다중 입출력 시스템을 위한 음의 입력다듬기 기법의 개발

Development of Negative Input Shaping Technique for MIMO System

윤 승 국, 장 평 훈, 박 주 이
(Seung Kook Yun, Pyung Hun Chang, and Juyi Park)

Abstract : In this paper, we propose a method to apply the Input Shaping Technique (IST) to multi-input multi-output (MIMO) systems. In MIMO systems, there is a high possibility of multi-mode residual vibration. The IST filter designed for this multi mode may need a longer time to suppress the residual vibration. Previous works prove that we can shorten the time lag by using negative sequence. This negative sequence, however, causes another problem - it requires excessive control input. In this paper, we provide a remedy to reduce the size of control input by limiting the reference input and its derivative. The result of simulations and experiments on a 2 link flexible arm confirmed the effectiveness of the proposed method.

Keywords : residual vibration, input shaping, command shaping, flexible arm, MIMO system

I. 서론

현재의 산업현장에 있어서, 생산성과 제어효과를 향상시키기 위해서는 물리 시스템의 고속 동작이 요구된다. 그러나, 시스템의 고속동작은 잔류진동을 발생시켜서 다음과 같은 문제를 발생시킬 수 있다. 첫째, 잔류진동은 시스템을 구성하는 기계의 마모와 피로를 가져와 시스템 수명을 단축시킨다. 둘째, 시스템은 잔류진동이 완전히 사라질 때까지 다음 작업을 수행할 수 없으므로 작업속도가 저하된다.

이렇게 시스템에 좋지 않은 영향을 끼치는 잔류진동은 유연한 관절이나 유연한 링크, 또는 그 외의 제어되지 않는 고차의 모드 때문에 발생되는 것으로 알려져 있다[1].

오래 전부터 이런 잔류진동을 없애기 위한 연구가 진행되어 왔다. 그 연구의 하나로서 입력 다듬기 기법(Input Shaping Technique)이 제안되었는데, 이 기법은 제어시스템에 기준입력을 가할 때, 시스템이 원하는 지점으로 움직이면서도 진동모드를 자극하지 않도록 입력을 가하는 방법이다.

Singer와 Seering은 1990년에 시스템의 임펄스 응답을 이용하여 입력 다듬기 기법을 개발하였다[2]. 이 방식은 연속된 임펄스가 시스템에 가해지면, 각각의 임펄스 응답이 서로 중첩되어 잔류진동이 서로 상쇄되는 현상을 이용하였다. 이렇게 얻어진 임펄스 열을 주어진 입력과 컨벌루션 적분하여 시스템의 기준입력으로 가한다.

이 방식은 본래 단일 입출력계를 기반으로 해서 만들어졌지만, 다중 입출력계에도 쉽게 적용이 가능하다. 그런데, 이 기법을 사용할 경우 기준입력에 시간지연이 발생하게 되며, 다중 입출력 시스템에 적용할 경우는 진동 모드의 개수가 많아질수록 이 시간지연 역시 더욱 커지게 된다.

Rappole등은 1993년에 임펄스열 중에 음의 크기를 갖는 임펄스를 포함한 임펄스열을 사용함으로써, Singer가 제안한 입력다듬기 기법의 단점인 응답시간의 지연을 보완하여 임의의 시간 내에 진동의 제거가 가능함을 보였다[3].

접수일자 : 2000. 4. 15., 수정완료 : 2000. 7. 13.
윤승국 : (주) 기아자동차
장평훈, 박주이 : 한국과학기술원

그러나 이 방식은 액츄에이터에 무리한 입력을 필요로 한다는 단점 때문에 액츄에이터의 용량제한이 있는 시스템에는 적용하기가 어렵다는 단점이 있다[4][5].

본 연구에서는, 다중입출력 시스템에 나타나는 다중 진동모드를 임펄스열을 사용하여 제거하되, 이 때 발생되는 응답시간의 지연을 음의 크기를 가지는 임펄스열을 사용하여 최대한 줄이면서도 액츄에이터에 무리한 입력을 요구하지 않도록, 음의 크기를 가지는 임펄스열을 설계하는 방법에 대해서 제안하고, 이를 모의 실험과 실험을 통하여 검증하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 Singer가 제안한 입력다듬기기법과 이를 다중 진동모드, 다입력 시스템에 적용하는 방법에 대해서 기술한다. 뒤이어, 음의 크기를 가지는 임펄스열을 이용하는 기법과 이를 설계하는 방법 및 모의실험의 결과가 3장에 소개된다. 4장에서는 유연팔을 가진 2축 로봇에 제안한 이론을 적용한 실험결과를 보이며, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 임펄스열로 다듬어진 입력의 생성

본 장에서는 Singer가 제안한 입력 다듬기 기법에 대해 요약, 정리하고 이를 다중입출력 시스템에 적용하는 방법을 설명한다. 또한, 이 때 나타나는 문제점에 관해서 언급한다.

Singer가 제안한 방법은 그림 1의 블록 선도로 나타낼 수 있다.

