로봇 동역학은 다음과 같이

접수일자 : 1999. 11. 24., 수정완료 : 2000. 5. 9.
김병호 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부, 한국과학기술연구원 지능제어연구센터
오상록 : 한국과학기술연구원 지능제어연구센터
서일홍, 이병주 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부

나타낼 수 있다.

$$t = \boldsymbol{M}(q)\ddot{q} + \boldsymbol{H}(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) + \boldsymbol{J}^T(q) f \qquad (1)$$

여기서, q, $\dot{q}$과 $\ddot{q}$는 각각 $n\times1$ 관절의 위치, 속도 및 가속도 벡터이다. t 는 구동기에 의해 공급되는 $n\times1$관절 토오크 벡터이다. $\boldsymbol{M}(q)$ 는 대칭이고 정칙(positive definite)인 $n\times n$ 관성 행렬을 나타내고, $\boldsymbol{H}(q,\dot{q})$ 는 $n\times1$원심력 및 전향력 벡터이며, $g(q)$ 는 중력을 나타내는 $n\times1$ 벡터이다. $\boldsymbol{J}(q)$는 $n\times n$ 자코비안 행렬이다.

로봇 매니퓰레이터가 외부환경 변화에 유연하게 대처하기 위하여 비구속 동작에서는 높은 강성 이득을 갖도록 하여 정확한 위치 추종을 하고, 구속 동작에서는 강성 이득을 적절히 조절하여 가능한 접촉력을 작게 하는 것이 필요하다. 이러한 목적을 달성하기 위해, 본 논문에서는 매니퓰레이터의 엔드이펙터에서 느끼는 접촉력에 따라 강성 이득을 스스로 조절하는 방법을 제안하고자 한다.

로봇 매니퓰레이터의 컴플라이언스 제어를 위해 관절 공간에서의 토오크 입력을 다음과 같이 간단하게 중력항을 보상하는 성분과 잘 알려진 PD형태의 합으로 제어 법칙을 제안한다.

$$t = \boldsymbol{K}_q(f)(q_d - q) - \boldsymbol{K}_d(f)\dot{q} + g(q) \qquad (2)$$

여기서, q_d 와 $\dot{q}_d$는 각각 원하는 관절 위치와 관절 속도를 나타내는 $n\times1$ 벡터이고, $\boldsymbol{K}_q$ 와 $\boldsymbol{K}_d$ 는 각각 위치 및 속도 궤환 이득을 나타내는 $n\times n$행렬이다.

또한 작업 공간(operational space)에서의 $n\times n$ 강성 행렬 $\boldsymbol{K}_c$ 와 관절 공간에서의 강성 행렬 $\boldsymbol{K}_q$ 는

$$\boldsymbol{K}_q = \boldsymbol{J}^T\boldsymbol{K}_c\boldsymbol{J} \qquad (3)$$

와 같은 관계에 있으므로[6] (3)을 작업 공간에서 표현하면 다음과 같다.

$$t = \boldsymbol{J}^T(q)(\boldsymbol{K}_c(f)(x_d - x) - \boldsymbol{K}_v(f)\dot{x}) + g(q) \qquad (4)$$

여기서 x, $\dot{x}$그리고 x_d 는 각각 직교 공간에서 로봇 매니퓰레이터 엔드이펙터의 실제 위치와 속도 그리고 원하는 위치를 나타내는 $n\times1$ 벡터이고, $\boldsymbol{K}_c(f)$ 와 $\boldsymbol{K}_v(f)$는 각각 정칙이며 대각선으로 주어지는 작업 공간에서의 강성 행렬과 감쇠 행렬이다.

