

구조적으로 유연하고 긴 로봇 매니퓰레이터의 제어를 위한 입력 Shaping 필터링 방법

論 文
45~1~17

Input Shaping Filtering Methods for the Control of Structurally Flexible Long-Reach Manipulators

黃 東 渙* · 權 東 秀**
(Dong-Hwan Hwang · Dong-Soo Kwon)

Abstract - Due to high payload capacity and high length-to-cross-section ratio requirements, long-reach manipulator systems are expected to exhibit significant structural flexibility. To avoid structural vibrations during operations, various types of input shaping filtering methods have been investigated. A robust notch filtering method and an impulse shaping filtering method were investigated and implemented. In addition, two very different approaches have been developed and compared. One new approach, referred to as a "feedforward simulation filtering method" uses imbedded simulation with complete knowledge of the system dynamics. The other approach, "fuzzy shaping filtering method", employed a fuzzy logic method to modify the joint trajectory from the desired end-position trajectory without precise knowledge of the system dynamics.

Key Words : Robot Control, Flexible Manipulator Control, Input Shaping Filter, Vibration Reduction

1. 서 론

최근 로봇 매니퓰레이터(Robot Manipulator)는 용접, 가공, 조립등의 자동 생산 공정에서 단순하고 반복적인 작업을 수행하는데 많이 사용되고 있는데, 단순 노동의 대치 개념에서 위험한 환경에서의 인간 대치 개념으로 그 용도가 점차 바뀌어 가는 추세이다.

자동화 공정에서 널리 사용되고 있는 로봇 매니퓰레이터는 대부분 강체 링크(Rigid Link)의 연결 구조를 가진 것으로 크고 무거운 특성을 지니고 있다, 따라서 에너지의 소모가 크며, 부하 운반 능력이 떨어진다. 그 결과 큰 작업 공간에서 큰 물체를 대상으로 하는 작업에는 부적합한 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 등장한 것이 보다 적은 무게를 지닌 유연한 로봇 매니퓰레이터(Flexible Robot Manipulator)인데 핵 폐기물의 처리, 큰 구조물 용접, 항공기 조립, 우주선 조립 등과 같이 큰 대상체를 다루는 작업에서 매우 유용하게 사용될 수 있다. 한가지 예로, 미국 에너지성(Department of Energy, DOE)에서 수행하고 있는 대형과제인 핵 폐기물 처리용 매니퓰레이터의 개발(Development of a Tank Waste Retrieval Manipulator System, TWRMS)에서 유연한 로봇 매니퓰레이터의 개념을 이용하기 위해서 많은 연구를 수행하고 있다 [1][2].

전술한 TWRMS는 대략 수직 전개 기둥(Vertical Deploying Mast)을 포함하는 긴팔 매니퓰레이터(Long-Reach Manipulator,

LRM), 짧은 팔(Short-Reach)의 정교한(Dextrous) 매니퓰레이터, 그리고 End-Effector 툴(Tool)의 세가지의 요소로써 구성하는 것으로 하고 있다. 기초 연구의 결과[1][2]로 부터 LRM은 매우 낮은 구조적 진동 주파수를 가지고 있으며, 그것의 구조적 유연성이 매니퓰레이터 끝점(End-Point)의 위치 정확도에 큰 영향을 미친다는 것이 예상된다. 따라서 LRM의 유연성을 고려한 끝점의 위치 제어는 정교한 매니퓰레이터를 이용하여 수행하는 핵폐기물의 처리 작업의 효용성에 대단히 큰 영향을 미친다.

TWRMS와 관련하여 LRM의 구조적 진동에 관한 기본적인 제어 문제들을 연구하기 위하여 실험용 모델(Testbed)이 바텔 퍼시픽 노스웨스트 연구소(Battelle Pacific Northwest Laboratory, PNL)에 만들어져 있다. 이 실험용 모델은 그림1에 나타나 있는데, 약 4.5[m] 길이의 유연한 보(Flexible Beam)와 보 끝에 부착된Schilling사의 유압 매니퓰레이터로 이루어져 있다. 유연한 보는 동적으로 간략화된 LRM을 나타내고, Schilling사의 매니퓰레이터는 정교한 매니퓰레이터를 나타낸다. 평면상의 운동(Planar Operation)을 보장하기 위하여 공기 베어링(Air Bearing)이 유연한 보의 끝을 지지한다. 앞으로 서술될 본 논문에서의 연구 결과도 그림1에서 보여주는 실험용 모델을 대상으로 하였다.

유연한 로봇의 제어 방법에는 여러가지가 부류가 있는데, 본 논문에서 취급하는 방법인 입력(Input) Shaping 필터링(Filtering) 방법 중, 현재 가장 보편화 되어 있고 많이 쓰이는 방법은 임펄스(Impulse) Shaping 필터[4][5], 강인한 노치 필터(Robust Notch Filter)[6], 그리고 역동특성 방법(Inverse Dynamic Method)[7][8]등으로 나눌 수 있다. 그 밖의 부류로서 가속도 제환(Acceleration Feedback) 방법[9], 수동 댐핑 방법(Passive Damping Method)[10], 그리고, 끝점 제환(End-Position Feedback)[11] 등을 들 수 있는데, 이러한 접근법들에

* 正 會 員 : KIST 機電研究部 先任研究員 · 工博
** 正 會 員 : KAIST 自動化 및 設計工學科 助教授 · 工博
接受日字 : 1995年 7月 24日
1次 修正 : 1995年 10月 28日
2次 修正 : 1995年 11月 24日

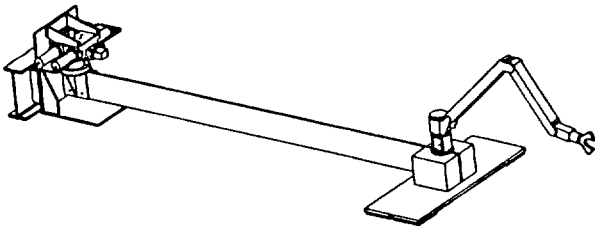


그림 1 유연한 로봇 매니플레이터의 실험용 모델
Fig. 1 Testbed for the flexible robot manipulator

관한 성질들은 Book교수의 논문[3]에 잘 정리되어 있다.