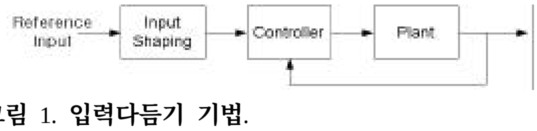


그림 1. 입력다듬기 기법.
Fig. 1. Input shaping technique.

1. 2차 시스템의 진동제거

모든 선형진동 시스템은 2개의 복소극점에 의해서 지수함수적으로 감소하는 사인응답을 가지는 2차 시스템들의 직렬 연결로 볼 수 있다. 따라서, 이때 기본이 되는 2차 시스템에 대해서 Singer의 방법으로 진동을 제거하는 기법

에 대해 먼저 알아본다.

그림 2를 보면 두 개의 임펄스가 시간차를 두고 입력되었을 때, 2차 시스템의 응답이 나타나 있다. 두 임펄스에 대한 입력이 중첩되어서 두 번째 임펄스가 입력된 이후에는 진동이 남아있지 않음을 볼 수 있다.

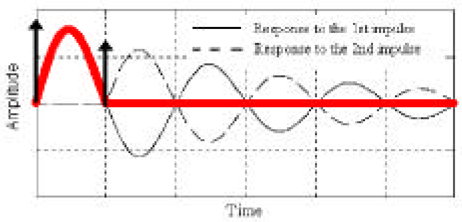


그림 2. 임펄스 응답의 중첩.

Fig. 2. Superposition of impulse responses.

그리고, 이 개념은 임펄스 입력만이 아닌 임의의 입력에 의해서 발생되는 잔류진동을 제거하는 데에도 적용될 수 있다. 임의의 입력에 구해진 임펄스열을 시간 영역에서 컨벌루션 적분함으로서 잔류진동을 일으키지 않는 입력을 얻을 수 있다는 것이 증명되어 있다[2].

2차 시스템에 발생하는 하나의 진동모드를 없애기 위한 임펄스열은 아래의 순서로 구해진다. 고유진동수 ω_n, 감쇠비 ζ를 갖는 시스템의 임펄스에 대한 응답은 다음과 같다.

$$y(t)=[A_i\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}}e^{-\zeta\omega_n(t-t_i)}]\sin(\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}(t-t_i)) \quad (1)$$

여기에서, A_i와 t_j는 각각 임펄스의 크기와 가해지는 시각을 의미한다.

이런 2차 시스템에 N 개의 임펄스가 순차적으로 가해진 후에, 응답의 잔류진동이 없어지는 - 응답의 크기가 0이 되는- 조건은 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^{N}A_je^{-\zeta\omega_n(t_N-t_j)}\sin(t_j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2})=0 \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{N}A_je^{-\zeta\omega_n(t_N-t_j)}\cos(t_j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2})=0 \quad (3)$$

주어진 식으로부터 A_j 와 t_j 를 구하는데, 미지수는 $2N$ 개이지만 식은 두 개 뿐이므로 모든 미지수의 값을 구할 수 없다. 그러므로, 추가의 식이 요구되는데, $N=2$ 인 경우에는 다음의 두 식을 추가함으로써, 미지수를 구할 수 있다.

$$\sum_{j=1}^{N}A_j=1 \quad (4)$$

$$t_1=0 \quad (5)$$

(4)는 입력이 임펄스열과 컨벌루션 적분된 후에도 최종적인 상태가 같도록 하기 위한 조건이고, (5)는 응답을 가능한 한 빠르게 하기 위한 조건이다.

2. 다중 진동 모드 제거

앞에서는 진동모드가 하나인 경우에 대해 임펄스열을 설계하는 방법을 설명했다. 그러나, 고차의 시스템의 경우 하나 이상의 진동모드를 가지는 경우가 있다. 그러한 고차 시스템의 경우는 각각의 단일 모드에 대해서 임펄스열을 각각 계산하여, 얻어진 임펄스열들을 모두 컨벌루션 적분한다. 이렇게 얻어진 최종적인 임펄스열을 기준입력에 컨벌루션 함으로써, 다중 진동모드를 자극하지 않는 다듬어진 기준 입력을 얻어 낼 수 있다. 이는 각각의 입력다듬기 필터를 직렬로 설치한 것과 같다. 그림 3은 두 개의 모드에 대해서 각각 설계된 입력다듬기 필터를 컨벌루션 한 결과를 보여주고 있다.

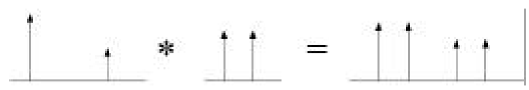


그림 3. 2개의 모드를 위한 임펄스열.

Fig. 3. Impulse sequence for two modes.

3. 다중 입출력 시스템의 진동 제거

입력이 하나가 아닌 다중 입력 시스템의 경우에는, 각각의 기준입력이 가진하는 모든 진동모드에 대해서 입력다듬기 필터를 설계한 후, 기준입력과 컨벌루션 해 주면 진동을 제거할 수 있다.

n개의 입력을 가지며, 변환 행렬 $\mathbf{H}$가 다음과 같이 나타낼 때,

$$\mathbf{H}=[H_1 \quad H_2 \quad \cdots \quad H_n]=[h_{ij}]$$

출력 y 의 i 번째 요소인 y_i는 다음과 같이 나타내어진다.

$$y_i(s)=\sum_{j=1}^{n}h_{ij}(s)u_j(s) \quad (6)$$

여기에서 u_j는 u 의 j 번째 요소이다.