기존의 강성 제어 방법[6]에서는 작업 공간에서 요구되는 컴플라이언스 특성을 정확히 알고 있다는 가정하에 위의 (3)을 이용하여 작업 공간에서 원하는 컴플라이언스 값을 관절 공간에서의 값으로 바꾸어 제어하는 방법을 사용하였다. 또한 하이브리드 위치/힘 제어 방법 [2] [3]에서도 작업 공간에서의 주어진 방법에 따라 힘 제어를 필요로 하는 축과 위치 제어를 필요로 하는 축을 사전에 정확히 알고 있다고 가정하여 요구되는 제어 특성에 따라 선택 행렬을 스위칭하여 사용하고 있다. 그러나 이러한 기존의 방법은 크게 다음과 같은 문제점을 갖고 있다. 첫째, 실제 로봇 매니퓰레이터를 응용하여 요구되는 작업을 수행하는 경우, 일반적으로 작업의 특성은 비구속 공간에서는 빠르게 주어진 경로를 이동하여 작업 시간을 줄이고, 구속 공간에서는 정교하게 작업하여 원하는 작업을 완수할 수 있도록 한다. 그런데 비구속 공간에서의 고속 경로 추종은 일반적으로 높은 강성 이득 값(이론적으로는 무한대 값)을 요구하는 반면, 접촉을 하면서 작업을 하는 구속 공간에서는 작은 강성 이득 값(이론적으로는 0)을 요구하기 때문에 로봇을 실제로 활용하는 경우 이를 모두 고려하여야 한다. 둘째, 공장에서 활용되는 로봇의 경우는 사전에 작업 환경을 정확히 알고 있다고 가정할 수 있지만, 서비스 로봇과 같이 외부환경에 대한 불확실성이 존재하는 경우에는 작업 환경을 사전에 정확히 알 수 없기 때문에 작업 환경을 고려하여 작업 공간에서의 원하는 강성 이득 값 또는 선택 행렬을 미리 정할 수 없다는 문제가 있다. 셋째, 구속 공간과 비 구속 공간에서 요구되는 서보 특성을 각각 구현한 후 이를 공간에 따라 스위칭하는 방법은 이론적으로는 가능하나 실제로는 센서의 잡음 성분, 동적 시스템의 동특성 및 시간 지연 등의 이유로 접촉하는 순간 바운싱 현상이 일어나기 쉽고, 심한 경우 시스템을 불안정하게 한다.

본 논문에서는 (4)로 제안한 간단한 형태의 제어 법칙이 위에서 열거한 세가지 문제점을 해결할 수 있도록 다음과 같이 비선형 강성 조절 방법을 아울러 제안한다. 여기서는 설명의 편의를 위해 작업 공간에서의 상태변수를 자세를 제외한 위치변수에 대해서만 기술한다.

(2)와 (4)에서

$$\boldsymbol{K}_q(f) = \boldsymbol{J}^T\boldsymbol{K}_c(f)\boldsymbol{J},\ \boldsymbol{K}_d(f) = \boldsymbol{J}^T\boldsymbol{K}_v(f)\boldsymbol{J} \qquad (5)$$

인 관계에 있고, (5)에서 $\boldsymbol{K}_c$ 와 $\boldsymbol{K}_v$ 를

$$\boldsymbol{K}_c(f) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{K}_{cx}\exp(-s_x\,|\,f_x\,|) & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{K}_{cy}\exp(-s_y\,|\,f_y\,|) & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{K}_{cz}\exp(-s_z\,|\,f_z\,|) \end{bmatrix}, \qquad (6)$$

$$\boldsymbol{K}_v(f) = \begin{bmatrix} a_x & 0 & 0 \\ 0 & a_y & 0 \\ 0 & 0 & a_z \end{bmatrix}\boldsymbol{K}_c(f) \qquad (7)$$

로 제안한다. (6)에서 $\exp(\cdot)$ 는 지수함수를 나타낸다. $\boldsymbol{K}_{cx}$, $\boldsymbol{K}_{cy}$, $\boldsymbol{K}_{cz}$ 는 각각 작업 공간에서의 x, y, z 축에 대한 강성 이득을 나타내며, 여기서는 비구속 공간에서 주어진 경로를 추종하고, 안정성을 보장하는 최대의 값으로 설정한다. 또한 s_x, s_y, s_z 는 지수함수의 기울기로서 적당한 양수로 선택한다. 그리고 f_x, f_y, f_z 는 각각 엔드이펙터에서의 각 축 방향에 대한 접촉력을, $|\cdot|$ 는 절대값을 나타낸다. 한편 (7)에서 a_x, a_y, a_z 는 각각 양수를 나타낸다.