임펄스 Shaping 필터링 방법은 진동 억제에 효과적인 반면, 원하는 응답을 얻는데 시간 지연을 유발시킨다. 강인한 필터링을 위하여 복수 개의 임펄스를 사용한다면, 유발된 시간 지연의 증가는 낮은 시스템 대역폭(Low System Bandwidth)을 가진 매우 유연한 매니플레이터의 원격조정(Teleoperation)이나 로봇 경로(Trajectory)의 추종(Tracking)제어에 있어서 심각한 문제가 된다. 강인한 노치 필터를 이용한 Shaping 필터링 방법은 사용하기 쉽고 매우 실질적이다. 또한, 넓은 필터링 대역 밴드를 가지고 있기 때문에, 시스템 동특성의 변화에 대하여 매우 강인하다[6]. 그러나, 이 필터링 방법 또한 임펄스 Shaping 필터와 마찬가지로 현저한 시간 지연을 유발시킨다.

본 논문에서는 전술한 두가지 필터링 방법을 구현, 평가하였으며, 두가지의 새로운 접근법을 제안하고, 구현하였다. 전술한 두가지의 필터링 방법들은 현저한(Dominant) 진동 주파수, 현저한 진동 주파수 및 감쇠비(Damping Ratio)등과 같은 대상 플랜트인 유연한 동적시스템에 관한 부분적인 정보를 필요로 하는데, 아주 극단적인 경우인 시스템의 구조적 동특성을 잘 알고 있을 때와 거의 모르고 있을 때의 특성이 관심의 대상이 될 수 있다. 즉, 시스템의 동특성을 어느 정도 이용하느냐에 따라 성능이 어떻게 달라지는지의 평가를 내릴 수 있을 것이다. 따라서, 이러한 극단적인 상황에 대한 접근법을 각각 제안하고 구현, 검토하였다. 전향 시뮬레이션 필터링(Feedforward Simulation Filtering) 방법이라 불리워지는 한가지의 방법은 끝점 궤환, 강인한 노치 필터, 그리고 전향 토크(Torque)등 여러가지 다른 방법들의 장점을 취하도록 구성하였다. 이 방법을 이용하기 위해서는 역동특성 방법에서 처럼 시스템의 동특성을 잘 알고 있어야 하며, 굉장히 좋은 추종 특성을 보여준다. 퍼지(Fuzzy) Shaping 필터링 방법이라는 또다른 접근법에서는 유연한 동특성의 정확한 정보가 필요하지 않다. 강체(Rigid) 매니플레이터가 받는 것과 같은 운동명령을 유연한 매니플레이터가 받는 것을 피하기 위하여, 조인트의 경로는 유연성의 효과를 고려하면서 퍼지 법칙(Rule)에 의하여 끝점 경로로부터 수정된다.

2. 유연한 로봇을 위한 입력 Shaping 필터링 방법

본 논문에서 다루고자 하는 입력 Shaping 필터링 방법을 포함하는 전체 시스템의 개략도는 그림2와 같다. 로봇의 동작 명령부나 원격 조작 마스터(Teleoperation Master) 매니플레이터의 경로 생성기로부터 출력되는 원하는 경로를 입력 Shaping 필터에 통과시켜 조인트 궤환 제어기를 포함하는 유연한 매니

플레이터 시스템에 인가한다. 이때 입력 Shaping 필터의 목적은 유연한 매니플레이터 출력에서의 진동이 가능한 빨리 억제 되도록 원하는 경로를 변경시켜 주는 것이다. 그림2에서 사용한 조인트 궤환 및 전향 토크(Feedforward Torque) 제어기는 다음 식(1)과 같이 구성된다.

$$\tau(t) = k_1(\theta_{fd}(t) - \theta(t)) + k_2(\dot{\theta}_{fd}(t) - \dot{\theta}(t)) + k_3(\ddot{x}_{fd}(t)) \tag{1}$$

여기서 $\tau(t)$ 는 LRM의 실험용 모델에 인가되는 토크(Torque)이고, $\theta_{fd}(t)$ 와 $\dot{\theta}_{fd}(t)$ 는 입력 Shaping 필터를 통과한 변경된 원하는 조인트 각도 및 조인트 각속도 경로이며 $\theta(t)$ 와 $\dot{\theta}(t)$ 는 조인트 각도 및 각속도의 경로이다. $\ddot{x}_{fd}(t)$ 는 필터링된 끝점의 원하는 가속도 경로이다. $k_i, i=1,2,3$ 은 제어기의 이득을 나타낸다. 식(1)에서 전향 토크 항은 경로 추종 성능을 개선시키기 위해서 부가된다. 앞으로 서술될 여러가지 필터링 방법의 비교에서 위의 조인트 궤환제어기의 이득은 모두 동일하게 두고 실험을 수행하였다.