이제, p 개의 진동모드를 갖는 시스템의 잔류진동을 제거하기 위해서, 변환 함수 h_{ij}가 다음과 같이 나타내진다고 하자.

$$h_{ij}(s)=\frac{N(s)}{(s^2+2\zeta_1\omega_1s+\omega_1^2)\cdots(s^2+2\zeta_p\omega_ps+\omega_p^2)} \quad (7)$$

그러면, 이 진동모드들을 없애도록 다듬어진 기준입력 (shaped input) u_j^*는 다음과 같다.

$$u_j^*(s)=(A_{11}+A_{12}e^{-t_{12}s})\cdots(A_{p1}+A_{p2}e^{-t_{p2}s})u_j(s) \quad (8)$$

여기에서 A_{k1}, A_{k2}, t_{k2} 는 k 번째 모드에 대해 설계된 임펄스열의 매개변수로서, 임펄스들의 크기 및 두 번째 임펄스를 가하는 시각이다.

4. 문제점

입력다듬기 필터를 거치게 된 기준 입력에는 필연적으로 마지막 임펄스가 가해지는 시간만큼의 시간지연이 나타나게 된다. p 개의 다중 진동 모드를 가지는 시스템의 경우 그 크기는 다음과 같다[2].

$$(time\ delay) = \sum_{j=1}^{p} \frac{\pi}{\omega_j \sqrt{1-\zeta_j^2}} \tag{9}$$

이런 가진 시간의 증가는 결국 응답을 지연시키므로, 잔류진동을 없애더라도 결국 제어의 목적인 빠른 정착시간을 얻을 수 없게 한다. 다중 모드가 나타나는 다중입출력 시스템의 경우 이 시간지연은 무시할 수 없는 크기일 수도 있다. 따라서, 다음 장에서는 이런 시간지연 값을 현저하게 줄일 수 있는 기법을 제안한다.

III. 음의 임펄스열을 이용한 입력다듬기

본 장에서는 임펄스열을 사용할 때 장애가 되는 가진시간의 증가를 줄이는 방법으로써, 음의 크기를 갖는 임펄스를 사용하는 방법에 대해서 기술한다. 음의 크기를 갖는 임펄스를 사용함으로써 가진시간의 증가량을 줄이는 것이 가능함을 보이고, 이 때에 발생할 수 있는 문제점과 이를 극복하기 위한 음의 임펄스열 설계방법을 제안한다.

1. 음의 임펄스열

1.1 이론적 배경

앞에서 살펴본 바에 따르면, 하나의 진동 모드를 제거하기 위해서는 두 개의 양의 임펄스가 필요했다. 이 때 임펄스의 크기와 가해지는 시간은 완전히 진동의 고유진동수와 감쇠비에 의해 결정되었다. 그러므로 양의 임펄스를 사용할 경우 고유진동수 만큼의 시간지연이 항상 발생하였다. 그런데, 임펄스들이 음의 크기를 가지도록 허용하면, 3개의 임펄스를 사용할 경우에 임의의 시간내에 하나의 진동모드를 제거할 수 있다는 것이 밝혀져 있다[3][6]. (이후로는 음의 크기를 갖는 임펄스를 포함하는 임펄스열을 음의 임펄스열이라 칭한다.)

p개의 진동모드가 존재하는 경우에 대해, Singer가 구한 진동제거의 조건에 따르면, (2), (3)이 각각의 모드별로 성립해야 하고, 또한 (4), (5)가 성립해야 하므로 전체 구속방정식의 개수는 $2p+2$ 개이다. 이 때, 한 모드 당 n 개의 임펄스를 가한다고 하면, 각 임펄스의 크기 A_j와 가하는 시각 t_j 를 각각 구해야 하므로 $2n$ 개의 값이 독립적인 변수가 된다. 따라서, 이때 $2p+2$개의 구속 방정식을 만족시키기 위해 필요한 임펄스의 최소 개수는 다음의 식으로 결정할 수 있다.

$$2n = 2p+2 \quad \text{or} \quad n = p+1 \tag{10}$$

그런데, 음의 임펄스를 사용하기 위하여 임펄스가 가해지는 시각 t_j를 임의로 선정하기 원할 때는, 일단 (5)가 필요 없으므로 구속방정식의 개수는 $2p+1$ 이 된다. 또 이때에는 A_j 만이 독립변수가 되므로, 독립변수의 개수는 n 이 된다. 그러므로, $2p+1$ 개의 구속방정식을 모두 만족시키기 위해 필요한 임펄스의 개수는 다음과 같다[6].

$$n = 2p+1 \tag{11}$$

즉, 음의 임펄스열을 사용하여 p 개의 진동모드를 제거하고자 할 때, $2p+1$개의 임펄스를 사용하면 임의의 시간 내에 잔류진동을 제거하는 것이 가능하다.