위와 같이 제안한 강성 조절 방법은 다음과 같은 특성을 갖는다. 첫째, $\boldsymbol{K}_{cx}$, $\boldsymbol{K}_{cy}$, $\boldsymbol{K}_{cz}$ 는 비구속 공간에서 추종 성능을 만족시키기 위해 정한 고 이득 값으로 설

정되었으므로 (6)에서 작업 공간에서의 접촉이 없는 경우($f_x = f_y = f_z = 0$, $\exp(\cdot) = 1$) 의 강성 이득 값은 고 이득 값 그대로 유지되고, 접촉이 생기는 경우의 강성 이득 값은 접촉력의 크기에 따라 지수 함수적으로 급격히 줄어들게 된다. 따라서 제안한 방법은 비 구속 공간 및 구속 공간에서 요구되는 강성 이득 값의 특성을 모두 나타낼 수 있다. 둘째, 강성 이득 값이 작업 공간에서의 모든 축 방향을 고려하여 제안하였기 때문에 작업이 미리 정해진 산업용 로봇뿐만 아니라 서비스 로봇의 경우와 같이 불확실한 환경에서 작업을 하는 경우는 외부와의 접촉이 없는 축은 고 이득 값으로, 외부와의 접촉이 있는 경우는 접촉력에 지수적으로 반비례하는 강성 이득 값을 갖게 되어 미리 설정하지 않은 작업에 대해서도 효과적으로 사용할 수 있다. 셋째, 제안한 방법은 작업 공간이 구속 공간인가 혹은 비 구속 공간인가에 따라 제안한 것이 아니고 엔드이펙터가 외부와 접촉이 있느냐 없느냐에 따라 이득 값이 자동적으로 그리고 연속적으로 조절되도록 제안하였으므로 공간의 구속 여부에 따른 스위칭 메커니즘이 전혀 없어서 부드러운 접촉 및 로봇 손 등을 이용한 파지 등에 적용될 수 있다.

2. 안정성 해석

다음은 제안한 강성 조절 방법을 이용할 경우, 로봇 매니퓰레이터 시스템의 안정성에 관한 해석에 관하여 기술하고자 한다. 여기서 로봇 매니퓰레이터가 구속되지 않으면 접촉력은 없고, 외부환경의 마찰력은 무시하였다.

로봇 매니퓰레이터가 외부환경에 접촉할 경우 야기되는 힘 관계식은 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$f = \boldsymbol{K}_w (x - x_w) \tag{8}$$

여기서, $\boldsymbol{K}_w$ 는 외부환경의 강성을 나타내는 $n \times n$ 대각선 양의 행렬이고, x_w 는 외부환경이 놓여 있는 $n \times 1$ 위치 벡터이며, x 는 로봇 매니퓰레이터 엔드이펙터의 실제 위치를 나타내는 $n \times 1$ 위치 벡터이다.

로봇 매니퓰레이터가 외부환경과 접촉상황에 있을 때, (4) (7)에 의해 로봇 매니퓰레이터의 폐루프 동력학 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{M}(q)\ddot{q} + \boldsymbol{H}(q,\dot{q})\dot{q} \\ &= \boldsymbol{J}^T(q)(\boldsymbol{K}_c(f)\tilde{x} - \boldsymbol{K}_v(f)\dot{x} - \boldsymbol{K}_w(x - x_w)) \end{aligned} \tag{9}$$

여기서, $\tilde{x} (= x_d - x)$ 는 매니퓰레이터 엔드이펙터의 위치 오차를 나타낸다.