2.1 강인한 노치 필터

강인한 노치 필터는 그림3에서 보여 주듯이 시스템 응답에서 발생하는 진동 주파수 성분을 주파수 영역에서 노치 필터를 사용하여 억제시키는 것이다. 강인한 노치 필터의 전달함수는 다음 식(2)과 같이 주어진다[6].

$$F(s) = \frac{[(\frac{s}{\omega_z})^2 + 1]^n}{[(\frac{s}{\omega_p})^2 + 2\frac{\zeta_p}{\omega_p}s + 1]^n} \tag{2}$$

여기서, ω_z 는 시스템의 공명 주파수이고, ω_p 는 저대역(Low-Pass) 필터의 고유진동수(Natural Frequency)이다. 특히 ω_p 와 ω_z 사이에는 $\omega_p = \alpha\omega_z$ ($\alpha=1\sim 2$)의 관계가 만족되도록 선택하며, ζ_p 는 저대역 필터의 감쇠비인데 임계감쇠 응답(Critical Damping Response)을 얻기 위하여 1로 설정하였다. 식(2)에서 보듯이, 고차의 극점을 부가하여 전체적으로 저대역 필터의 효과를 가지도록 한다. 실제 시스템의 구현 시에는 원하는 경로를 식(2)의 필터를 통과시켜 변경하는데, 진동 주파수가 여러 개인 경우에는 식(2)와 같은 형태의 필터를 여러 개 연결하여

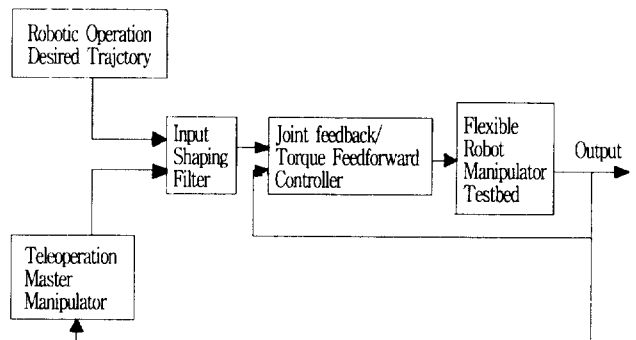


그림 2 전체 시스템 구성도
Fig. 2 Block diagram of overall system

사용할 수 있다. 강인한 노치 필터는 감쇄된 공명 주파수 ω_z 에 영점을 인가하고, 주파수 ω_0 에 임계 감쇄된 극점을 부가시킨다. 파라미터 α 는 조인트 운동의 과도한 떨림없이 가능한 빠른 시스템의 응답을 얻도록, 여러 실험을 통하여 가장 적당한 값인 1.5로 설정하였다. 초기에는 필터의 계수 n 값을 1로 두고 실험을 수행할 수 있는데, 플랜트의 변화에 보다 강인하게 하기 위하여, 즉, 측정된 진동주파수의 불확실성에 대하여 보다 강인하게 하기 위하여, 필터의 계수 n 값을 증가시킬 수 있다. 그러나, 이 경우에는 시스템의 느린 응답을 감수해야한다. 다른 여러가지 필터링 방법들과의 조건을 동일하게 하기 위해서 n 값을 2로 두고 실험을 수행하였다.

2.2 임펄스 Shaping 필터

임펄스 Shaping 필터의 원리는 그림4에서 볼 수 있다. 먼저 시스템이 선형이며 진동하는 특성을 가진 시스템이라고 하면, 입력에 임펄스를 가할 때 그림4(a)의 실선과 같은 응답을 얻을 것이다. 이러한 응답에서 그림4(a)와 같이 반주기 이후에 점선과 같은 응답을 얻도록 하는 임펄스를 가하면 반주기 이후에는 그림4(b)와 같이 진동이 제거될 것이다. 이러한 원리를 이용하여, 시스템의 응답에 진동이 있을 경우, 임펄스 2개의 간격과 크기를 적절히 조절하여 원하는 경로와 컨볼브(Convolve)하여 경로를 변경시킨다. 임펄스의 크기와 임펄스 사이의 간격을 결정하기 위하여 시스템 응답의 고유진동수(Natural Frequency)와 감쇄비(Damping Ratio)를 이용한다. 그리고 이러한 변수의 불확실성에 대한 강인성을 높이기 위해서 임펄스의 숫자를 증가시킨다[4]. 본 논문에서 대상으로한 LRM 실험용 모델에 대한 실험 시에는 3개의 임펄스를 가지고 폐루프(Closed-Loop) 시스템의 현저한 진동 모드를 상쇄시키도록 설계하였는데, 이때 임펄스는 다음 식(3)와 같이 표현되며 원하는 명령 궤적과 디지털(Digital) 영역에서 컨볼브된다.

$$h(t) = \frac{1}{(1+M)^2} \delta(t) + \frac{2M}{(1+M)^2} \delta(t - \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}) + \frac{M^2}{(1+M)^2} \delta(t - \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}) \quad (3)$$

여기서, $M = \exp(-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}})$ 이고, ω_n 은 비감쇄 고유진동수(Undamped Natural Frequency)이다. 또한, ζ 는 대상 시스템의 감쇄비(Damping Ratio)이다. 임펄스 Shaping 필터는 실제로 시스템의 폐루프 극점(Pole)이 있는 곳에 영점(Zero)을 두어서, 현저한 진동 모드를 여기서키는 명령 입력의 주파수 성분을 필터링한다. 정확한 감쇄비를 결정하는 것이 쉽지는 않지만, 성능은 추정된 주파수와 감쇄비에 따라 좌우된다. 여러개의 진동 모드에 대해서는 위에 제시한 임펄스를 각 진동 모드에 대하여 설계하여 직렬로 연결하여 사용한다.