1.2 문제점

임펄스열에 음의 크기를 가지는 임펄스를 사용할 경우 기준입력의 가진시간 증가량을 줄이는 것이 가능하다. 디지털 제어기를 사용할 경우는, 가진시간 증가량이 표본시간의 2배만큼만 발생하도록 줄일 수 있다. 그러나 이렇게 빠른 응답을 얻는 대신 제어 입력의 크기가 상대적으로 크고 속도가 빠르게 된다.

이 경우 액츄에이터에서 낼 수 있는 출력보다 더 큰 제어 입력이 발생할 수가 있고, 빠르게 변하는 제어 입력에 의해서 거의 가진되지 않았던 고차 모드가 크게 가진 될 가능성이 있다[5].

2. 액츄에이터 성능을 고려한 음의 임펄스열

2.1 배경

위에서 열거한 문제점 때문에, 음의 임펄스열을 사용할 때 얻어지는 빠른 응답이라는 큰 장점에도 불구하고, 실제의 시스템에는 적용하기 어렵다. 그래서 이를 액츄에이터에 무리를 주지 않도록 설계하는 기법이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 양의 임펄스열과 음의 임펄스열을 비교하여 음의 임펄스열이 양의 임펄스열과 유사한 특징을 갖도록 함으로써, 전술한 문제점을 해결하였다. 양의 임펄스열이 가진 특징은, 다듬어진 기준입력(shaped input)과 그 모든 고차 미분치들의 범위가 모두 원래 기준입력 및 고차 미분들의 범위 안에 포함된다는 것이다. 그러나 음의 크기를 갖는 임펄스열은 이 조건을 만족시키지 못하기 때문에 전술한 문제점이 발생하는 것이다.

그러므로 본 논문에서는 음의 임펄스열로 다듬어진 입력과 그 미분치가 원래 기준 입력 및 그 미분치의 범위 안에 있도록 하였다. 그러나, 여기에서 모든 고차 미분치에 대하여 위의 조건을 적용하는 것은 비 효율적이므로, 첫 번째 미분치까지 위의 조건을 적용하여 음의 임펄스열을 설계하였다.

2.2 이론

어떤 시스템을 제어한 결과 그 출력에 p개의 진동 모드가 나타났다고 하자. 이 때 이 진동모드를 없애기 위해 필요한 $2p+1$개의 임펄스의 입력시간 t_i 를 편의상 다음과 같이 등 간격으로 정한다.

$$\{t_i\} = \{0, T, 2T, \ldots, 2pT\} \tag{12}$$

이때, T 는 임의로 정하는 값이며, T 를 작게 할수록 임펄스열의 입력시간이 짧아지게 된다.

그리고, (2),(3),(4),(5)에 의해서 각 임펄스의 크기 A_i 는 T 만의 함수로 나타내 질 수 있으므로, T 가 결정되면 수식을 풀어서 A_i 를 구할 수 있다.

이때, T 를 너무 작게 잡으면 위에서 언급했던대로 액츄에이터에 무리가 가해질 수가 있으므로, 기준입력이 너무 크고 빠르지 않게 T 를 조절할 필요가 있다. 그러므로, 본 연구에서는 그림 4에 나타낸 바와 같이, T 의 변화에 따른 다듬어진 기준 입력 $X_d|_{shaped}$ 와 그 변화율 $\dot{X}_d|_{shaped}$ 의 변화를 고찰하였으며, 이 고찰을 바탕으로 T 를 조절해서 $X_d|_{shaped}$ 와 $\dot{X}_d|_{shaped}$ 가 원래의 그것의 범위 내에 들게 만드

는, 최소의 T 를 찾아내서 이를 임펄스열에 사용하였다. 즉, 다음과 같은 조건을 만족하는 최소의 T 를 찾도록 하였다.

$$\mathbf{X}_d|_{min} \le \mathbf{X}_d|_{shaped} \le \mathbf{X}_d|_{max} \tag{13}$$

$$\dot{\mathbf{X}}_d|_{min} \le \dot{\mathbf{X}}_d|_{shaped} \le \dot{\mathbf{X}}_d|_{max} \tag{14}$$

이 때 T 의 범위는 다음과 같다.

$$T_s \le T \le \left. \frac{\sum_{j=1}^{p} \frac{\pi}{\omega_j}}{2p} \right| \tag{15}$$

여기에서, T_s는 디지털제어기의 표본시간을 의미하며, ω_j 는 j번째 모드의 고유진동수를 의미한다. (15)에서 T 의 하한 조건은 임펄스 사이의 간격이 디지털 제어기의 표본시간보다는 커야한다는 조건으로부터 온 것이며, 상한 조건은 양의 임펄스열을 사용했을 때보다 긴 시간이 소요돼서는 안 된다는 조건이다.

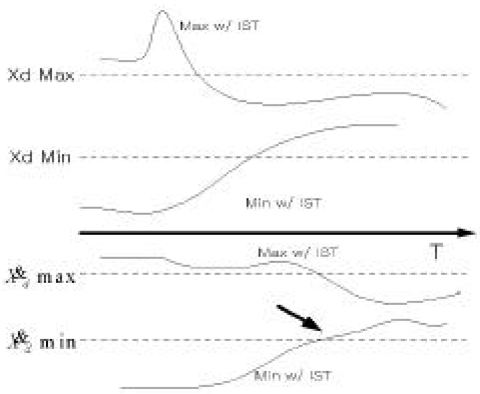


그림 4. T의 변화에 따른 다듬어진 기준입력 X_d 와 그 미분 $\dot{X}_d$의 변화.

