

반복 학습 방법을 이용한 로봇 매니퓰레이터의 힘 제어

# A Force Control of Robot Manipulator Based on the Iterative Learning Control

김대환(Daehwan Kim)\*, 한창수(Changsoo Han)\*\*, 김갑순(Gabsoon Kim)\*\*\*

(\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과, \*\* 한양대학교 기계공학과)

(\*\*\* 한국표준과학연구원)

## ABSTRACT

The purpose of this paper is to study the force control law which can be implemented on a non-modified robot system. The external force control algorithm proposed in this paper can be designed by means of a classical and modern control law. We showed the validation and the possibility of multi-dimensional force control idea through the simulations and experiments. Also, the Iterative learning control is studied for compensating errors due to the disturbances and nonlinear effects. The previous information(control input, error) was used to determine the control input of next trial. The experimental result show the validity of this algorithm.

## 1. 서 론 (Introduction)

산업용 로봇의 용융은 크게 두 가지로 분류되는데, 그 하나는 외부 환경과의 상호작용 없이 공간을 운동하는 것이고, 또 하나는 외부 환경과 상호 작용을 하며 운동하는 것이다. pick-and-place, 페인트 칠하기와 같은 작업들은 순수한 위치 제어로 상당한 성능을 발휘하지만 조립, 연삭(grinding), 베링 가공(deburring), 연마(polishing), 유리창 닦기 등과 같이 외부 환경과 접촉이 일어나는 경우에는 순수한 위치 제어로 써는 그 성능을 발휘할 수가 없다. 산업 현장에 있는 매니퓰레이터는 위치 제어의 정확성을 높이기 위하여 강성을 높게 할 수밖에 없었다. 이러한 상황에서 위치 제어만을 한다면 미세한 오차와 환경의 불확실성 때문에 예기치 못한 일이 발생하게 된다. 매니퓰레이터의 높은 강성 때문에 미세한 오차라 할지라도 상당히 큰 접촉힘(contact force)이 발생하기 때문에 작업 대상물이나 말단부(end-effector)의 파손을 초래하게 된다. 그러므로 위치 제어뿐만 아니라 작업 대상물에 원하는 힘과 말단부나 시스템에 안정할 수 있는 힘을 정의하여 힘 제어에 의해 안정화(regulation) 시켜야 한다.

지난 30여년간 힘 제어에 관한 연구는 꾸준한 발전을 거듭해 왔다. Paul과 Shimano<sup>[1]</sup>는 힘 제어 방향과 가장 근사화된 관절(joint)을 선택하여 제어하는 방법(free-joint method)을 제안했다. 그러나 이 방법은 관절 좌표(joint coordinate)와 커플레이언스 좌표(compliance frame)가 같은 카테시안 로봇에만 적당하다는 단점이 있다. Raibert와 Craig<sup>[3]</sup>가 제안한 혼합 제어(hybrid control)는 조작자가 힘 제어 방향과 위치 제어 방향을 선택할 수 있는 방법이다. 이러한 선택은 compliance selection matrix에 의해 이루어지는데 힘 제어이면 1, 위치 제어이면 0을 갖는 대각 행렬(diagonal matrix)이다. 모든 자유도로부터 힘 제어와 위치 제어의 분리는 주어진 작업에 해당하는 기계적, 기하학적 특성으로부터 생기는 자연적 구속(natural constraints)에 의해 이루어지고 인위적 구속(artificial

