

〈技術論文〉

## 입력 다듬기 기법을 이용한 유연관절을 갖는 로봇의 잔류진동 제거

박주이\* · 장평훈\*\*

(1994년 3월 18일 접수)

### Residual Vibration Control of Robot with Flexible Joints Using Input Shaping

J. Y. Park and P. H. Chang

**Key Words:** Input Shaping(입력 다듬기), Joint Flexibility(관절 유연성), Residual Vibration Control(잔류진동 제어), Time Delay Controller(시간지연 제어기)

#### Abstract

This paper addresses the residual vibration problem of robots due to joint flexibility excited by fast accelerations, which has not been easily solved with conventional closed loop controllers. In this paper, an open loop input shaping technique, proposed by singer, has been applied to a 3 DOF robot with joint flexibility. In conjunction to the technique, a closed loop controller based on time-delay controller was also used. The results of simulations and experiments showed that the technique is quite effective for suppressing the residual vibration.

#### 1. 서 론

로봇을 이용하는 산업현장에서, 생산성을 향상하기 위해서는 로봇의 고속동작이 요구된다. 그러나, 로봇이 고속으로 동작하면 잔류진동이 발생하여 다음과 같은 문제가 발생한다. 첫째, 잔류진동은 기계의 마모와 피로를 가져와 로봇의 수명을 단축시킨다. 둘째, 로봇은 잔류진동이 완전히 멈출 때까지 다음 작업을 수행할 수 없으므로, 작업속도가 저하된다.

잔류진동은 유연한 관절이나 유연한 링크, 또는 그외의 제어되지 않는 고차 모드때문에 발생한다. 설계할 당시에 이런 잔류진동이 없도록 설계하여야 하겠지만, 로봇의 크기와 구동기의 용량은 설계조건을 통하여 제한되므로, 잔류진동이 없는 로봇을

설계하기는 힘들다. 또한, 경제적인 면과 실용적인 면에서 볼 때도, 로봇을 다시 설계하는 것보다는 이미 사용중인 로봇의 잔류진동이 없어지도록 제어하는 편이 더 유리하다는 것은 자명하다.

따라서, 오래전부터 진동문제를 포함하고 있는 시스템의 잔류진동을 없애기 위해 많은 연구가 진행되어 왔다. 일반적으로 잔류진동을 없애기 위해 다음의 두가지 측면에서 접근을 하고 있다.

첫째, 페루프제어로 진동모드의 pole을 진동이 없는 곳으로 이동시킨다. 이 경우에는, 시스템의 정확한 모델링이 필요하게 된다.

둘째, 진동모드를 자극하지 않는 입력을 가한다. 제어 시스템에 기준입력을 가할 때, 로봇이 원하는 점으로 움직이면서도 진동모드를 자극하지 않도록 입력을 가한다.

첫번째 접근방법인 페루프제어는 외란 및 모드의 변화에 대해서는 강인하지만, 다음과 같은 단점을 갖고 있다. 첫째, 이미 알려진 바와 같이, 실제 시

\*한국과학기술원 대학원 정밀공학과

\*\*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

시스템을 정확히 모델링하는 것은 매우 어려운 작업일 뿐 아니라, 그것이 가능하더라도 모델링이 정확할수록 모델의 식이 복잡해지므로 계산량이 많아진다. 둘째, 페루프제어를 하기 위해서는 주로 센서로 진동모드의 상태를 측정하여 케환하게 되는데, 이때는 별도의 하드웨어가 필요하게 된다. 물론, 하드웨어적인 센서를 사용하지 않고 관측기로 진동모드의 상태를 추정할 수도 있으나, 이 경우에는 제어기의 소프트웨어적인 부담이 증가하게 된다. 셋째, 진동모드까지 제어하려면, 시스템의 차수가 증가하므로 제어기의 차수도 증가한다. 따라서 제어기를 다시 설계하여야 하는데, 실제 적용에서 제어기를 설계하여 이득을 조정하는 것은 대단히 번거로운 일이다. 그러므로, 기존의 하드웨어나 페루프제어기를 변경하지 않고 잔류진동을 없애는 방법이 바람직하다.

기준입력을 가할 때, 진동을 유발하지 않는 입력을 주는 입력 다듬기(input shaping) 기법은 오래전부터 연구되어 왔다. 1958년에 Smith는 포시캐스트(posicast) 기법을 발표하였다.<sup>(9,10)</sup> Smith는 계단입력을 두 단계로 나누어 입력함으로써, 잔류진동이 없는 응답을 얻었다. 그러나, 이 방법은 진동모드의 변화에 대한 강인성이 나쁘고, 진동모드가 두 개 이상인 경우에는 사용할 수 없다.

그리고, 최적제어기법에 의한 잔류진동의 소거방법에 대해서도 많은 연구가 진행되었다.<sup>(3~5)</sup> 좋은 결과를 보이고 있지만, 최적제어기법은 최적해를 구하기 위한 계산이 복잡하다는 단점을 갖고 있다. 또한 가격함수는 총체적인 경로오차로 표시되므로, 진동모드에 대한 특별한 고려가 반영되지 않는다. 따라서 잔류진동은 없을지라도, 과도응답에서 진동이 생길 수 있다.