Fig. 4. Change of the shaped input X_d, and its derivative $\dot{X}_d$ according to the variation of T.

2.3 토의

임펄스 사이의 시간간격을 등간격으로 한 것은 최적화를 위한 변수를 줄이기 위해서 편의상 사용한 것이기 때문에, 구해진 해가 조건을 만족하는 최적의 해라고 할 수는 없다. 그러나 감쇠비가 0인 진동모드에 대해서는 등간격이며 서로 대칭인 임펄스열이 존재하는 것이 밝혀져 있다 [3][6]. 그런데, 잔류진동은 대부분 감쇠비가 작아서 0에 가깝기 때문에 이런 의미에서 이 가정은 타당하다고 할 수 있다. 더불어 이러한 방법의 또 한가지의 이점은 T 를 변수로 함으로서 디지털 제어기의 표본시간의 배수로 T 를 조절할 수 있기 때문에, 유효숫자에 의한 오차를 미연에 방지할 수 있다는 것이다.

3. 모의 실험

3.1 단일 진동 모드가 발생하는 시스템

그림 5(a)에 나타난 유연성이 있는 2차 시스템을 제어했을 때의 나타나는 진동을, 제안한 방법으로 제거하였다. 이때의 기준 입력은, 시작점과 끝점에서 속도와 가속도가 0인 5차의 다항식 궤적이다. 그림 6에는 입력다듬기를 사용하지 않았을 때와 기존의 방법(양의 임펄스열), 제안한 방법을 사용했을 때의 모의실험 결과를 보여주고 있다. 그림 7은 마찬가지 과정을 사다리꼴 속도궤적을 갖는 기준입력에 대해서 모의 실험한 결과이다.

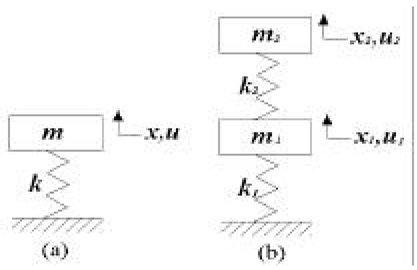
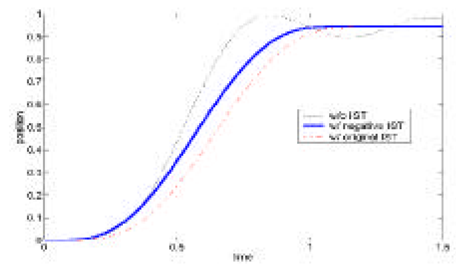
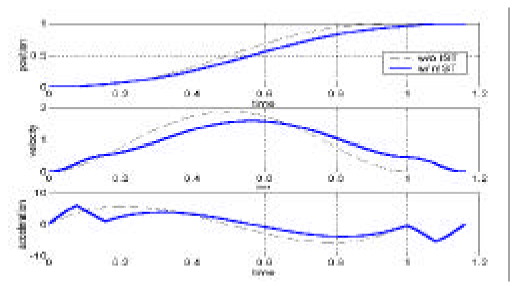


그림 5. 모의 실험을 위한 시스템.

Fig. 5. Systems for simulations.



(a) Trajectory response to the 5th-order polynomial input



(b) Reference inputs and its derivatives

그림 6. 모의실험 결과.

Fig. 6. Simulation results.

두 경우 모두 기존의 방법보다 더 빠른 시간 내에 진동을 완전히 제거 한 것을 볼 수 있다. 또한 기준 입력들과 그 변화율이 입력다듬기 기법을 사용하지 않았을 때의 범위에 포함된 것을 볼 수 있다.

3.2 다중 진동 모드가 발생하는 시스템

대상 시스템은 그림 5(b)에 나타난 유연성이 있는 2개의

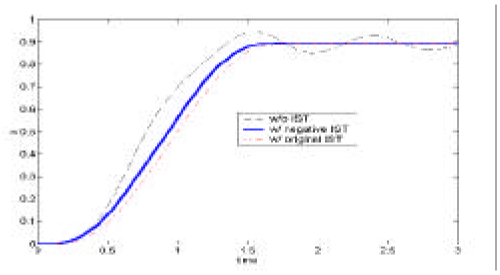


그림 7. 사다리꼴 속도를 갖는 기준입력을 가한 경우의 응답.

Fig. 7. Trajectory response with the trapezoidal velocity input.

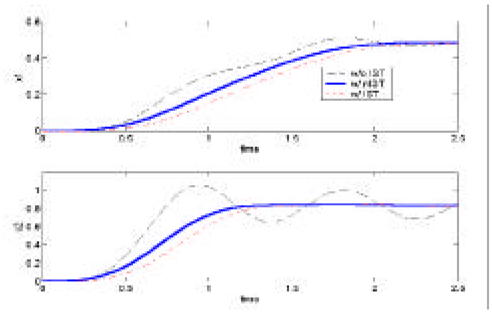


그림 8. 2자유도 시스템의 모의실험 결과.