constraints)에 의해 원하는 힘과 궤적에 규명된다.<sup>[3,4]</sup> 그러나 이 방법은 레버루트 매니퓰레이터(revolute manipulator)에 적용되었을 경우 기구학적 불안정(kinematic instability)이 발생하는 단점이 있다. Salisbury<sup>[5]</sup>는 active stiffness control을 제안하였다. 여기서 active란 힘을 측정하는데 센서를 사용했다는 것을 의미한다. Nominal position과 실제 위치와의 차를 구해서 여기에 관절 강성 매트릭스(joint stiffness matrix)를 곱해 제어 입력을 결정한다. 이 방법은 매니퓰레이터가 어떤 기구학적 특이점(kinematic singularity point)에서는 실패하게 된다. 그러나 관절 공간에서 제어가 이루어지기 때문에 계산상의 이점이 있다. 그래서 Paul과 Hong<sup>[6]</sup>은 혼합제어의 계산상의 부담과 stiffness control의 기구학적인 특이점에 대한 문제점을 지적하고 수정된 혼합 제어를 제안했다. 또한 선형화된 상태 공간 모델을 이용하여 stiffness control과 혼합제어의 기구학적 안정성을 해석하였고 안정하기 위한 조건들을 제시하였다.<sup>[7]</sup> Hogan<sup>[8]</sup>의 impedance control은 접촉 시의 동력학적인 상호작용이 제거되어야 할 외란의 근원이 아니라는 것을 강조했다. 즉, 로봇 작업은 운동에 대해서 또는 힘에 대해서 묘사되는게 아니라 그들 사이의 관계(impedance)에 대해서 묘사되어야 한다고 주장했다. 다시 말하면 로봇의 원하는 거동 즉, 목적 임피던스(target impedance)를 정의하는 것이다. 그러나 힘 센서를 가지고 접촉힘을 직접 측정하지 않는다는 단점이 있다.

위에 열거한 다양한 힘 제어 방식들은 로봇에 입력되는 것이 토크이기 때문에 동력학을 풀어야 하는 부담이 있고 산업 현장에 있는 속도 서보, 위치 서보를 이용한 로봇 제어 시스템에 대해서는 하드웨어를 바꿔야 하는 단점이 있다.<sup>[9]</sup> 따라서 본 연구에서는 위치 제어 시스템이 존재할 경우 동력학 문제를 풀거나, 하드웨어의 교체없이 힘 제어를 원활히 할 수 있는 external force control<sup>[10,11]</sup>을 이용한 힘 제어를 구현하기로 한다.

그러나 외란과 모델링의 불확실성, 비선형성, 기계 요소의 누호 등에 의하여 단지 귀환 제어(feedback control)로 써는 그

성능을 발휘할 수가 없다. 또한 다양한 입력에 대한 응답이 만족스럽지 못하다. 로봇의 작업이 고정된 시간 주기를 갖고 반복 작업을 할 때 학습 제어(learning control)는 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다.<sup>[13,15]</sup> Arimoto는 학습 제어의 수렴성, 강인성을 보였으며, 힘 제어에 적용을 하였다.<sup>[12,14]</sup> 학습 제어의 기본 개념은 과거(last trial)의 시행착오로부터 얻은 오차와 입력을 이용하여 다음 시행(next trial)의 feedforward input history를 만드는 것이다. 또 한가지의 동기는 시스템이 다양한 기준 입력에 정확히 응답해야 한다는 것이다.<sup>[16]</sup> 위와 같은 이유로 본 연구에서는 힘 제어에 Arimoto가 제안한 학습 제어를 적용하기로 한다.

## 2. 컴플라이언스와 힘 제어

컴플라이언스 운동은 매니퓰레이터의 위치가 작업의 기하학적 모양에 의해 구속될 때 생기게 된다. 컴플라이언스 운동은 매니퓰레이터 자체에 있는 passive 컴플라이언스, 또는 서보루프(servo loop)에 내재되어 있는 active 컴플라이언스에 의해 생긴다. 후자를 힘 제어라 한다. passive 컴플라이언스는 성능에는 이점이 있지만 프로그램성(programmability)이 떨어진다. 따라서 특정한 응용에 필요한 컴플라이언스를 그때 그때 만들어야 한다는 단점이 있다. 탁자 위를 미끄러지는 경우의 매니퓰레이터는 아래 방향으로 구속을 받게 된다. 또 한 예로 서랍을 여는 경우를 생각해 보면, 단지 서랍 축에 대한 병진 운동만이 가능할 뿐 그 외의 다른 운동은 구속을 받게 된다. 이러한 컴플라이언스 운동은 산업 현장에서 매우 중요한 응용 분야가 되었다.