2.3 전향 시뮬레이션 필터

전술한 강인한 노치 필터나 임펄스 Shaping 필터는 시스템 고유진동수의 반 또는 그 배수 만큼의 시간 지연을 야기시키므로, 매우 느린 유연한 시스템에 대해서는 실질적이지 못하다. 추종 지연 문제를 피하기 위하여, 역동특성 방법을 이용하여, 끝점에서 완전한 추종특성을 낼 수 있는 전향 토오코와 조인트

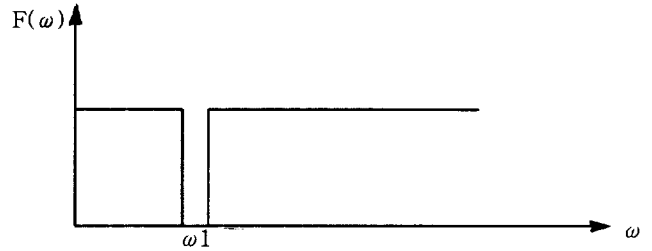
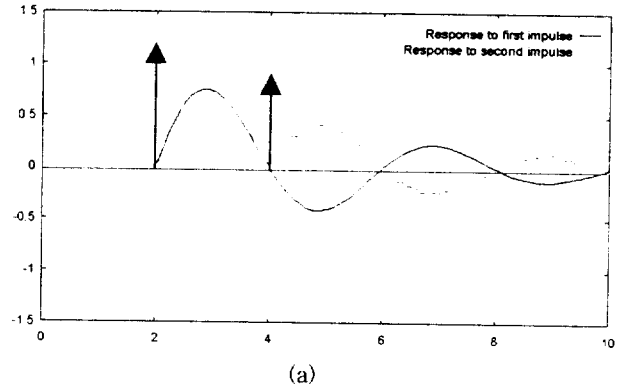
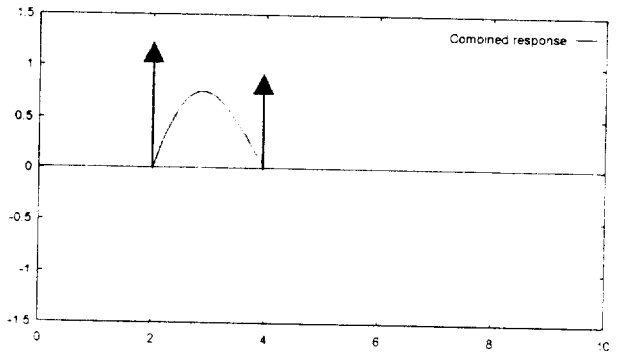


그림 3 강인한 노치 필터
Fig. 3 Robust notch filter



(a)



(b)

그림 4 진동을 억제시키는 임펄스 응답
Fig. 4 Impulse response for reducing vibration

경로를 미리 만들어 낼 수도 있다. 그러나, 이러한 역동특성 방법은 유연한 로봇 매니퓰레이터와 같은 비최소위상 시스템(Non-Minimum Phase System)에 대해서 보통 비인과(Noncausal) 해를 제공한다[7]. 따라서 그의 응용은 로봇의 동작에 국한되며 원격제어 동작에서는 사용할 수 없다[7].

Cannon[11]이 지적한 것처럼, 끝점 제한은 조인트의 응답에 근거한 폐루프 제한시스템보다 더욱 더 넓은 밴드폭, 즉 Clamped 고유진동수 보다 훨씬 넓은 밴드폭을 제공할 수 있다. 그러나, 끝점 제한은 파라미터 변화나 모델링 오차에 매우 민감하므로, 근사적으로만 알려진 동특성을 이용하는 실질적인 응용에는 부적절할 수도 있다. 점형적인 비례-미분(Proportional-Derivative, PD) 조인트 제한 시스템은 보통 양호한 안정성을 가지지만 폐루프 밴드폭(Closed-Loop Bandwidth)은 Clamped

고유진동수(Natural Frequency)보다 클 수는 없다. 실제의 응용에서는 보통 기본 Clamped 고유진동수의 반보다 작다[3].

그림5는 위에 기술한 방법들에서 장점의 대부분을 결합한 전향 시뮬레이션 필터링 방법을 보여주고 있다. 강인한 노치 필터를 가진 넓은 밴드폭의 시스템은 보다 적은 시간 지연을 가지므로 조인트 케환 루프보다 2배 또는 3배의 높은 밴드폭을 가진 페루프 시스템이 조인트 속도케환을 포함하는 끝점 케환 제어 시스템이 구성 되어져 있다. 전술한 바와 같이, 끝점 케환은 조건적으로(Conditionally) 안정하고 모델링 오차에 민감하며 고이득을 요구하므로, 실제의 응용에 사용하기가 어려울 수도 있다. 따라서, 끝점이 원하는 필터링된(Desired Filtered) 경로를 추종하도록 하는 조인트 경로를 생성하기 위하여 강인한 노치 필터를 가진 끝점 케환은 단지 시뮬레이션에서만 사용된다.