또 다른 접근으로써, 정확한 모델링을 기반으로 하는 토크계산(computed torque) 기법이 있다.<sup>(11)</sup> 이 기법은 미리 원하는 출력의 궤적을 정의하고, 역 모델을 이용하여 그 출력을 만들 수 있는 입력을 구하는 것이다. 모델이 정확해야 하고, 시스템의 매개변수(parameter) 변화에 대한 강인성이 나쁘기 때문에 실용적인 가치는 떨어진다.

Meckl과 Seering은 경사사인(ramped sinusoid) 함수와 버사인(versine) 함수를 이용하는 기법을 발표하였다.<sup>(6)</sup> 이 방법에 의하면, 입력은 경사사인 함수와 버사인함수의 조합으로 만들어지는데, 그 함수의 조합에서 고유진동수를 포함하는 성분은 포

함시키지 않는다. 따라서, 진동모드를 자극하지 않는 기준입력을 생성할 수 있게 된다.

이밖에, 입력을 노치필터에 통과시켜 진동모드를 자극하는 주파수를 여과하는 방법도 있으나, 이 기법은 위상의 지연을 가져와 응답을 느리게 만드는 단점이 있다.

Singer와 Seering은 앞에서 언급한 포시캐스트를 발전시켜 매개변수의 변화에 강인한 방법을 발표하였다.<sup>(7,8)</sup> 이 방법은 시스템의 임펄스 응답을 기초로 연구되었다. 즉, 연속된 임펄스가 시스템에 가해지면, 각각의 임펄스 응답이 서로 중첩되어 잔류진동이 서로 상쇄되는 현상을 이용하였다. 이렇게 얻어진 임펄스열을 주어진 입력과 콘벌루션 적분하여 시스템의 기준입력으로 준다. 이때 임펄스의 갯수를 증가시키면, 진동의 고유진동수와 감쇠의 변화에도 불구하고 강인하게 진동을 소거할 수 있게 된다.

본 연구에서는 Singer의 입력 다듬기기를 사용하여, 3자유도 로봇의 잔류진동을 없애는 데 주요한 점을 둔다. 이 잔류진동은 관절의 유연성때문에 발생하는 것으로, 로봇을 저속으로 작동시키거나 궤적 입력을 주어 작동시킬 때에는 발생하지 않는다. 그러나, 고속의 응답을 얻기 위해 제어기의 이득을 크게 하고 계단입력 등 급격한 입력을 가하는 경우, 진동이 발생하여 정착시간을 어느 값 이하로 줄일 수가 없게 된다. 이 로봇에 Singer의 방법으로 임펄스열을 구성하여 적용함으로써, 잔류진동이 없는 응답을 얻고자 한다.

지금까지 잔류진동을 없애기 위해 입력 다듬기 기법을 많이 연구해 왔다. 그러나,

(1) 입력 다듬기 기법에 대한 이론적인 연구가 많이 이루어졌지만, 실제 로봇에 적용한 예는 적다.

(2) 실험적인 적용일지라도, 대부분이 특수제작한 로봇에 적용한 것이며, 주로 링크의 유연성에 초점을 맞추고 있다.

그런데, 감속기가 있는 산업용 로봇의 경우, 링크의 유연성보다는 관절의 유연성이 로봇의 진동에 더 많은 영향을 준다고 판단된다. 그럼에도 불구하고, 산업용 로봇의 유연한 관절에 대한 적용 사례는 발견되지 않고 있다. 산업용 로봇이 갖는 실용성의 관점에서 볼때, 이러한 분야에 대한 연구는 상당히 중요한 것으로 고려된다. 따라서, 본 연구에서는 산업용 로봇의 유연한 관절에 초점을 맞추어, 실용적인 측면에서 소정의 기여를 하고자 한

다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 Singer의 입력 다듬기 기법을 소개하고, 3장에서 유연한 관절을 갖는 단일링크에 대한 모델링과 모의실험을 다룬다. 4장에서 3자유도 로봇에 대한 실험결과를 보이고, 5장에서 결론 및 추후과제를 말한다.

## 2. 임펄스열에 의한 다듬어진 입력의 생성

본 장에서는 Singer가 발표한 입력 다듬기 기법 및 그 응용 방법을 요약, 정리한다.<sup>(7,8)</sup> 소개하는 입력 다듬기 기법은 Fig. 1의 블록선도로 나타낼 수 있으며, 다음의 특징을 갖고 있다.

첫째, 개루프기법이어서 별도의 센서가 필요치 않다. 따라서, 기존의 하드웨어나 폐루프 제어기를 변경할 필요가 없으므로, 적용이 간편하고 비용이 적게 든다.

둘째, 일종의 필터로서, 어떤 형태의 입력이라도 입력 다듬기 필터를 거치면 잔류진동을 유발하지 않는 기준입력이 된다.

셋째, 결과적으로 극점-영점 소거이다. 이 사실은 Singh가 밝혔는데,<sup>(11)</sup> 입력 다듬기 필터는 영점을 갖고 있어서, 이 영점이 진동모드의 극점과 상쇄되는 것이다.

넷째, 적용할 수 있는 시스템은 기본적으로 제한이 없다. 외란이 아닌 명령입력에 의해 가진되는 진동이라면, 이 기법을 사용하여 잔류진동을 피할 수 있게 된다.