순수한 위치 제어와 순수한 힘 제어의 차이는 다음의 예를 들어봄으로써 확인하게 나타난다. 만약에 매니퓰레이터의 말단부가 움직일 수 없도록 강체 속에 묻혀 있다면 위치적인 자유도는 전혀 존재할 수 없게 되고 위치 제어는 무의미하게 된다. 그러나 매니퓰레이터는 완전한 힘 자유도를 갖게 된다. 이러한 경우에는 순수한 힘 제어가 적당하다. 반대로 자유 공간에 있는 매니퓰레이터의 경우를 생각해 보면 여기에는 어떤 힘 자유도도 없다. 왜냐하면 필요한 반발력의 균원이 없기 때문이다. 따라서, 매니퓰레이터의 위치에 어떠한 구속도 없기 때문에 이 경우에는 순수한 위치 제어가 적당하다.

위치 제어와 힘 제어 사이의 이러한 이원성(duality)은 자연적 구속과 인위적 구속에 대해서 표현되어질 수 있다. 자연적 구속은 작업의 기계적, 기하학적 특성에 의해 생기는 구속이다. 이러한 자연적 구속은 C-surface(configuration space)에서 수직한 방향으로 위치 구속이 생기고 접선 방향으로 힘 구속이 존재한다. 여기서 C-surface란 말단부의 이동 가능한 위치를 말하며 단지 부분적인 위치 자유도를 허용한다. 우리가 원하는 위치와 힘은 인위적 구속에 의해서 결정되는데 자연적 구속과 직교(orthogonal)하게 결정된다. 따라서 인위적 구속은 C-surface에 수직한 방향으로 힘 구속이 생기고 접선 방향으로 위치 구속이 존재하게 된다.

따라서, 컴플라이언스가 존재하는 경우 위치와 힘에 구속이 생기기 때문에 순수한 위치 제어는 그 기능을 다하지 못한다. 따라서 순수한 위치 제어보다는 힘과 위치를 동시에 제어해야 한다는 것을 알 수가 있다.

## 3. External Force Control.

1차원 external force control의 블록 선도는 Fig.3.1과 같다.

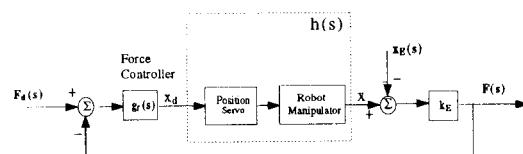


Fig.3.1 General scheme of one-dimensional external force control.

원하는 힘과 실제 힘 사이의 차이는 힘 제어기의 입력으로 들어가서 원하는 위치 명령을 생성하게 된다. 로봇의 실제 위치와 환경 위치  $x_E$ 와의 차이는 강성에 의하여 접촉힘을 발생하게 된다. 이 접촉힘은 위치 제어 루프에 외란으로써 작용하게 된다. 따라서, 힘 제어기의 설계 문제는 폐루프 위치 전달 함수  $h(s)$ 가 주어져 있을 때 적당한 힘 제어기를 찾는 것이다. Fig.3.1의 전달함수를 구해 보면 Eq.(3.1)과 같다.

$$F(s) = \frac{k_{EG}(s) h(s)}{1 + k_{EG}(s) h(s)} F_d(s) - \frac{k_E}{1 + k_{EG}(s) h(s)} x_E(s) \quad (3.1)$$

Eq.(3.1)에서 외란에 의한 차이 전달함수를 구해 보면 Eq.(3.2)와 같다.

$$E(s) = \frac{k_E}{1 + k_{EG}(s) h(s)} x_E(s) \quad (3.2)$$

따라서, 외란  $x_E(s)$ 에 의한 정상 상태 오차는 Eq.(3.3)과 같다.

$$\Delta F_s = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s k_E}{1 + k_{EG}(s) h(s)} x_E(s) \quad (3.3)$$

만약  $h(s)$ 가 type-0 시스템이라면, Eq.(3.3)에서 알 수 있듯이 적분 요소가 없으면 정상 상태 오차가 생김을 알 수 있다. 따라서 힘 제어기  $g_r(s)$ 에는 적분 요소가 있어야 한다는 것을 알 수 있다. 또한 강성  $k_E$ 를 보상하기 위해서  $k_E^{-1}$ 항을 포함해야 한다. 그리고  $x_E(t) = x_0 t$ 에 대한 정상 상태 힘 오차는 다음과 같다.