Fig. 8. Simulation result of a 2-DOF system.

질량-스프링 시스템이다. 이 시스템을 페루프 제어했을 때 나타나는 2개 모드의 진동을, 제안한 방법으로 제거하였다. 이 때 사용된 기준입력은 가진 시간과 크기가 각각 다른 2개의 5차의 다항식 궤적이다. 제안한 방식은 근본적으로 기준 입력에 의존하여 임펄스열이 정해지기 때문에 2개의 기준입력에 서로 다른 임펄스열이 컨벌루션 된다.

그림 8은 모의 실험 결과이다. 굵은 실선으로 나타난 제안된 방법의 결과가, 진동이 없으면서도 가장 빠른 응답

표 1. 모의 실험의 정리; 여기에서 t_s는 잔류진동이 완전히 없어지는 정착시간, t_f는 궤적의 입력이 끝나는 시점을 의미한다. 그러므로 $t_s - t_f$는 궤적입력이 완료된 후의 정착시간이 된다.

Table 1. Summary of simulations; $t_s - t_f$ means the settling time after the final time of trajectory input.

$t_s - t_f$ / Input Shaper	1-DOF system		2-DOF system	
	With polynomial input	With trapezoidal velocity	x1	x2
None	7.80 s	6.78 s	> 10 s	> 10 s
Positive	0.30 s	0.42 s	0.70 s	0.70 s
Negative	0.16 s	0.29 s	0.42 s	0.47 s

을 내주는 것을 볼 수 있다.

표 1은 각 경우에 대해서 다듬어지지 않은 기준입력이 종료되는 시간으로부터의 정착시간을 비교한 결과이다. 기존의 방법과 제안한 방법 모두 진동을 완전히 제거할 수 있기 때문에, 다듬어진 기준입력이 끝나는 곳이 결국 정착시간이 되는데 제안한 방법이 좀더 빠른 시간 내에 진동을 제거할 수 있음을 확인 할 수 있다.

IV. 실험

제안한 이론을 검증하기 위해서 실험을 수행하였다. 실험 플랜트는 2축 유연 팔(flexible arm) 로봇이다. 로봇의 구조는 그림 9과 같다. 각 축의 시작부분에 모터가 부착되어 액츄에이터 역할을 하게 된다. 각 링크는 스프링강으로 만들어져서 유연성을 가지고 있으므로 진동의 원인이 된다.

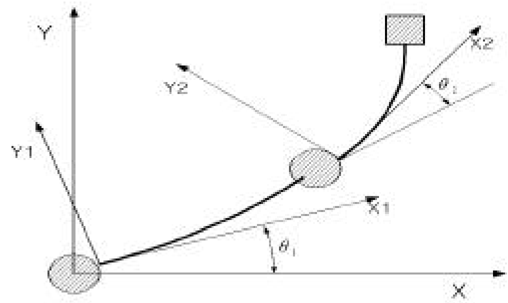


그림 9. 실험 로봇 구조 및 좌표계.

Fig. 9. Structure and coordinate system of the 2-DOF (2-joint) robot for experiment.

실험장치는 그림 10과 같이 구성되었다. 진동의 크기를 측정하기 위해서, 1축의 경우엔 첫 번째 링크에 장착된 스트레인 게인지(strain gauge)의 신호를 사용하였으며, 2축의 경우엔 로봇의 끝점에 장착된 가속도계의 신호를 사용하였다. 여기서 나온 전압신호는 끝단의 진동을 완전히 선형적으로 표현해주지는 않지만 진동이 작은 경우는 선형적으로 비례한다고 볼 수 있었다. 제어 및 데이터 처리를 위해서 IBM-PC를 사용했으며, 실험 환경으로는 실시간 운영체제 중 하나인 QNX와 Watcom C컴파일러를 사용하였다.

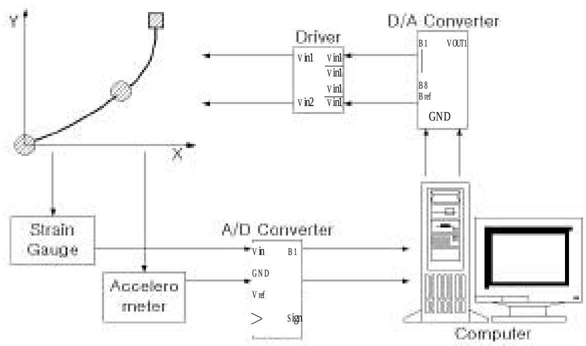


그림 10. 실험 시스템 구성.

Fig. 10. Experimental setup.

1. 단일입출력계

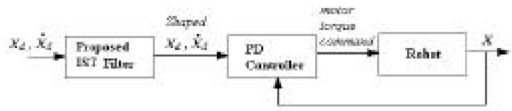


그림 11. 제어 시스템의 블록선도.
Fig. 11. Block diagram of control system.