### 2.1 2차 시스템의 진동제거

입력 다듬기 기법은 시스템의 임펄스 응답에 기초를 두고 설계하였다. Fig. 2에서 보이는 것과 같이 두개의 임펄스가 시간차를 두고 입력되었을때, 각각의 입력에 대한 응답은 (a)와 같다. 두 입력에 대한 시스템의 전체 응답은 이 두 응답을 중첩한 것과 같으므로, (b)와 같은 응답을 얻게 된다. 따라서, 두번째 임펄스가 입력된 이후에는 시스템의 진동이 남아있지 않게 된다.

그런데, 앞의 개념은 임펄스 입력이 아닌 임의의 입력에 의해서 발생하는 잔류진동을 제거하는 데에도 적용된다. Fig. 3의 블록선도중 (a)는 시스템  $G(s)$ 에 임펄스열  $I(s)$ 가 입력되는 상황을 나타낸다. 이때는 앞에서 설명한대로,  $I(s)$ 를 적절히 조

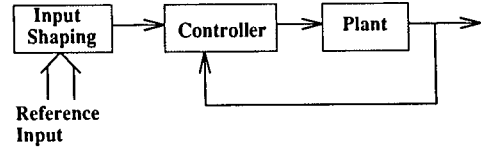


Fig. 1 Open loop input shaping

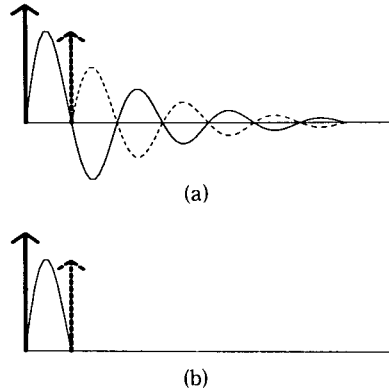


Fig. 2 Superposition of impulse responses

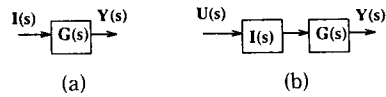


Fig. 3 Convolution with impulse

절함으로써 출력  $G(s)I(s)$ 에 잔류진동이 남지 않도록 할 수 있다. 이때 주파수 영역에서 살펴보면 잔류진동의 주파수  $\omega_n$ 이  $I(s)$ 에 의해 제거되므로  $G(j\omega_n)I(j\omega_n)=0$ 이 된다. 그러므로 Fig. 3의 (b)와 같이  $G(s)$ 에 입력  $U(s)$ 가 더해지는 경우에는  $G(s)U(s)$ 에  $I(s)$ 를 곱하므로써  $G(j\omega_n)U(j\omega_n)=0$ 이 되도록 만들 수 있다. 즉,  $\omega_n$ 에 의한 잔류진동이 제거된다. 따라서, 잔류진동을 없애기 위한 임펄스열을 설계할 때는, 임펄스 응답을 바탕으로  $I(s)$ 를 설계한 후  $U(s)$ 와  $G(s)$ 의 중간에 설치하면 된다.

시스템의 진동을 없애기 위한 임펄스열은 아래의 순서로 구해진다. 하나의 진동모드는 식(2)와 같이 2차 시스템으로 나타내어질 수 있다. 이 모드를 자극하지 않는 임펄스열을 구하려면, 그 모드로만 구성된 2차 시스템을 기준으로 구하면 된다. 따라서, 이제 아래의 식(2)로 나타내어지는 2차 시스템의 임펄스 응답을 생각하자.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

이 시스템에 크기  $A$ 의 임펄스가  $t=t_0$  순간에 가해지면, 응답은 식(2)와 같다.

$$y(t) = \left[ A \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n(t-t_0)} \times \sin(\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}(t-t_0)) \right] \quad (2)$$

$N$ 개의 임펄스가 순차적으로 가해지면, 응답의 진폭은 다음과 같다.

$$A_{amp} = \sqrt{\left( \sum_{j=1}^N B_j \cos \phi_j \right)^2 + \left( \sum_{j=1}^N B_j \sin \phi_j \right)^2} \quad (3)$$

여기에서,

$$\phi_j = -\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t_j$$

$$B_j = \frac{A_j \omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n(t_s - t_j)}$$

이다. 이때  $t_j$ 와  $A_j$ 는 각각  $j$ 번째 임펄스가 가해지는 시각과 그 크기이다.

$\omega = \omega_n$ 일 때,  $t_s$ 일 때의  $A_{amp}$ 는 0이 되길 원하므로, 식(3)에서 근호안의 두 항은 각각 0이 되어야 한다. 따라서,

$$\sum_{j=1}^N A_j e^{-\zeta\omega_n(t_s - t_j)} \sin(t_j \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}) = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^N A_j e^{-\zeta\omega_n(t_s - t_j)} \cos(t_j \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}) = 0 \quad (5)$$

를 만족시켜야 한다.

이제, 주어진 식(4), (5)로부터  $A_j$ 와  $t_j$ 를 구하는데, 미지수는  $2N$ 개이지만, 식은 두개 뿐이므로 모든 미지수의 값을 구할 수 없다.  $N=2$ 인 경우는 식(6), (7)을 추가함으로써  $A_j$ 와  $t_j$ 를 구할 수 있게 된다.

$$\sum_{j=1}^N A_j = 1 \quad (6)$$

$$t_1 = 0 \quad (7)$$

식(6)은 입력이 임펄스열과 콘벌루션 적분되더라도 입력의 에너지가 변하지 않도록 하기 위한 조건이고, 식(7)은 응답을 가능하면 빠르게 하기 위한 조건이다.