$$\Delta F_s = \frac{1}{\lim_{s \rightarrow 0} s g_r(s) h(s)} x_0 = \frac{x_0}{K_{vx}} \quad (3.4)$$

$$K_{vx} = \lim_{s \rightarrow 0} s g_r(s) h(s): \text{static velocity error coeff.}$$

여기서,  $K_{vx}$ 는 접촉 컴플라이언스  $k_E^{-1}$ 에 비례함을 알 수 있다. External force controller를 설계하기 위해서는 위치 제어 전달함수를 구해야 한다. 위치 제어 전달함수를 Eq.(3.5)와 같이 2차 선형 시스템으로 가정한다면, 스텝 응답을 이용하여 각 파라메터를 찾을 수 있다. 2차로 가정할 수 있는 근거는 실현을 통하여 응답을 구해 본 결과 전형적인 2차 시스템의 응답 특성을 보였고 이것은 다른 고차의 극점들이 있다 하더라도 시스템의 응답에 별로 영향을 주지 못하거나 그 영향이 빨리 없어진다는 것을 의미하기 때문이다. 따라서 위치 제어 전달함수를 만다면 전형적인 제어 법칙에 의해서도 힘 제어기를 설계할 수 있다.

### 3.1 Integral Control.

$$g_E(s) = k_E^{-1} k_{fi} \left( \frac{1}{s} \right) \quad - (3.5)$$

여기서,  $k_E$ 는 환경의 강성이고  $k_{fi}$ 는 적분 계인을 나타낸다. 가장 간단한 방법이지만 정상 상태 오차를 없애 준다는 특징이 있다. 이 방법은 explicit force feedback (generalized damping control) 방법과 유사하다. Eq.(3.5)를 Eq.(3.2)에 대입하여 정리하면 외란에 의한 에러 전달함수는 다음과 같다.

$$E(s) = \frac{k_E s (s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)}{s^3 + 2\xi\omega_n s^2 + \omega_n^2 s + k_E \omega_n^2} x_E(s) \quad - (3.6)$$

Eq.(3.6)의 특성 방정식은 Eq.(3.7)과 같고 Routh criteria를 이용하면 안정하기 위한 계인의 범위를 구할 수 있다.

$$s^3 + 2\xi\omega_n s^2 + \omega_n^2 s + k_E \omega_n^2 = 0 \quad - (3.7)$$

$$0 < k_E < 2\xi\omega_n$$

Fig.3.2는 적분 계인  $k_E$ 에 따른 극점들의 위치를 도시하였고  $k_E$ 가 커짐에 따라 점점 불안정해짐을 알 수 있다.

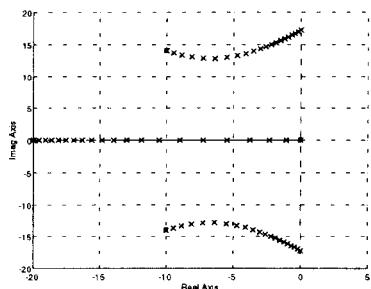


Fig.3.2 Pole location of I-control.

### 3.2 Proportional-Integral Control.

$$g_E(s) = k_E^{-1} (k_{fp} + k_{fi} \frac{1}{s}) \quad - (3.8)$$

여기서,  $k_{fp}$ 는 비례 계인,  $k_{fi}$ 는 적분 계인을 나타낸다. 같은 방법으로 정리하면 안정하기 위한 계인의 범위는 Eq.(3.9)와 같고 극점의 위치는 Fig.3.3과 같다.

$$K_{fp} > 0$$

$$0 < K_{fi} < 2\xi\omega_n (1 + K_{fp}) \quad - (3.9)$$

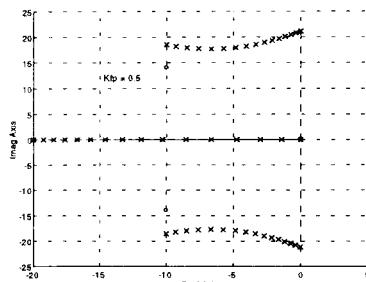


Fig.3.3 Pole location of PI-control.