로봇 매니퓰레이터 시스템의 안정성을 해석하기 위해, 다음과 같은 리아푸노프(Lyapunov) 함수를 정의한다.

$$\begin{aligned} V = &\frac{1}{2}\dot{q}^T \boldsymbol{M}(q)\dot{q} + \frac{1}{2}\tilde{x}^T \boldsymbol{K}_c(f)\tilde{x} \\ &+ \frac{1}{2}(x - x_w)^T \boldsymbol{K}_w (x - x_w) \end{aligned} \tag{10}$$

(10)을 미분하고, 자코비안 관계식 $\dot{x} = \boldsymbol{J}(q)\dot{q}$을 이용하면, (10)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} = &\frac{1}{2}\dot{q}^T \dot{\boldsymbol{M}}(q)\dot{q} + \dot{q}^T \boldsymbol{M}(q)\ddot{q} + \frac{1}{2}\tilde{x}^T \dot{\boldsymbol{K}}_c(f)\tilde{x} \\ &- \dot{q}^T \boldsymbol{J}^T(q)\boldsymbol{K}_c(f)\tilde{x} + \dot{q}^T \boldsymbol{J}^T(q)\boldsymbol{K}_w(x - x_w) \end{aligned} \tag{11}$$

(9)를 $\boldsymbol{M}(q)\ddot{q}$에 대하여 나타내고, (11)에 대입하여 정리하면, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} = &\dot{q}^T(\frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{M}}(q) - \boldsymbol{H}(q,\dot{q}))\dot{q} \\ &- \dot{q}^T \boldsymbol{J}^T(q)\boldsymbol{K}_v(f)\boldsymbol{J}(q)\dot{q} + \frac{1}{2}\tilde{x}^T \dot{\boldsymbol{K}}_c(f)\tilde{x} \end{aligned} \tag{12}$$

비대칭 성질을 (12)에 적용하고, (7)을 이용하면, 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\dot{V} = -\dot{x}^T \begin{bmatrix} a_x & 0 & 0 \\ 0 & a_y & 0 \\ 0 & 0 & a_z \end{bmatrix} \boldsymbol{K}_c(f)\dot{x} + \frac{1}{2}\tilde{x}^T \dot{\boldsymbol{K}}_c(f)\tilde{x} \tag{13}$$

여기서

$$x = [x_x \quad x_y \quad x_z]^T, \; \tilde{x} = [\tilde{x}_x \quad \tilde{x}_y \quad \tilde{x}_z]^T .$$

(13)을 재정리하면, $\dot{V} < 0$ 인 조건을 만족시키기 위한 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$2a_x \dot{x}_x^2 + \tilde{x}_x^2 s_x \dot{f}_x > 0 , \tag{14}$$

$$2a_y \dot{x}_y^2 + \tilde{x}_y^2 s_y \dot{f}_y > 0 , \tag{15}$$

$$2a_z \dot{x}_z^2 + \tilde{x}_z^2 s_z \dot{f}_z > 0 . \tag{16}$$

(14) (16)으로부터 안정성을 만족시키기 위한 충분 조건을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$0 \le s_x < \frac{2a_x \dot{x}_x^2}{\tilde{x}_x^2 |\dot{f}_x|} , \tag{17}$$

$$0 \le s_y < \frac{2a_y \dot{x}_y^2}{\tilde{x}_y^2 |\dot{f}_y|} , \tag{18}$$

$$0 \le s_z < \frac{2a_z \dot{x}_z^2}{\tilde{x}_z^2 |\dot{f}_z|} . \tag{19}$$

(17) (19)로부터, 제안한 비선형 강성 조절 방법에서 안정성을 만족하기 위한 충분 조건으로서 적절한 s_x, s_y, s_z 설정이 필요함을 확인할 수 있다. 특히 저속에서 힘 신호가 크게 변동할 때는 기울기 s_x, s_y 그리고 s_z가 각각 0이상이 될 수 있도록 충분히 큰 a_x, a_y 그리고 a_z를 설정해 주어야 함을 알 수 있다. 한편, 제안한 방법에서 기울기를 0으로 설정하면, 기존의 강성 제어 방법과 동일하게 된다.