2.4 퍼지 Shaping 필터

전술한 입력 Shaping 필터링 기술들은 이미 알고 있는 시스템의 수학적인 동특성에 기반을 두고 있다. 만약 시스템에 관하여 언어적인 용어(Linguistic Term)로 기술된 부정확한 (Imprecise) 지식만을 가지고 있다면, 퍼지논리는 이러한 부정확한 지식을 다루기 위한 효율적인 도구로 사용될 수 있다[13]. 역동특성 방법[7]에서 보여주었듯이, 유연한 매니플레이터는 끝점에서 어떠한 경로를 추종하기 위해서 링크(Link)의 휘어짐을 허용해야 한다. 가속과 감속 중에 휨 운동을 허용하기 위하여,

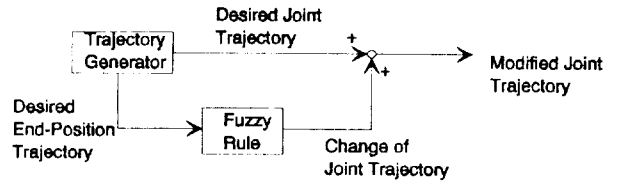


그림 6 퍼지 Shaping 필터링 방법
Fig. 6 Fuzzy Shaping Filtering Method

조인트 경로의 변경은 가속도 형상을 이용하여 퍼지 규칙에 의해서 행해진다. 그림6은 퍼지 Shaping 필터링 방법의 조인트 경로 생성 구조를 나타내고 있는데, 변경된 조인트 경로는 원래의 조인트 경로에 퍼지 시스템의 출력을 부가함으로써 얻어진다. 사용된 퍼지 규칙은 표1에서 볼 수 있다. 운동 중 링크의 휘어짐을 허용하기 위해서 가속 구간에는 조인트 경로를 원하는 경로보다 많이 움직이도록 변경시키고, 감속 구간에는 적게 움직이도록 구성한 것이다. 규칙에서 속도 지령은 변경된 조인트 경로를 부드럽게 하기 위해서 규칙의 전건부로 이용하였다.

퍼지 싱글톤(Fuzzy Singleton) 방법, 최대-곱(Max-Product) 방법, 무게 중심법(Center of Gravity)이 퍼지화 방법(Fuzzification Method), 추론법(Inference Method), 그리고 비퍼지화 방법(Defuzzification Method)으로 사용되었다. 각 퍼지 변수에 대해서 삼각형의 소속함수를 채택하였다.

3. 모델링(Modelling)

본 논문에서 대상으로 하는 LRM의 실험용 모델에 직접 입력을 가하기 이전에 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 동작 특성을 확인하기 위해서는 플랜트의 모델이 필요하다. 또한, 2절에서 서술한 전향 시뮬레이션 필터에서 모델을 직접 이용하므로 모델링 작업이 필요하다. 본 절에서는 대상 플랜트에 대한 모델링 과정에 대하여 간단히 서술한다.

본 논문에서 사용한 유연한 로봇 매니플레이터는 가정된 모드(Assumed Mode) 방법을 이용하여 모델링되었다. 적은 수의 모드(mode)를 가진 정확한 모델을 얻기 위하여 허브(Hub) 관성(Inertia)과 끝점 질량(End-Mass)을 고려한 Pinned-Pinned 경계조건이 모드 Shape 함수[7]를 계산하는데 사용되었다. 다음과 같이 끝점 질량과 회전 관성을 가지는 단일 유연한 보로 모델링 하였다.

$$[M] \ddot{q}(t) + [D] \dot{q}(t) + [K] q(t) = [B] \tau(t) \quad (4)$$

여기서, 일반화된 좌표계인 q 는 다음과 같다.

$$q = [q_0, q_1, \dots, q_n]^T \quad (5)$$

관성 행렬 $[M]$ 은 모드 Shape 함수, 허브 회전 관성, 그리고 끝점 질량 및 회전관성으로 표현된다. 감쇠 행렬 $[D]$ 는 점성 조인트 마찰력(Viscous Joint Friction)을 나타내며, 입력 행렬 $[B]$ 는 조인트 토크(Torque)에 대한 것이다. 강성(Stiffness) 행렬 $[K]$ 는 구조적인 유연성을 나타낸다.

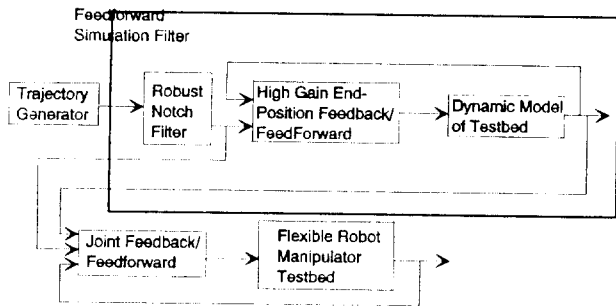


그림 5 전향 시뮬레이션 필터링 방법
Fig. 5 Feedforward simulation filtering method

표 1 퍼지 Shaping 필터에 대한 규칙

Table 1 Rules for fuzzy shaping filter

		\dot{x}_d						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
x_d	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	NS	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
	ZE	NS	NS	ZE	ZE	ZE	PS	PS
	PS	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
	PB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB

NB : Negative Big, PB : Positive Big
 NM : Negative Medium, PM : Positive Medium
 NS : Negative Small, PS : Positive Small
 ZE : Zero

4. 실험 시스템의 구성 및 실험 결과

4.1 실험 시스템의 구성

제어시스템의 구성은 그림7에서 보듯이 SUN 워크스테이션(Workstation)과 VME 버스(Bus)를 기반으로 한 랙(Rack)으로 이루어져 있다. SUN 워크스테이션은 그래픽 사용자 인터페이스(Graphic User Interface, GUI)로도 사용되며, 전체 제어시스템도 관장한다. 제어시스템의 랙에는 CPU 보드와 데이터(Data) 입출력을 위한 여러가지 인터페이스 보드(Interface Board)가 장착되어 있으며 계산량에 따라 CPU 보드를 부가할 수도 있다. SUN 워크스테이션과 시스템 랙 사이의 데이터 교환은 이더네트(Ethernet)를 통하여 이루어진다.