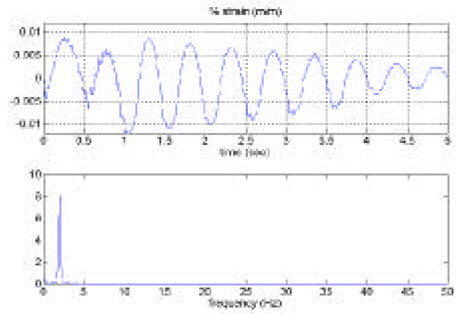
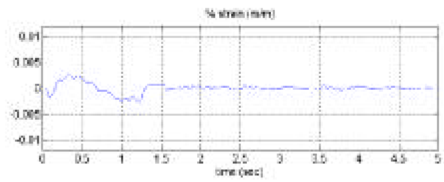
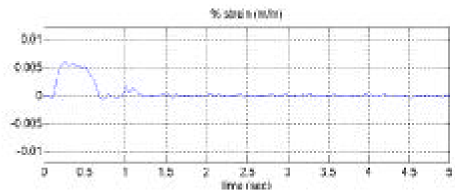


그림 12. 링크의 진동을 대변하는 스트레인 게이지의 신호.
Fig. 12. Strain signal measured by strain gages.

단일입출력계에서 실험하기 위해서 먼저 두 번째 링크를 부착하지 않은 채로 첫 번째 링크만으로 실험을 수행하였다. 이를 위해 그림 11에 나타난 형태로 제어기가 구성되었다. 폐루프 위치제어를 위해 PD제어기가 사용되었으며, 기준 입력 $x_d, \dot{x}_d$는 제안된 입력다듬기 필터를 통과하여 폐루프의 기준입력으로 가해지게 된다. 기준 입력(x_d)으로는 1초간 30도를 회전하도록 구성된 3차의 다항식을 사용했다. 이때 스트레인 게이지에서 측정된 진동의 크기와 스펙트럼이 그림 12에 나타나 있다.



(a) With positive impulse sequence



(b) With proposed negative impulse sequence

그림 13. 입력다듬기 기법 적용 결과.
Fig. 13. Strain signals with input shaping.

실험결과 아래와 같이 진동수 ω와 감쇠 ζ를 갖는 진동이 관측되었다.

$$f = 2Hz, \ \zeta = 0.03$$

이 진동을 제거하기 위한 입력다듬기 임펄스열을 제안한 방식대로 설계하면 다음과 같다.

$$T = 0.086s$$
$$A_1 = 1.0283, \ A_2 = -1.0146, \ A_3 = 0.9863$$

이 임펄스열 및 기존의 방법으로 구한 임펄스열을 사용하여 실험한 결과가 그림 13 에 나타나 있다. 두 방법 모두 진동을 거의 제거하였으며, 이 때 각각 입력 시간 증가량은 0.255sec 와 0.172sec이다. 음의 임펄스를 사용한 경우 약 33% 의 시간이 더 줄어든 것을 볼 수 있다.

2. 다중입출력계

단일 입출력계의 실험에 이어서, 2축을 동시에 움직이는 실험을 수행했다. 이 경우 두 개의 모터에 1축에는 2초간 움직이는 입력을, 2축에는 1초간 움직이는 입력을 가했고 그 후에는 정상상태 입력이 가해지게 된다. 기준입력과 입력다듬기 후의 기준입력이 그림 14에 나타나 있고, 입력다듬기를 적용하지 않고 실험할 때의 끝단의 진동이 그림 15 에 그려져 있다.

위의 실험으로부터 관측된 진동모드의 진동수와 감쇠는 아래와 같다.

$$f_1 = 0.83Hz, \ \zeta_1 = 0.04$$
$$f_2 = 2.95Hz, \ \zeta_2 = 0.10$$

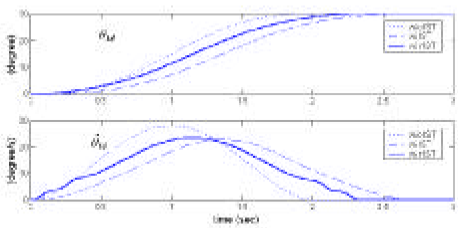


그림 14. 원래의 기준 입력과 입력다듬기 후 변화된 기준입력.
Fig. 14. Original and shaped reference inputs.

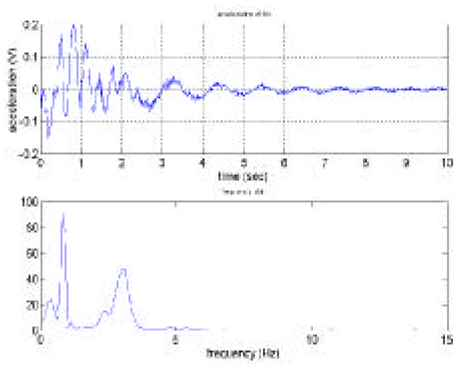


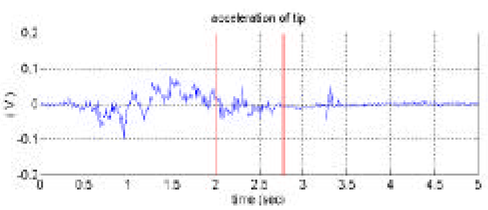
그림 15. 입력다듬기 전 끝단의 가속도 신호.
Fig. 15. Acceleration of the tip with original reference input.

이 진동을 없애기 위해서 제안한 방법인 (2)-(5),(12)를 사용하여 임펄스열을 설계하면 아래와 같다.