### 3.3 State Feedback Control.

상태 공간 접근법(state space approach)은 개루프(open loop) 전달함수  $k_E g_E(s)$ 를 이용하면 된다. Eq.(3.5)에서  $g_E(s)$ 는 2차로 가정하였기 때문에 적분 요소를 갖고 있지 않다. 그렇기 때문에 feedforward path의 에러 비교기와 플랜트 사이에 적분 요소를 침가하면, 상태 공간 모델은 3차가 된다. 블록 선도로 나타내면 Fig.3.4와 같다.

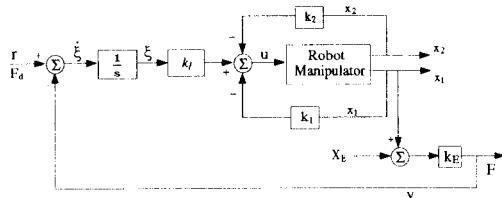


Fig.3.4 State feedback diagram.

Fig.3.4의 상태 공간 모델은 다음과 같다. 스텝 응답에 대한 정상 상태 오차를 줄이기 위하여 적분기를 하나 침가했기 때문에 전체 시스템은 3차가 된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \\ u &= -Kx + k_1 \xi \\ \xi &= r - y = r - Cx \end{aligned} \quad - (3.10)$$

여기서,

$$x = \text{상태 벡터}(n \times 1)$$

$$A, B, C = \text{상태}(n \times n), \text{입력}(n \times 1), \text{출력}(1 \times n) \text{ matrix}$$

위의 상태 방정식으로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{e} = \hat{A}e + \hat{B}u_e \quad - (3.11)$$

여기서,

$$e(t) = \begin{bmatrix} x_e(t) \\ \xi_e(t) \end{bmatrix} = (n+1)\text{-vector}$$

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$u_e = -\hat{K}e$$

$$\hat{K} = [K \mid -k_1]$$

Eq.(3.11)은 에러를 0으로 하는 3차 regulator system을 설계하는 문제로 바뀐다. 따라서 극점 배치(pole placement) 방법을 이용하여 시스템이 우리가 원하는 극점을 갖도록 설계할 수 있다. 그러나 실제 문제에 있어서는 엑츄에이터의 성능에 한계가 있기 때문에 포화 현상(saturation)이 일어나는 경우가 많다. 따라서 적당한 계인은 실험을 통해 결정하는 경우가 많다.

## 4. 반복 학습 방법을 이용한 힘 제어

### 4.1 반복 학습 제어

오늘날 산업 현장에서 작업을 하고 있는 대부분의 로봇들은 어떤 주기( $T$ )를 갖고 운동을 반복하게 된다. 미리 정해진 궤적을 추적(tracking)함에 있어서 오차가 존재하더라도 매 주기마다 똑같은 오차를 가지고 작업을 하게 된다. 학습 제어(learning control, betterment process)의 기본 개념은 과거(last trial)의 시행착오로부터 얻은 이점의 정보(오차와 입력)를 이용하여 다음 시행(next trial)의 feedforward input history를 만드는 것이다. 앞 절에서의 I, PI, state feedback 제어는 고차의 입력일 경우 정상 상태 오차가 생긴다. 따라서 본 연구에서는 z축의 힘 제어에 대해서 학습 제어를 적용하기로 한다. Fig.4.1에 전형적인 학습 방법을 블럭 선도로 나타내었다.

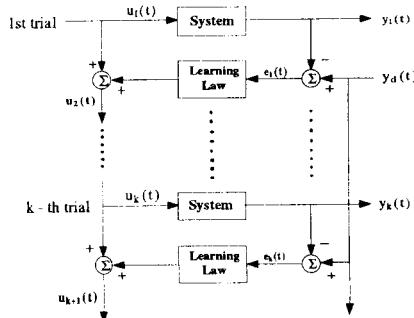


Fig.4.1 General learning control scheme.

Fig.4.1을 식으로 나타내면 Eq.(3.12)와 같다.