제어 소프트웨어는 모듈화, 그래픽 인터페이스(Graphic Interface), 확장성등을 제공하는 MICA(Modular Integrated Control Architecture)[12]의 틀 속에서 설계 구현하였다. MICA는 미국

의 오크리지 국립 연구소(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)에서 로봇 매니플레이터 제어를 위한 툴(Tool)로 개발된 소프트웨어 패키지(Package)이다. MICA는 이종의 매니플레이터와 이종의 운영 환경에서 이식 가능한 동작 코드(Code)를 생성한다. 또한, MICA는 매니플레이터를 제어하기 위하여, 협동해야하는 다중(Multiple) 프로세서의 환경을 제공한다. 제어기의 개발 과정에서는 LRM(Long Reach Manipulator)의 실험용 모델만의 특별한 면이 MICA의 틀 속에서 고려되어졌다. 전체 시스템의 소프트웨어는 VxWorks 실시간 운영체제 하에서 운용되며 사용자의 편의를 돕기 위해서 실시간 시뮬레이션 기능과 데이터 디스플레이(Data Display) 기능도 부가시켰다.

4.2 실험 결과 및 검토

조인트 궤환 제어기만 사용한 경우와 2절에서 서술한 4가지의 입력 Shaping 필터링 방법에 대한 실험 결과는 그림8~그림

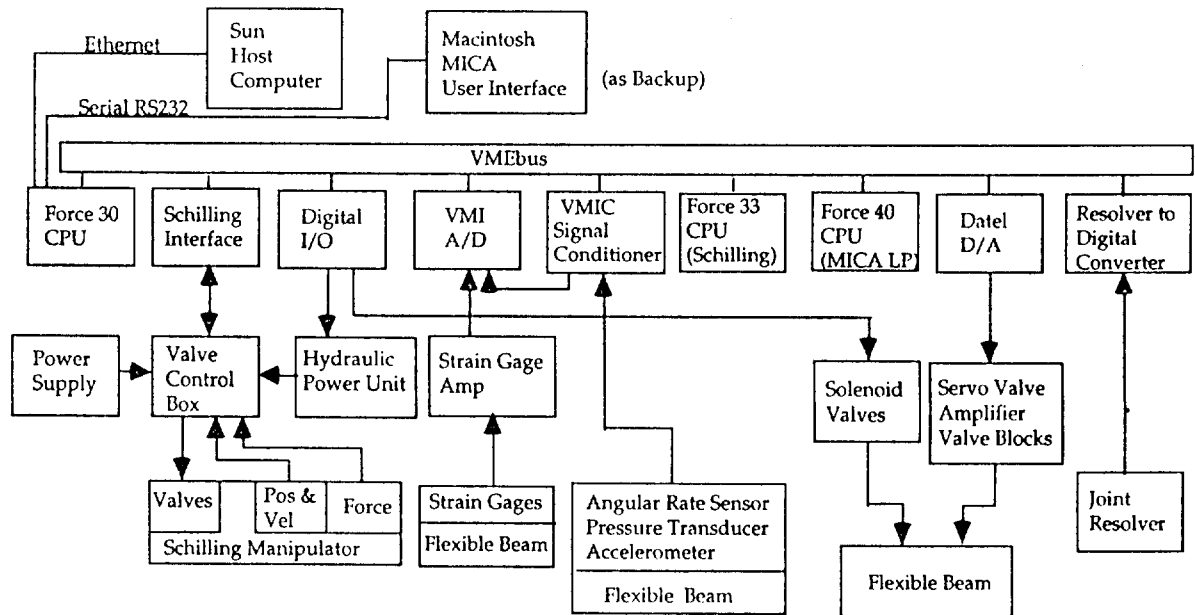


그림 7 실험 시스템의 구성
Fig. 7 Block diagram of experimental system

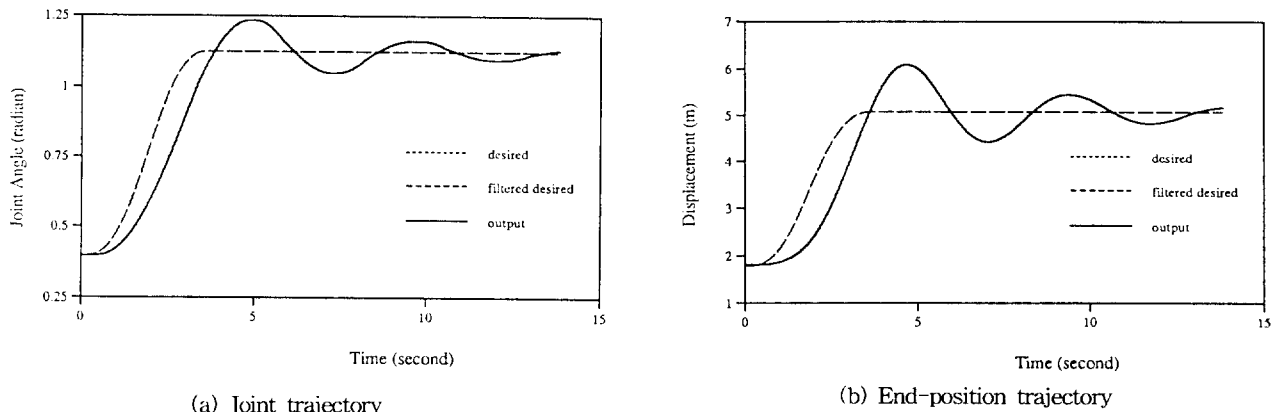
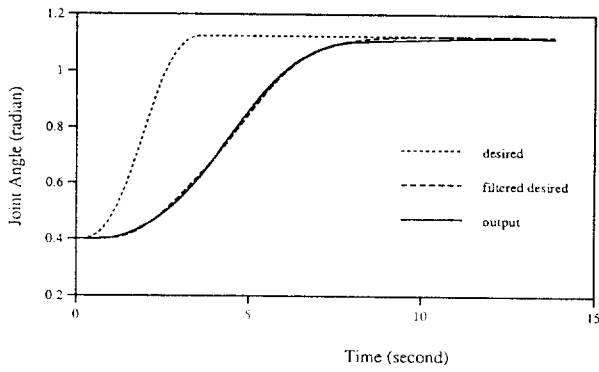
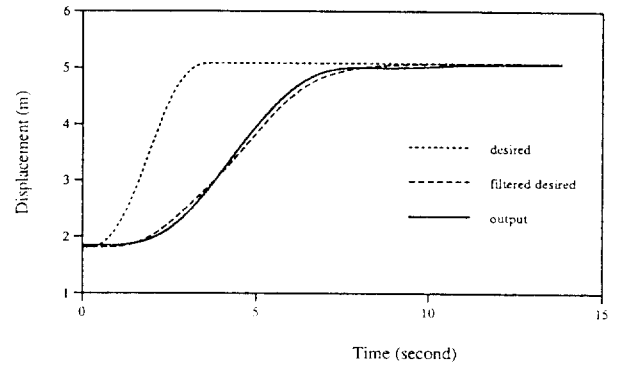