$N > 2$ 인 경우는 앞의 식 외에 부가적인 조건을 첨가할 수 있다. 다음 절에서는 그 부가적인 조건으로서 고유진동수와 감쇠의 변화에 대한 강인성을 도입하였다.

### 2.3 강인성

임펄스열을 구하기 위해서 고유진동수와 감쇠비를 알아야 한다. 그러나, 이것들은 정확히 알기 어려운 경우가 많고 제어중에 변하기도 한다. 따라서, 고유진동수와 감쇠비가 부정확하게 추정되었거나, 제어 도중에 변할지라도 강인하게 진동을 줄일 수 있을 것이 요구된다.

고유진동수의 추정오차에 강인하기 위해서 임펄스열의 개수를 늘린다. 그러면  $2N-4$ 개의 식을 더 만들 수 있으므로, 식(4), (5)의 좌변을  $\omega_n$ 로 미분한 식이 0이 되도록 한다. 미분의 의미는,  $\omega_n$  근처의  $\omega$ 를 식(4), (5)의 좌변에  $\omega_n$  대신 대입하였을 때, 그 값이 0 근처에 있도록 만드는 것이다. 따라서,  $\omega_n$  근처의 주파수에 대해서 진폭이 0 근처에 있게 된다.

결과적으로, 식(8), (9)가 얻어진다.

$$\sum_{j=1}^N A_j(t_j)^q e^{-\zeta\omega_n(t_s - t_j)} \sin(t_j \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}) = 0 \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^N A_j(t_j)^q e^{-\zeta\omega_n(t_s - t_j)} \cos(t_j \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}) = 0 \quad (9)$$

여기에서,  $q=1, 2, \dots, N-2$ 이다.

$\zeta$ 의 변화에 강인하기 위해  $\omega_n$ 과 마찬가지로 식(4), (5)의 좌변을  $\zeta$ 로 미분한 식이 0이 되도록 하면, 식(8), (9)과 같은 결과를 얻는다. 그러므로 식(8), (9)을 만족시키는 임펄스열을 구하면  $\omega_n$ 와  $\zeta$ 의 변화에 대해 강인하게 된다.

임펄스열의 개수를 증가시킬수록 강인성은 더 좋아진다. 그러나 시스템은 임펄스가 다 도착된 이후에야 정상상태가 되므로, 응답속도는 그만큼 느려지게 된다. 따라서, 강인성과 응답속도의 두가지 상충하는 요구조건에 적절한 비중을 두어 임펄스의 개수를 선정할 것이 필요하다.

### 2.3 고차 시스템의 진동제거

앞에서는 진동모드가 하나인 경우에 대해서 설명했다. 그러나, 많은 시스템에는 진동모드가 두개 이상 있는 경우가 있다. 그러한 고차시스템의 경우는 각각의 모드에 대해서 임펄스열을 따로 계산하여,

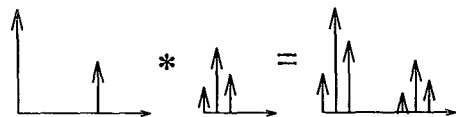


Fig. 4 Impulse sequence for two mode

계산된 임펄스열들을 콘벌루션 적분한다. 이것은 다수의 필터를 직렬로 설치한 것과 같다.

2.4 고유진동수와 감쇠의 추정

고유진동수와 감쇠의 변화에 대한 대책을 강인성에만 의존하는 것은 좋지 않다. 이 값들의 변화가 심한 경우에는 제어시에 추정할 것이 요구된다. Anthony는 실시간에 고유진동수와 감쇠를 추정하는 적응방법을 발표하였다.<sup>(2)</sup> 이 방법에서는, 측정된 상태변수들을 이용하여 실시간에 FFT로 진동모드를 추정한다. 좋은 결과를 보여 주고 있지만, 계산량이 매우 많으므로 실제 적용시에 제어기의 부담이 크다.

그렇지만, 산업용 로봇은 같은 작업을 반복하므로, 실시간으로 진동모드를 추정하지 않고, 작업의 1 cycle이 끝난후 오프라인으로 진동모드를 추정하는 것으로 충분하다. 본 논문에서 진동모드를 추정하는 방법은 다음과 같다.

잔류진동모드는 잔류진동이 생기는 경우의 실험 결과를 분석하여 측정한다. Fig. 5와 같이 진동을 포함한 응답을 얻었을 때, 다음의 과정으로 분석할 수 있다. 우선, 고유진동수  $\omega_n$ 는 잔류진동의 극대-극소 사이의 시간을 측정하여 구한다. 그런데, 위치 값이 극대이거나 극소일 때의 속도는 0이 되므로, 속도가 0이 되는 지점사이의 시간을 측정하면 정확하게 측정할 수 있다.