일반적으로 로봇 매니퓰레이터를 사용하는데 있어서 엔드이펙터에서의 각 축에 대한 속도나 힘 신호의 크기는 시스템의 사양에 의해 최대 및 최소값이 사전에 결

정될 수 있다. 또한 a_x, a_y, a_z 는 비 구속 공간에서 안정하게 주어진 경로를 추종하도록 하는 미분 이득을 결정해 주는 파라미터로서 비 구속 공간에서 최대값이 결정될 수 있다. 따라서 s_x, s_y, s_z 가 선택될 수 있는 최대 범위가 정해지게 되는데, 본 논문에서는 이 범위내에 존재하는 적절한 값을 선택함으로써 구속된 동작에서의 컴플라이언스를 적절히 조절해 줄 수 있음을 보인다.

III. 구현 및 실험 결과

1. 실험 장치 구현 및 작업 계획

제안한 컴플라이언스 제어 방법의 효용성을 확인하기 위한 제어 블록도는 그림 1과 같다. 그림 1에서 작업 계획기(task planner)는 경로 추종 오차의 최소화와 부드러운 접촉의 유지를 위한 목적을 달성하기 위한 구속된 경로를 설정한다. 이때 접촉력을 생성하기 위한 방법으로서 의도적으로 가상의 경로를 매니퓰레이터의 엔드이펙터가 부딪히는 표면의 내부에 설정한다.

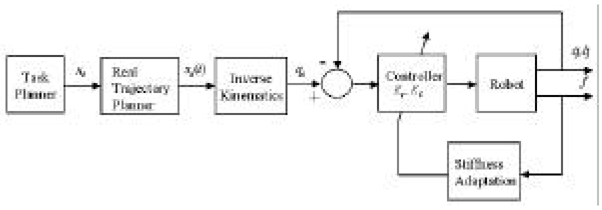


그림 1. 컴플라이언스 제어를 위한 블록도.

Fig. 1. The block diagram for compliant contact control.

본 논문에서 실험에 이용된 작업은 그림 2와 같다. 그림 2에서 로봇 매니퓰레이터의 엔드이펙터는 비구속 공간의 시작점 A를 출발하여 구속된 공간을 지나 다시 시작점A로 돌아 온다. 여기서 가상의 경로는 그림 2에 나타낸 원의 일부분으로서 빗 금친 외부환경의 내부 구간으로 설정되고, 매니퓰레이터 엔드이펙터에 대한 속도 궤적은 그림 3과 같다. 여기서, $t_1 = \frac{1}{5}t_f$, $t_2 = \frac{4}{5}t_f$ 이다.

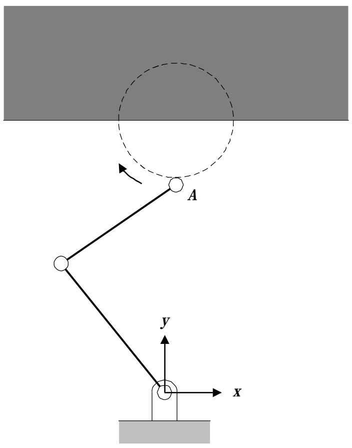


그림 2. 외부환경과 접촉하는 2링크 로봇 매니퓰레이터.

Fig. 2. A compliant contact task of two link robot interacting with an environment.

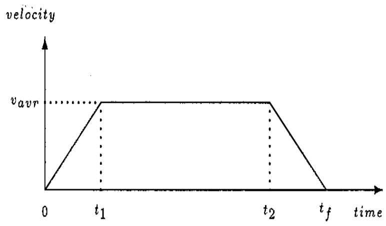


그림 3. 속도 궤적.

Fig. 3. Velocity profile.

본 논문에서는 제안한 컴플라이언스 제어 방법의 효용성을 실험적으로 확인하기 위하여 자체 개발한 2 링크 직접 구동 로봇 매니퓰레이터가 사용되었고, 그림 4에 나타내었다. 개발한 로봇 매니퓰레이터의 각 관절은 메가 토오크 모터(1축 : Model No. RS1410FN001, 2축: Model. No. RS0608FN001, Nippon Seiko Ltd.)에 의해 구동되고, 관절의 위치정보는 각 축에 장착된 레졸버에 의해 얻는다. 속도정보는 위치정보를 미분하여 사용하였다. 또한, 매니퓰레이터의 엔드이펙터에는 6축 힘/토오크 센서(Model No. 67M25A-I40, JR3 Inc.)가 부착되어 있다. 이러한 로봇 매니퓰레이터의 물리적인 사양은 표 1에 제시하였다.