그림 8 조인트 궤환 제어기만의 응답
Fig. 8 Response for only joint feedback controller

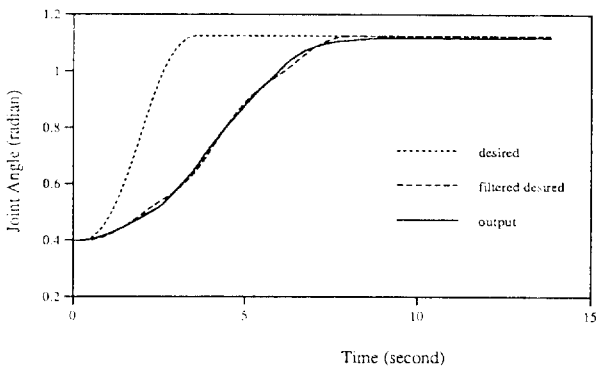


(a) joint trajectory

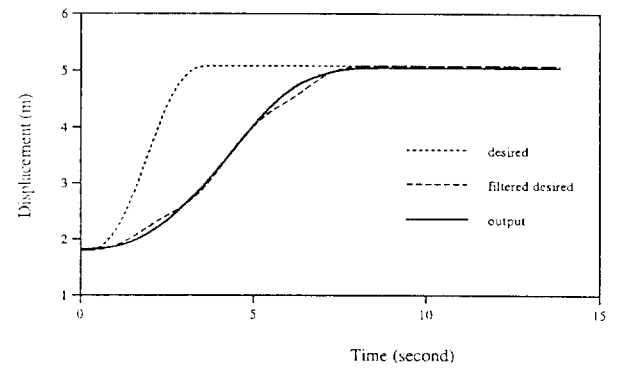


(b) End-position trajectory

그림 9 강인한 노치 필터의 응답
Fig. 9 Response for the robust notch filter

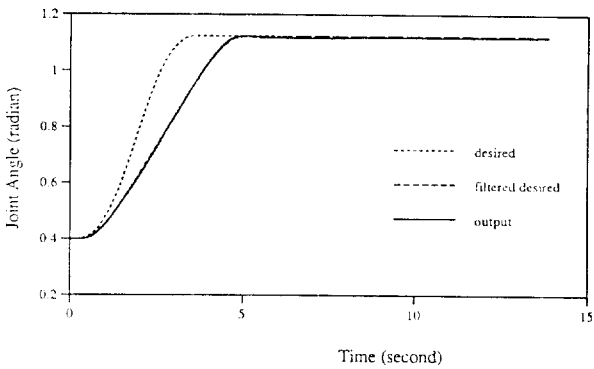


(a) joint trajectory

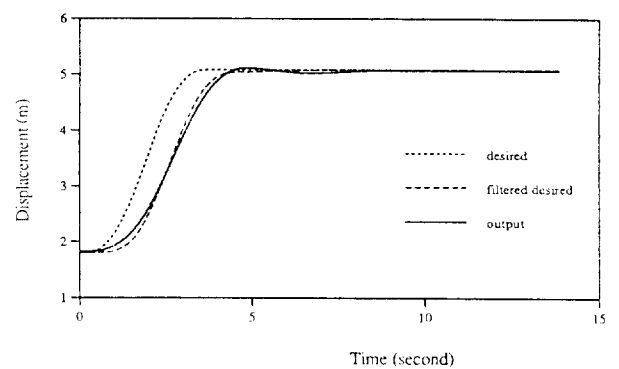


(b) End-position trajectory

그림 10 임펄스 Shaping 필터의 응답
Fig. 10 Response for the impulse shaping filter



(a) joint trajectory

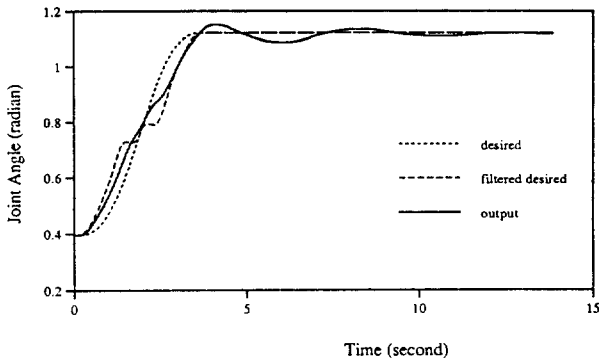


(b) End-position trajectory

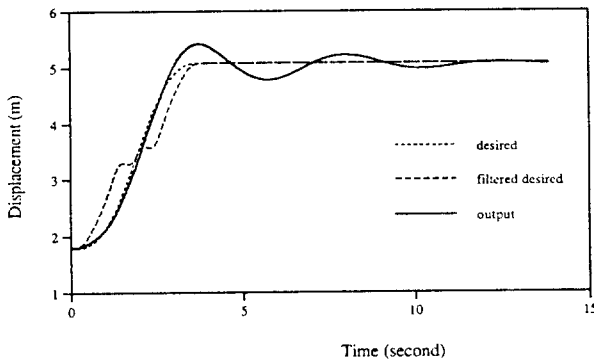
그림 11 전향 시뮬레이션 필터의 응답
Fig. 11 Response for the feedforward simulation filter

12에서 볼 수 있다. 그림9은 식(3)에서 $n=2$ 인 경우의 강인한 노치 필터에 대한 응답으로 오버슈트(Overshoot) 없는 부드러운 응답을 볼 수 있으나, 시스템 응답의 추종 지연도 볼 수 있다. 그림10은 3개의 임펄스를 사용한 경우의 임펄스 Shaping 필터의 응답 결과이다. 그림10에서 보듯이, 첫번째와 두번째 스텝(Step)에서는 필터링된 경로가 시스템을 여기 시키지만, 세번째 스텝 이후에는 여기된 진동이 완벽하게 제거됨을 알 수 있

다. 즉, 임펄스 열사이의 간격 만큼의 시간 지연을 야기시킨다. 그림11은 전향 시뮬레이션 필터를 사용했을 때의 결과인데, 플랜트 모델을 이용하여 적절한 조인트 경로를 생성하였으므로, 다른 방법에 비하여 비교적 좋은 성능을 보여준다. 그림12는 퍼지 Shaping 필터를 이용할 때의 결과인데, 규칙이 매우 개략적으로 구성되었음에도, 조인트의 경로 변경이 없는 조인트 제한 제어기만을 사용한 그림8의 결과와 비교하여 현저하게 성능



(a) joint trajectory



(b) End-position trajectory