감쇠비는 잔류진동의 진폭이 변하는 정도를 측정하여 계산한다. 식(1)의 2차 시스템에 계단입력이 가해지면, 그 출력은 식(10)과 같다.

$$y(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \times \sin\left(\omega_d t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right) \tag{10}$$

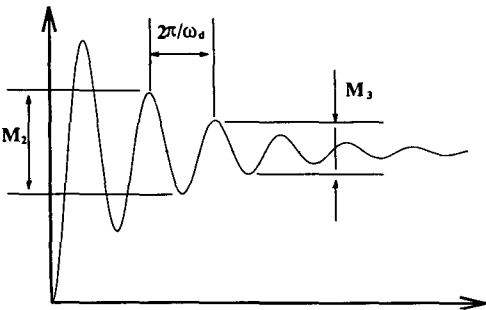


Fig. 5 Measurement of frequency and damping

여기에서,  $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$ 이다.  $i$ 번째 극대점이 되는 시각을  $T$ 라 하면,

$$y(T) = 1 + \frac{e^{-\zeta\omega_n T}}{\sqrt{1-\zeta^2}}$$

$$y\left(T + \frac{\pi}{\omega_d}\right) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n\left(T + \frac{\pi}{\omega_d}\right)}}{\sqrt{1-\zeta^2}}$$

$$y\left(T + \frac{2\pi}{\omega_d}\right) = 1 + \frac{e^{-\zeta\omega_n\left(T + \frac{2\pi}{\omega_d}\right)}}{\sqrt{1-\zeta^2}}$$

$$y\left(T + \frac{3\pi}{\omega_d}\right) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n\left(T + \frac{3\pi}{\omega_d}\right)}}{\sqrt{1-\zeta^2}}$$

따라서  $i$ 번째 극대-극소의 차이  $M_i$ 와  $i+1$ 번째 극대-극소의 차이  $M_{i+1}$ 는 다음과 같다.

$$M_i = \frac{e^{-\zeta\omega_n T}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \left[ e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} + 1 \right]$$

$$M_{i+1} = e^{-\frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \frac{e^{-\zeta\omega_n T}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \left[ e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} + 1 \right]$$

$M_{i+1}$ 를  $M_i$ 로 나누면,

$$\frac{M_{i+1}}{M_i} = e^{-\frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \tag{11}$$

잔류진동은  $\zeta \ll 1$ 일 때 발생하므로  $\sqrt{1-\zeta^2} \approx 1$ 로 볼 수 있다. 따라서 식(11)로부터  $\zeta$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\zeta \approx -\frac{\ln\left(\frac{M_{i+1}}{M_i}\right)}{2\pi} \tag{12}$$

2.5 임펄스열의 응용

주어진 입력을 임펄스열과 콘벌루션 적분하여 페루프의 기준입력으로 준다. 임펄스열과의 콘벌루션 적분은 기준 입력의 시간추이(time shift)이다. 일례로, Fig. 6은 계단입력이 임펄스열과 콘벌루션 적분되었을 때의 모양을 보여준다. (b)의 계단입

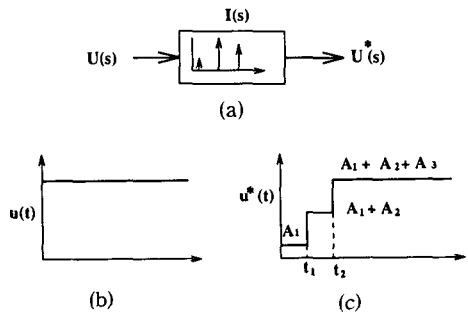


Fig. 6 Shaped step input

력이 (a)에서 보이는 임펄스열과 콘벌루션 적분되었을 때, (c)와 같이 된다.

적용을 위해 식(4)~(9)를 풀면,  $N$ 개의 임펄스열을 사용할 때,  $j$ 번째 임펄스의 크기  $A_j$ 와 가해지는 시각  $t_j$ 는 다음과 같다.

$$A_j = \frac{\binom{N-1}{j-1} K^{j-1}}{\sum_{i=0}^{N-1} \binom{N-1}{i} K^i} \quad (13)$$

$$t_j = (j-1) \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (14)$$

$$K = e^{-\frac{\zeta \pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (15)$$

### 3. 모의실험

#### 3.1 모의실험 방법

모의실험은 관절(구동기와 링크의 사이)의 유연성이 있는 경우에 대해서, 링크의 위치제어를 수행하였다. 링크를 강체로 보고 관절의 유연성만 고려할 때, Fig. 7과 같은 링크 구동 시스템의 수학적 모델은 식(16), (17)과 같다.

$$\tau = J_m \ddot{\theta}_m + b_m \dot{\theta}_m + K(\theta_m - \theta_L) \quad (16)$$

$$K(\theta_m - \theta_L) = J_L \ddot{\theta}_L + b_L \dot{\theta}_L \quad (17)$$

여기에서,  $\tau$ 는 모터의 토크이고,  $\theta_m$ ,  $J_m$ ,  $b_m$ 은 각각 모터의 회전각, 관성모멘트, 점성 마찰계수이다. 그리고,  $\theta_L$ ,  $J_L$ ,  $b_L$ 은 각각 링크의 회전각, 관성 모멘트, 점성 마찰계수이고,  $K$ 는 관절의 탄성 계수이다.