그림 4. 2 링크 직접 구동 로봇 매니퓰레이터 및 제어 시스템.

Fig. 4. Two link direct drive robot and its control system.

표 1. 로봇 매니퓰레이터의 물리적인 사양.

Table 1. Physical parameters of the robot manipulator.

항 목	링크 1	링크 2
길이(m)	0.403	0.453
링크의 질량(K_g)	22	12
모터의 질량(K_g)	73	14
모터의 회전질량(Inertia) ($K_g fm^2$)	1.07	0.031

로봇 매니퓰레이터는 그림 5에 나타낸 VME 버스 기반 제어 시스템에 의해 실시간으로 제어 된다. 주 제어

루프는 자체 개발한 DSP 서어보 제어기에서 동작한다. 매니퓰레이터 엔드이펙터의 접촉력은 힘/토오크 인터페

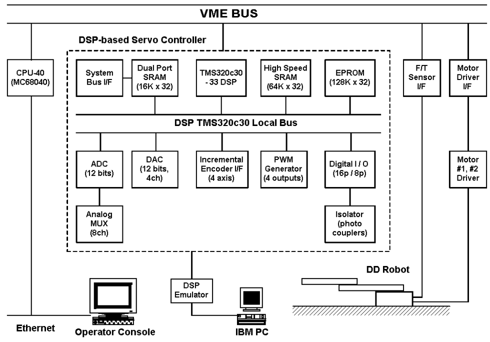


그림 5. 2 링크 로봇 매니퓰레이터를 위한 제어 시스템 블록도.

Fig. 5. The control system block diagram for two link robot manipulator.

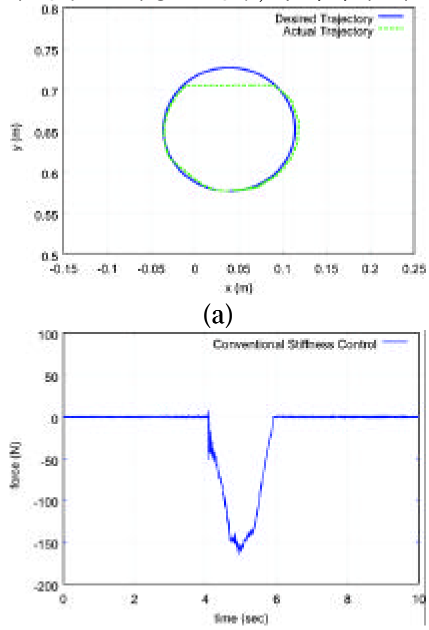
이스 보드에 의해 얻은 다음, 필터링을 통해 잡음을 제거한 후, VME 버스를 통해 DSP 서어보 제어기와 CPU 보드(MC68040, Force Computers)로 전달되어 신호처리에 이용된다. 아날로그 신호는 내장된 A/D 변환기에 의해 샘플링 되며, 토오크 명령은 D/A 변환기를 통하여 구동기로 전달된다. 위치 신호는 매 샘플링 시간 마다 레졸버에 의해 측정된다. 제어 알고리즘은 C 언어를 사용하였고, 샘플링 시간은 5msec이며, 운영체제는 VxWorks[7]를 사용하였다.

2. 실험 결과

제안된 컴플라이언스 제어 방법의 효용성을 확인하기 위하여 그림 2와 같은 접촉 작업을 대상으로 실험을 수행하였다. 실험에서 주어진 원 운동의 직경은 15cm이고, 수행 시간은 10sec로 정하였다. 초기의 엔드이펙터의 강성 이득 K_{cx}, K_{cy} 는 각각 4265로 설정하였고, a_x, a_y 는 각각 0.01로 설정하였다.