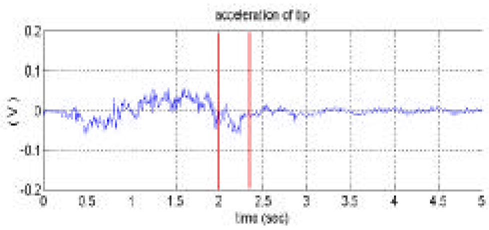
$$T = 0.088s$$
$$A_1 = 2.4362, A_2 = -4.0133, A_3 = 4.071,$$
$$A_4 = -3.6233, A_5 = 2.1294$$

이 임펄스열을 사용해서 실험한 결과가 그림 16에 나타나 있다. 양의 임펄스열을 사용한 경우와 제안된 음의 임펄스열을 사용한 경우가 같이 그려져 있는데, 각각의 정착시간의 값은 각각 2.77sec 와 2.35sec인 것을 볼 수 있다. 그러므로, 이 경우 역시 제안한 방법이 정착시간이 기존 방법보다 더 빠른 것을 알 수 있다.

그림 17은 각 방법을 적용할 때, 모터에 요구되는 토크 지령을 나타낸 것이다. 굵은 실선에서 볼 수 있듯이, 제안된 방법을 사용함으로써 음의 임펄스열을 사용함에도 불구하고 모터의 토크가 과도하게 증가하지 않은 것을 알 수 있다.



(a) With positive impulse sequence



(b) With negative impulse sequence

그림 16. 입력다듬기 기법 적용 결과.
Fig. 16. Vibration of tip with shaped reference input.

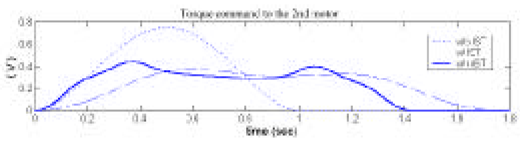


그림 17. 실험에서 요구된 모터의 토크 지령.
Fig. 17. Motor torque command in experiments.

V. 결론

본 논문에서는 다중 진동 모드를 가지는 선형 시불변 시스템에 적용될 수 있는 실용적인 임펄스 기반의 입력다듬기 기법을 제안하였다. 음의 임펄스열을 사용함으로써 입력다듬기기법이 가지는 시간지연을 최소화하였으며, 이때 발생하는 문제인 과도한 입력의 크기 및 과도한 입력의 변화율을 해결할 수 있는 방법을 제안하였다.

그리고, 이 기법을 단일 입출력 시스템과 다중입출력 시스템에 대한 모의 실험을 통하여 검증하였다. 또한, 2축의 유연팔을 가진 로봇을 제작하여 실험을 수행한 결과, 양의 임펄스열을 사용한 방법의 정착시간이 2.77초인데 반하여, 제안된 방법의 정착시간은 2.35초로 단축되었다. 이로써, 제안된 방법이 실제 시스템에서도 효과적임을 볼 수 있었다.

참고문헌

[1] 박주이, 장평훈, "입력 다듬기 기법을 이용한 유연관절을 갖는 로봇의 잔류진동 제거," 대한기계학회 논문집, 제18권 제11호, pp. 3066-3074, 1994.

[2] N. C. Singer and W. P. Seering, "Preshaping command inputs to reduce system vibration," *ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, vol. 112, pp. 76-82, 1990.

[3] B. W. Rappole, N. C. Singer, and W. P. Seering, "Input shaping with negative sequences for reducing vibrations in flexible structure," *Proceedings of the American Control Conference*, San Francisco, California, pp. 2695-2699, 1993.

[4] W. E. Singhose and B. W. Mills, "Command generation using specified negative amplitude input shaping," *Proceedings of the American Control Conference*, San Diego, California, pp. 61-65, 1999.

[5] W. E. Singhose, W. P. Seering, and N. C. Singer, "Time-optimal negative input shapers," *ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control*, vol. 119, pp. 198-205, 1997.

[6] B. W. Rappole, *Minimizing Residual Vibrations in Flexible Systems*, MIT Artificial Intelligence Laboratory Technical Report AITR-1371, June, 1992.

윤 승 국

1998년 KAIST 기계공학과 졸업(공학사). 2000년 동대학원 졸업(공학석사). 2000.3 2000.6 G.C. Tech(주) 근무. 2000.6 현재 기아자동차(주) 근무.

박 주 이

1991년 KAIST 기계공학과 졸업(공학사). 1993년 동대학원 졸업(공학석사). 1993 현재 동대학원 박사과정. 주관심분야는 입력다듬기 기법, 서비스 로봇, 범용 로봇 제어기.

장 평 훈

1774년 서울대 공대 기계공학과 졸업(공학사). 1977년 동대학원 졸업(공학석사). 1987년 MIT 기계공학과 졸업(공학박사). 1987 1995 KAIST 기계공학과 조교수. 1995 현재 동대학 부교수. 주관심 분야는 비선형 강인 관측기/제어기, 입력다듬기 기법, 시스템 모델링, 유공압시스템 제어, 여유자유도 로봇, 서비스 로봇, 범용 로봇 제어기.