관절의 유연성에 의한 모드가 제어되지 않을 때의 현상을 알기 위해, 제어를 설계할 때는 관절의 유연성을 무시하는데, 이때의 동역학식은 식

(18)이 된다.

$$\tau = (J_m + J_L) \ddot{\theta}_m + (b_m + b_L) \dot{\theta}_m \quad (18)$$

이때, 페루프 제어기로는 외란 제거 성능이 우수한 시간지연 제어기(TDC)를 사용한다. 시간지연 제어기의 제어법칙은 식(19)로 나타난다.

$$u = \bar{J}[-2\zeta_m \omega_m \dot{\theta}_m + \omega_m^2(\theta_m^d - \theta_m)] + u(t-L) - \bar{J}\ddot{\theta}(t-L) \quad (19)$$

여기에서,  $\bar{J}$ 는  $J_m + J_L$ 의 추정치이고,  $L$ 은 TDC에서 외란을 관측하기 위해 사용하는 시간지연치이다.  $\omega_m$ 과  $\zeta_m$ 는 플랜트가 추종하기를 원하는 기준 모델의 감쇠와 진동수이고,  $\theta_m^d$ 는 원하는  $\theta_m$ 의 값이다. 모의실험에서는,  $\bar{J}$ 로  $\frac{J_m + J_L}{2}$ 를 사용하였고,  $L$ 로써 제어기의 표본시간(sampling time)을 사용하였다.

앞서 언급했듯이 제어를 설계할 때는 식(18)을 기초로 설계하고, 모의실험은 관절의 유연성을 포함시킨 식(16), (17)로 행한다. 모의실험은 MATLAB을 사용하여 수행하였으며, 이때 사용한 매개변수는 Table 1와 같다.

#### 3.2 모의실험 결과

Fig. 8은 모의실험 결과를 보여준다. (a)와 같이 계적입력을 주었을 때에는 잔류진동이 발생하지 않았다. 그러나 (b)에서 보이듯이 계단입력을 가하고, TDC의 계인을  $\omega_m=200$ ,  $\zeta_m=4$ 로 증가시켰을 때, 계단입력에 대해서 잔류진동이 발생하였다. TDC는 본래 외란제거의 성능이 우수한 제어기이지만, 관절 유연성에 의해 발생하는 21 Hz의 진동을 제거하지 못하고 있다.

따라서,  $\omega_m=200$ ,  $\zeta_m=4$ 인 경우의 진동을 없애기 위해 임펄스열을 설계하였다. 설계한  $A_j$ 와  $t_j$ 는 Table 2에 나타나 있다. 이 임펄스로 입력 다듬기 했을 때, 진동이 없어진 것을 Fig. 8(c)에서 보이고 있다.

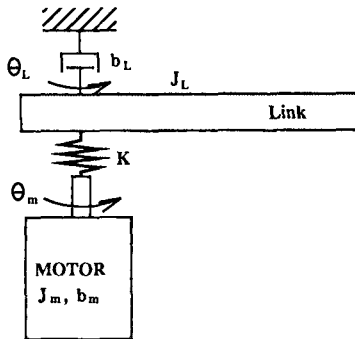


Fig. 7 Link with flexible joint

Table 1 Link parameters for simulation

$J_L$	10 kg · m <sup>2</sup>
$b_L$	1 × 10 <sup>4</sup> rad · s/kg · m <sup>2</sup>
$J_m$	2 kg · m <sup>2</sup>
$b_m$	100 rad · s/kg · m <sup>2</sup>
$K$	1 × 10 <sup>7</sup> N · m/rad

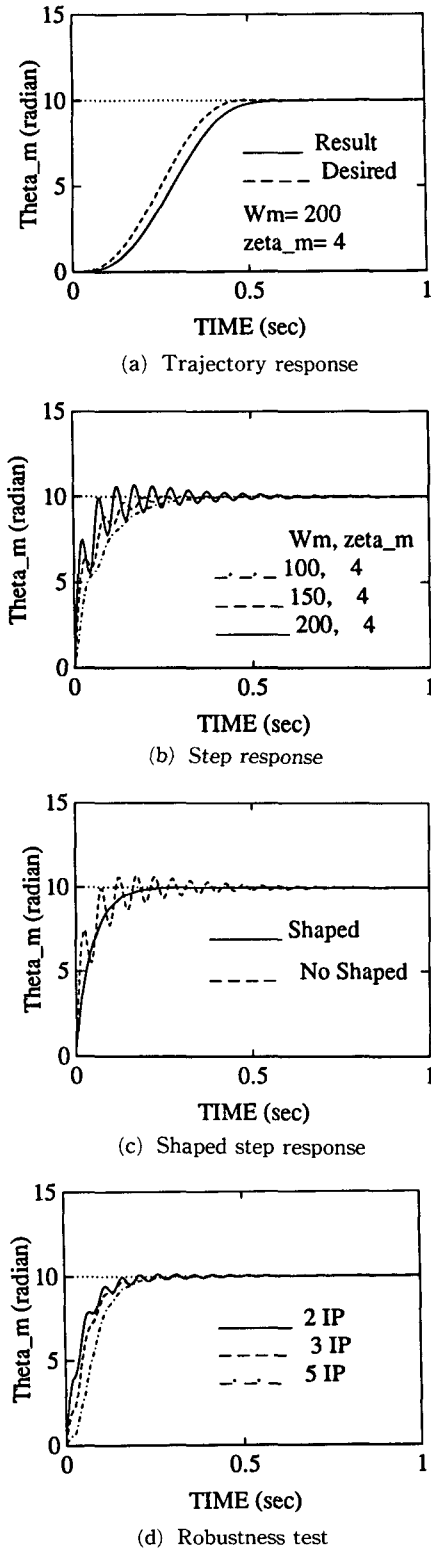


Fig. 8 Simulation results

Table 2 Impulse sequence for simulation

N	A <sub>j</sub>					t <sub>j</sub> (msec)				
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>
2	0.531	0.469	-	-	-	0	23.5	-	-	-
3	0.282	0.498	0.220	-	-	0	23.5	47	-	-
5	0.080	0.281	0.372	0.219	0.048	0	23.5	47	70.5	94

Fig. 8(d)는 링크의 고유진동수가 변할 때의 입력 다듬기효과를 보인다.  $\omega_n$ 의 추정치가 실제값과 10%차이가 있을 때, 임펄스열이 2개, 3개, 5개인 경우의 응답이다. 임펄스의 개수가 많을수록 고유진동수의 차이에 강인함을 볼 수 있다.