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \phi e_k(t) + \psi \int e_k(t) dt + \Gamma \frac{d}{dt} e_k(t) \quad (3.12)$$

여기서,

$$0 \leq t \leq T$$

$$e_k(t) = y_d(t) - y_k(t)$$

$$u_0(t) = 0 \quad y_d(0) = y_k(0)$$

$$e_k(0) = y_d(0) - y_k(0) = 0$$

$$u_{k+1}(t) : (k+1)-th input history$$

$$u_k(t) : k-th input history$$

$$\phi, \psi, \Gamma : \text{Constant gain matrix}$$

### 4.2 반복 학습 방법을 이용한 힘 제어

3장에서 구한 힘 제어 법칙과 학습 제어에 근거로 해서 힘제 어기에 feedforward 항을 추가하면 제어 입력은 다음과 같다.

$$u(t) = \text{힘 제어 법칙에 의한 제어 입력} + \lambda v \quad (3.13)$$

여기서,

$$v_{k+1}(t) = v_k(t) + \lambda \left( \phi e_k(t) + \psi \int e_k(t) dt + \gamma \frac{d}{dt} e_k(t) \right) \quad (3.14)$$

$$e_k(t) = F_d(t) - F_k(t), \quad 0 \leq t \leq T$$

$$e_k(0) = F_d(0) - F_k(0) = 0$$

$$\phi, \gamma, \psi : \text{constant gain}$$

$$v_0(t) = 0, \quad \lambda > 0$$

여기서  $k$ 는  $k$ 번째 시행을 의미하며,  $e_k(t)$ 는  $k$ 번째 시행에 서의 힘 오차를 나타낸다.  $\lambda$ 는 원하는 값에 빨리 수렴하도록 하는 일종의 가중치이다. 위 알고리즘을 블록 선도로 나타내면 Fig.3.2와 같다. 여기서,  $u_k(t)$ 는 위치와 힘에 대한 제어 입력이다.

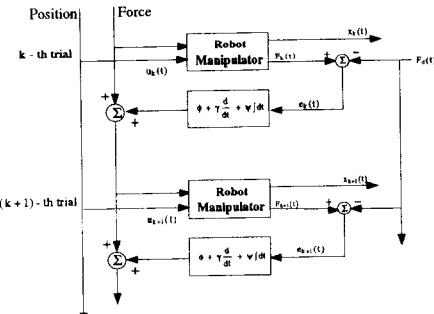


Fig.4.2 Learning control for force control.

## 5. 시뮬레이션

본 연구의 시뮬레이션에 사용된 적분기는 Runge-Kutta 4차를 사용하였다. 본 논문에서는 PI 제어와 state feedback에 대한 결과만 나타내었다 Fig.5.1부터 Fig.5.6까지 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 이 결과는 기존의 위치 제어 시스템이 있을 때 특별한 하드웨어의 교체 없이 힘 제어가 가능하다는 것을 입증해 준다고 생각할 수 있다. Fig.5.1과 Fig.5.2는 PI-제어에 대한 결과이다. Fig.5.2는 ramp 입력에 대한 결과인데 정상 상태 오차가 있음을 알 수가 있다. 이 오차를 줄이기 위해 개인을 높이면 에러가 줄어들지만 점점 불안정해짐을 알 수 있다. Fig.5.3과 Fig.5.4는 state-feedback에 대한 결과이다. 스텝 응답은 만족할 만하지만 역시 고차의 입력일 경우 정상 상태 오차가 존재한다. Fig.5.5와 Fig.5.6은 위와 같은 고차항의 입력에 대한 에러를 줄이기 위해서 반복 학습 방법을 적용한 결과이다. 시행을 거듭할 수록 원하는 값에 수렴함을 알 수 있다.

## 6. 실험

### 6.1 시스템 구성

Fig.6.1은 본 실험에 사용된 시스템을 나타낸다. 본 연구에서는 4축 SCARA 로봇을 대상으로 하고 z축에 힘 제어를 적용하였다. 또한 링크-2를 위치 제어하면서 z축 힘 제어도 하였다. 실험에 사용된 기기로는 제어를 위한 IBM PC 486, 힘의 측정을 위한 로드 셀과 A/D converter, 모터를 구동하기 위한 driver와 D/A converter, DC Amp., 하드웨어 인터럽트를 발생

시키기 위한 H/W interrupt generator, power supply 등이다. 본 실험에서 sampling time은 100Hz(10 ms)로 하였다. 본 실험의 내용은 첫 번째로 순수한 힘 제어를 하였고 두 번째로 힘 제어에 반복 학습 방법을 적용하였다. 세 번째로는 위치/힘 제어 실험을 하였고 마지막으로 위치/힘 제어에 반복 학습 방법을 적용하였다. 실험에서의 외부 환경은 z축에 수직한 평면으로 하였고 힘 제어는 PI 제어를 적용하였다. 그리고 반복 학습 방법을 z축의 힘 제어에만 적용을 하였다.