실험 결과는 그림 6, 그림 7 그리고 그림 8에 보였다. 실험을 통하여 엔드이펙터가 외부환경에 접촉하게 되는 순간에 접촉력의 진동이 발생되는 현상을 경험할 수 있었다. 이러한 현상은 비 구속 공간에서 주어진 경로를 잘 추종하기 위해 설정된 고 강성 이득에 의해 엔드이펙터가 접촉상황, 즉 구속 공간에서 부드럽게 대처하지 못하는 현상으로 인한 진동으로 판단되며, 이러한 현상이 심할 경우에 엔드이펙터나 외부환경이 심각한 손상을 입을 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 6은 일정한 강성 이득을 사용하는 기존의 방법을 사용한 경우이고, 그림 7과 그림 8은 제안한 접촉력 기반 조절형 강성 함수를 사용하는 경우인데, 주어진 작업의 모든 단계에서 안정된 응답을 보이고 있고, 경로 추종 응답은 거의 비슷하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

한편, 구속 공간에서 나타나는 접촉력 응답은 아주 다르게 나타나고 있다. 그림 6으로부터 일정한 강성 제어 방법이 사용되면, 접촉력이 위치 오차에 따라 급격히 증가하고, 이에 따른 반응력이 증가함을 확인할 수 있다. 그러나 그림 7과 그림 8을 살펴보면, 제안한 컴플라이언스 제어 방법을 사용한 경우, 접촉력이 비교적 작게

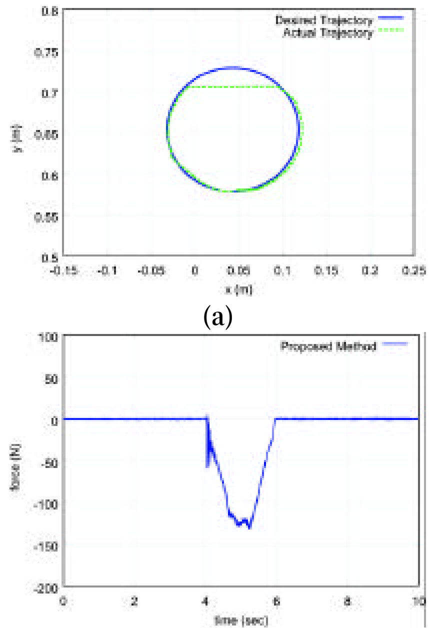


(a)

(b)

그림 6. 고정된 강성 이득을 사용한 경우의 경로 궤적 및 접촉력 추이. (a) 경로 궤적, (b) 접촉력 추이.

Fig. 6. Actual position and force trajectories in case of when the fixed stiffness gains are used. (a) Position trajectory, (b) Contact force trajectory.



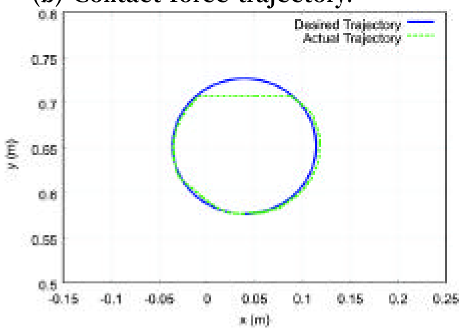
(a)

(b)

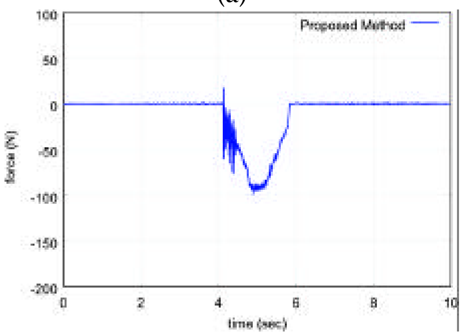
그림 7. 조절형 강성 이득을 사용한 경우의 경로 궤적 및 접촉력 추이($s_x = s_y$ = 0.005). (a) 경로 궤적, (b) 접촉력 추이.

Fig. 7. Actual position and force trajectories in case of when adaptive stiffness gains are

used($s_x = s_y = 0.005$). (a) Position trajectory, (b) Contact force trajectory.