#### 4. 위치제어 실험

##### 4.1 실험방법

실험에 사용된 로봇은 Fig. 9와 같이 3개의 회전관절을 갖고있는 3자유도 로봇이다. BLDC 서보모터를 구동기로 사용하며, 감속기로는 하모닉 드라이브를 사용한다. 각축의 링크길이 및 질량, 감속비등 기계적 사양은 Table 3과 같다. 각축의 링크는 강체로 볼 수 있으나, 유연한 관절은 로봇의 동역학에 영향을 주어 잔류진동을 유발한다.

제어기는 VME 버스기반에 68계열의 CPU가 있는 범용 제어기이다.<sup>(15)</sup> 제어기와 로봇의 구동기는 D/A변환기와 병렬 입출력기로 연결되어 있다. 제어 프로그램은 호스트인 SUN에서 작성 및 컴파일되어, VME 버스상의 실시간 제어기에서 실행된다.

실험내용은 각 축을 독립적으로 위치제어하는 것이다. 페루프 제어기로는 모의실험과 마찬가지로 시간지연 제어기(TDC)를 사용하였다. Fig. 11(b)에서 관찰할 수 있듯이, 입력 다듬기방법을 사용하

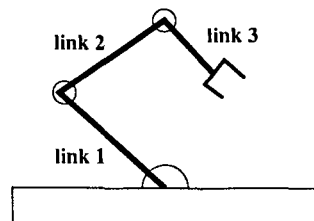
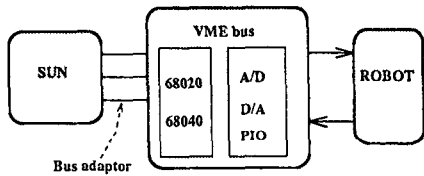


Fig. 9 Schematic diagram of 3 DOF robot

**Table 3** Mechanical dimension

	Link 1	Link 2	Link 3
Length(mm)	350	200	150
Mass(kg)	11.2	6.8	2
Center of mass from joint(mm)	285	174	75
Moment of interia(Kg · m <sup>2</sup> )	1.03	0.224	0.015
Reduction ratio of transmission	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{80}$	$\frac{1}{80}$



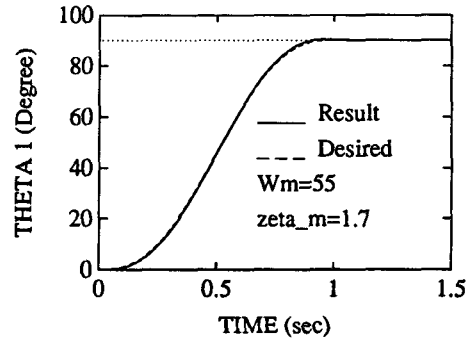
**Fig. 10** Hardware for experiment

지 않으면, 페루프 제어가 있음에도 불구하고 잔류진동이 발생하였다. 그런데, 이 진동현상은 큰 관성이 걸리는 1축에만 두드러지게 나타났고, 2, 3 축에는 거의 보이지 않았다. 따라서, 실험에서는 잔류진동이 크게 발생하는 1축의 진동을 관찰, 분석하고 입력 다듬기법으로 그 진동을 소거하였다.

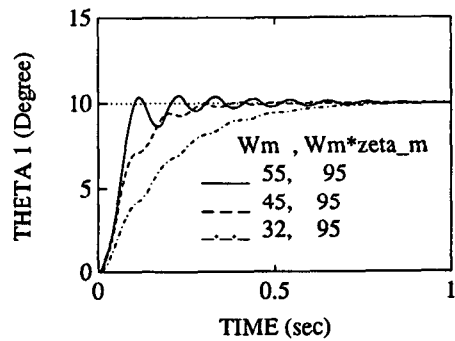
**4.2 실험결과**

Fig. 11는 실험결과를 보여준다. Fig. 11의 (a)는 계적입력에 대한 응답으로 잔류진동이 없음을 보여준다. (b)는 계단입력에 대해서, TDC의 계인이 증가함에 따라 진동이 발생하는 모습을 보여준다. 이 진동을 분석한 결과  $\zeta=0.054$ ,  $\omega_n=10$  Hz이었다. 이 값을 바탕으로 임펄스열을 설계하면 Table 4와 같다.