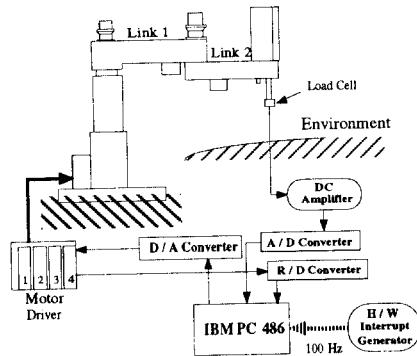


Fig.6.1 System configuration.

## 6.2 로드 셀 교정(calibration)

외부 환경과 접촉되는 힘을 측정하기 위해서 제작한 힘 센서는 압축, 인장의 한 방향으로만 힘을 측정할 수 있는 센서이다. 교정 실험은 세번을 하였으며 Fig.6.2에 실험 결과를 나타내었다. Fig.6.2를 보면 알 수 있듯이 선형성을 나타내고 있다. 또한 히스테리시스도 거의 없음을 실험을 통하여 알 수 있었다. 힘 센서에는 4개의 단자가 있는데 2개는 입력 단자이고 나머지 2개는 출력 단자이다. 본 실험에서는 입력 전압을 10V로 하였다. 1V에 1.387823mV이므로 10V가 입력되면 13.87823mV가 출력되게 된다. 이 신호는 사용하기에 극히 작은 양이므로 DC Amp를 이용하여 증폭을 해야 한다. 출력 게인은 1000배이고 노이즈 제거를 위한 차단 주파수(cut-off frequency)는 10Hz로 하였다.

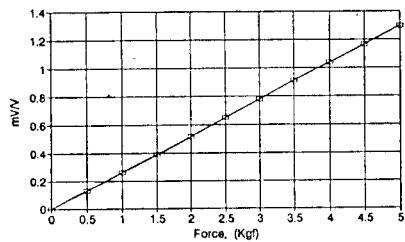


Fig.6.2 Load-cell calibration.

## 6.3 실험 결과

본 연구에서의 실험은 힘 제어, 위치 제어에 PI-제어를 적용하였다. Fig.6.3과 Fig.6.4는 순수한 힘 제어에 대한 결과이다. 시뮬레이션 결과와 경향이 같음을 알 수 있다.

Fig.6.5와 Fig.6.6은 순수한 힘 제어에 반복 학습 방법을 적용한 결과이다. 시뮬레이션 결과에서 알 수 있었던 것처럼 원

하는 값에 수렴함을 알 수 있다. Fig.6.7과 Fig.6.8은 위치/힘 제어에 대한 결과인데 반복 학습 방법을 적용하지 않은 결과이다. 원하는 값(desired value)은 z축에 수직하게 3 N(힘)이고 링크-2는 13° (위치)이다. 여기서 링크-2의 속도 계적은 4-3-4 계적 계획을 이용하였다. 원하는 힘이 시간에 따라 변하지 않으므로 좋은 응답을 보였고 z축에 대한 힘이 크지 않으므로 위치에는 에러가 거의 없음을 알 수 있다. Fig.6.9와 Fig.6.10은 위치/힘 제어에 반복 학습 방법을 적용한 결과이다. 원하는 힘은 z축에 대해서 ramp 입력이고 링크-2는 위에서와 마찬가지로 13° 회전이다. 역시 학습 제어를 적용한 결과 더 좋은 응답을 얻을 수 있었다.