(a)



(b)

그림 8. 조절형 강성 이득을 사용한 경우의 경로 궤적 및 접촉력 추이($s_x = s_y = 0.015$). (a) 경로 궤적, (b) 접촉력 추이.

Fig. 8. Actual position and force trajectories in case of when adaptive stiffness gains are used($s_x = s_y = 0.015$). (a) Position trajectory, (b) Contact force trajectory.

나타나고 있음을 확인할 수 있고, 그림 8에서 보는 바와 같이 기울기를 증가 시킴으로써 한층 더 접촉력을 작게 만들 수 있음을 알 수 있다. 한편, 초기 상태 또는 경로가 바뀌는 지점에서 힘 신호의 진동폭이 크게 나타나는데, 이러한 현상은 접촉력에 따라 엔드이펙터의 강성 이득 변화에 따른 미분 이득이 변화함으로써 나타나는 현상으로 판단된다. 따라서 신중한 기울기의 설정이 요구된다.

IV. 결론

본 논문에서는 로봇 매니퓰레이터가 외부환경과 접촉할 때, 외부환경에 순응하여 유연하게 대처할 수 있는 컴플라이언스 제어 방법을 제안하였다. 그리고 접촉 상황에 대한 실험을 통하여 제안한 방법의 효용성을 확인하였다. 제안한 컴플라이언스 제어 방법은 로봇 매니퓰레이터가 외부환경과 접촉할 때 발생하는 접촉력에 따라 매니퓰레이터의 강성을 자동적으로 조절하는 방법으로서, 스위칭 메커니즘을 사용하지 않기 때문에 작업 공간에 관계없이 적용할 수 있고, 로봇이 외부환경에 대한 사전 정보를 갖지 않는 경우에 유용하게 이용될 수 있다. 추후의 연구에서는 제안한 방법을 컴플라이언스 제어가 요구되는 다양한 분야에 적용하고자 한다.

참고문헌

[1] M. Vukobratovic and A. Tuneski, "Contact control concepts in manipulation robotics-an overview," *IEEE Trans. on Industr. Electro.*, vol, 41, no. 1, pp. 12-24, February, 1994.

[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] 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 Automation*, vol. 33, pp. 386-392, 1987.

[4] S.-R. Oh, H. C. Kim, I. H. Suh, B.-J. You, and C.-W. Lee, "A compliance control strategy for robot manipulators using a self-controlled stiffness function," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 179-184, August, 1995.

[5] S. Chiaverini, B. Sicilliano, and L. Villani, "Force and position tracking : parallel control with stiffness adaptation," *IEEE Control Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 27-33, 1998.

[6] J. K. Salisbury, "Active stiffness control of manipulator in cartesian coordinates," *Proc. of IEEE 19th Conf. on Decision and Control*, pp. 95-100, 1980.

[7] VxWorks Manual, *Real-Time Operating System*, Wind River Systems, 1992.

김 병 호

1966년 2월 18일생. 1989년 금오공대 전자공학과(공학사). 1994년 동대학원(공학석사), 1995년 현재 한양대 전자컴퓨터공학부(박사과정)/한국과학기술연구원 지능제어연구센터 학생연구원. 관심분야는 biomimetic compliance control, multi-fingered robot/artificial hands and multiple arm control, macro/micro mechanism and intelligent control.

서 일 홍

제어、자동화、시스템공학 논문지 제6권, 제4호, 참조.

오 상 록

제어、자동화、시스템공학회 논문 제6권, 제4호, 참조.

이 병 주

1960년 6월 7일생. 1984년 한양대 기계공학과(공학사). 1986년 텍사스 주립대(오스틴) 기계공학과(공학석사). 1991년 동 대학원(공학박사). 1992년 1995년 한국기술교육대 제어기계공학과 조교수. 1995년~현재 한양대 전자컴퓨터공학부 부교수. 관심분야는 biomechanical system modeling and analysis, parallel/multiple arm and multi-fingered hands design and control, haptic interface, 여유자유도/여유구동 로봇 시스템, animation of dynamic systems.