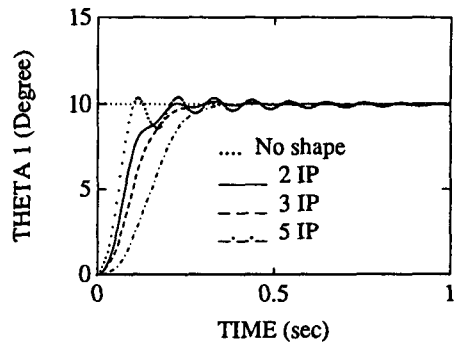
$u(t)$ 가 계단입력인 경우에 대해서 실험을 한 결과가 Fig. 11(b)에 나타나 있다. 입력 다듬기를 함으로써 잔류진동이 줄어든 것을 볼 수 있다. 그런데, 임펄스열 2개를 사용한 경우에 잔류진동이 약간 존재하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상의 원인은 측정된  $\omega_n$ 가 실제치와 다르기 때문이다.  $\omega_n$ 의 오차에 강인하도록 임펄스열의 개수를 5개로 했을 때, 응답은 느려지지만 잔류진동이 완전히 없어졌다.



(a) Trajectory response



(b) Step response



(c) Shaped step response

**Fig. 11** Experiment results

**Table 4** Impulse sequence for experiment

N	A <sub>j</sub>					t <sub>j</sub> (msec)				
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>
2	0.542	0.458	-	-	-	0	50	-	-	-
3	0.294	0.496	0.209	-	-	0	50	100	-	-
5	0.086	0.292	0.370	0.208	0.044	0	50	100	150	200



## 5. 결 론

지금까지 유연한 관절을 갖는 로봇의 잔류진동 문제를 고찰하였고, 그 진동을 소거하는 방법으로 입력 다듬기 기법을 소개하였다. 또한 모의실험과 실험을 통하여, 입력 다듬기 기법을 사용했을 때 로봇의 잔류진동이 없어지는 것을 확인하였다.

이 기법을 더 발전시키기 위하여, 다음의 두 가지는 앞으로 고려되어야 할 것이다. 첫째는, 직접 구동 로봇의 경우와 같이 모드의 변화가 많은 시스템에 대한 대책이다. 적응제어방법이 있으나 계산량이 많아 적용시에 문제가 있으므로 개선된 방법이 요구된다. 둘째는, 센서잡음 및 외란에 의한 진동도 제거할 수 있는지에 대한 연구이다. 이에 대해서 페루프내에 입력 다듬기 필터를 첨가하는 방법이 발표되었으나,<sup>(12)</sup> 많은 제약이 따른다.

## 참고문헌

- (1) Asada, Haruhiki, Ma, Zeng-Dong and Tokumaru, Hidekatsu, 1987, "Inverse Dynamics of Flexible Robot Arms of Trajectory Control," *Modelling and Control of Robotic Manipulators ASME Winter Annual Meeting*, pp. 329~336.
- (2) Tzes, Anthony and Yurkovich, Stephen, 1993, "An Adaptive Input Shaping Control Scheme for Vibration Suppression in Slewing Flexible Structures," *IEEE Transaction on Control System Technology*, Vol. 1, No. 2, pp. 114~121.
- (3) Chun, Hon M., Turner, James, D. and Juang, Jer-Nan, 1985, "Disturbance Accommodating Tracking Maneuvers of Flexible Spacecraft," *Journal of the Astronautical Sciences*, Vol. 33, No. 2, pp. 197~216.
- (4) Junkins, John L. and Turner, James D., 1986, *Optimal Spacecraft Rotational Maneuvers*, Elsevier Science Publishers, New York.
- (5) Juang, Jer-Nan, Turner, James D. and Chun, Hon M., 1985, "Closed-Form Solution for Feedback Control with Terminal Constraints," *Journal of Guidance and Control with Terminal Constraints*, Vol. 8, No. 1, pp. 39~43.
- (6) Meckl, Peter H. and Seering, Warren P., 1985, "Minimizing Residual Vibration for Point-to-Point Motion," *ASME Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, Vol. 107, No. 4, pp. 378~382.
- (7) Singer, N. C. and Seering, W. P., 1990, "Pre-shaping Command Inputs to Reduce System Vibration," *ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, Vol. 112, pp. 76~82.
- (8) Singer, Neil C., 1988, "Residual Vibration Reduction in Computer Controlled Machines," Ph. D thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT. also AI-TR-1030, The Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.
- (9) Smith, O. J. M., 1958, *Feedback Control System*, McGraw-Hill, New York, 1958, p. 338.
- (10) Tallman, G. H., and Smith, G. H., 1958, "Analog Study of Dead-Beat Posicast Control," *IRE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-3, pp. 14~21.
- (11) Singh, T. and Vadali, S. R., 1993, "Robust Time Delay Control," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 115, pp. 303~306.
- (12) Zuo, Kai and Wang, David, 1992, "Closed Loop Shaped-Input Control of a Class of Manipulators with a Single Flexible Link," *Proceeding of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nice, France, pp. 782~787.
- (13) Youcef-Toumi, K. and Osamu, I., 1990, "A Time Delay Controller for Systems with Unknown Dynamics," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 112, pp. 133~142.
- (14) 이정완, 1992, "TDC를 이용한 강인 DC 서보 모터 제어기 설계 및 관측기/제어기 안정화에 관한 연구," 한국과학기술원, 석사학위논문, 정밀공학과.
- (15) 박주이, 장평훈, 1993, "다중치리기를 갖는 고성능 범용제어기의 개발과 여유자유도 로봇제어에의 응용," 한국정밀공학회지, 제10권, 제4호, pp. 227~236.