## 7. 결 론

기존의 힘 제어 법칙은 실시간으로 동력학을 풀어야 하고 산업 현장에 적용하려면 상당 부분의 하드웨어를 교체해야만 했다. 본 연구에서 제안한 external force control을 이용하여 위와 같은 문제점을 극복할 수 있다는 것을 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다. 또한 외란과 불확실한 환경, 모델링의 불확실성, 비선형성, 기계 요소의 노후 등으로 인한 기존의 힘 제어 법칙의 단점을 극복할 수 있는 반복 학습 방법을 제안하였다. 또한 이 알고리즘은 다양한 입력에도 그 성능을 발휘할 수 있다는 것을 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다. 본 연구는 4축 SCARA 로봇을 이용하여 실험을 하였다. 힘의 측정을 위하여 1축 힘 센서를 제작하였으며 다축 힘 센서를 이용한다면 다축 힘 제어도 가능하다는 결론을 얻었다. 본 연구를 통하여 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 시뮬레이션과 실험을 통한 external force control 알고리즘의 타당성 검증.
2. 4축 SCARA 로봇을 이용한 힘 제어의 구현.
3. 힘 제어에 대한 반복 학습 방법의 적용.
4. 다축 힘 제어의 가능성 제시.

## 참 고 문 헌

1. Paul, R.P., and Shimano, B., Compliance and control, Proc. JACC: 694-699, 1976
2. Whitney, D.E., Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions, Trans. ASME J. Dyn. Sys. Meas. Control: 91-97, 1977(June),
3. Raibert, R.K., and Craig, J.J., Hybrid Position/Force Control of Manipulators, Trans. ASME J. Dyn. Sys. Meas. Control 102: 126-133, 1981(June)
4. Mason, M.T., Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators, IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics, SMC-11, No.6, pp.418-432, 1981(June)
5. Salisbury, J.K., Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates, IEEE Int. Conf. on Decision and Control, Albuquerque, New Mexico, pp.95-100, 1980(Nov)
6. Paul, R.P., Zhang, Hong, Hybrid Control of Robot Manipulators, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.602-607, 1985(Mar)
7. Zhang, Hong, Kinematic Stability of Robot Manipulators under Force Control, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.80-85, 1989
8. Hogan, N., stable Execution of Contact Task using Impedance Control, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1047-1054, 1987

9. Eric Dégou lange, Pierre Dauchez, François Pierrot, Determination of a Force Control Law for An Industrial Robot in Contact with a Rigid Environment, IEEE Int. Conf. on System, Man, and Cybernetics, Vol.2, pp. 270-275, 1993
10. J. De Schutter, and H. Van Brussel, Compliant Robot Motion I. A Formalism for Specifying Compliant Motion Tasks. The Int. J. of Robotics Research, Vol.7, No.4, pp.3-17, 1988(Aug)
11. J. De Schutter, and H. Van Brussel, Compliant Robot Motion : II. A Control Approach Based on External Control Loop, The Int. J. of Robotics Research, Vol.7, No.4, pp.18-33, 1988(Aug)
12. Sadao Kawamura, Fumio Miyazaki, and Suguru Arimoto, Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators Based on Learning Method, 85' ICAR, pp.235-242,
13. Suguru Arimoto, Sadao Kawamura, Can Mechanical Robots Learn by Themselves ?, Proc. 2nd Int. Symp. Robotics Research, Kyoto, Japan, 1984(Aug)
14. Suguru Arimoto, Robustness of Learning Control for Robot Manipulators, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1528-1533, 1990
15. Suguru Arimoto, Sadao Kawamura, Fumio Miyazaki, Bettering Operation of Robots by Learning, J. of Robotic Systems., Vol.1, No.2, pp.123-140, 1984
16. Kelvin L. Moore, Iterative Learning Control for Deterministic Systems, Springer-Verlag, 1993
17. Suguru Arimoto, Robustness of Learning Control for Robot Manipulators, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1528-1533, 1990
18. K.S. Fu, R.C. Gonzalez, C.S.G. Lee, Robotics : Control, Sensing, Vision, and Intelligence, McGraw-Hill, 1987 and Control, MIT Press, 1990
19. F.L. Lewis, C.T. Abdallah, D.M. Dawson, Control of Robot Manipulators, Macmillan, 1993
20. John J. Craig, Introduction to Robotics : Mechanics and Control, 2nd Ed. Addison-Wesley, 1989
23. Katsuhiko Ogata, Modern Control Engineering, 2nd Ed. Prentice-Hall, 1990