그림 12 퍼지 Shaping 필터의 응답

Fig. 12 Response for the fuzzy shaping filter

이 향상되었음을 볼 수 있다.

위에서 수행한 실험의 조건들을 비교해보면, 퍼지 Shaping 필터, 강인한 노치 필터, 임펄스 Shaping 필터, 전향 시뮬레이션 필터의 순서로 시스템의 동특성을 점점 더 많이 이용하고 있다. 이러한 사실과 실험 결과들을 살펴보면, 시스템에 관한 정보를 많이 이용하면 할수록 보다 향상된 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 원하는 성능에 따라 필요한 만큼의 시스템에 관한 정보량을 역으로 결정할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 구조적으로 유연하고 긴 로봇 매니퓰레이터의 진동을 억제하기 위한 여러가지 입력 Shaping 필터를 제안하고 구현하였으며, 각각의 성능을 비교 검토하였다. 실험 및 검토의 결과, 강인한 노치 필터는 단지 시스템의 현저한 진동 주파수만을 필요로 하는데 비교적 좋은 성능을 내고 있다. 강인한 노치 필터는 다중 영점을 가짐으로써, 느린 응답 특성을 가지는 반면, 플랜트 동특성의 변화에 매우 둔감해진다. 임펄스 Shaping 필터링 방법은 시스템의 현저한 진동 모드의 주파수와 감쇄비를 이용하여 좋은 성능을 제공하고 있다. 전향 시뮬레이션 필터는 시스템 동특성을 잘 알아야 하고 그에 따라 계산량이 많아지지만, 거의 완벽한 추종 및 진동 억제 특성을 보여준다. 그러므로, 제어시스템 설계 시에는 성능과 시스템에 관한 사전 지식, 즉, 성능과 계산량 사이에서의 Trade-off 를 생

각해야 한다. 퍼지 Shaping 필터도 조인트 궤환 제어기만을 사용한 경우에 비하여 비교적 양호한 응답을 보여준다. 이제까지의 유연한 매니퓰레이터의 진동 제어를 위해서 퍼지 논리를 사용한 많은 접근법들[14][15]에서는 퍼지 논리가 주로 기존의 비례, 미분(PD) 조인트 궤환제어기를 대체할 수 있는 기본 제어기로만 사용되었는데 퍼지 Shaping 필터링 방법의 결과로부터 퍼지 논리를 미지의 시스템 또는 시변 시스템에 대한 입력 Shaping 필터로써의 사용 가능성을 보여 준다. 만약 시스템의 동특성에 관한 더 많은 지식이 퍼지 규칙에 부과 된다면 보다 향상된 결과를 기대할 수 있을 것이다.

본 연구와 관련하여 앞으로 계속 연구가 수행되어야 할 것으로 입력 Shaping 필터링 방법을 실제 3차원 다중 링크(Link)의 LRM으로 확장하는 것을 생각할 수 있다. 또한, 매니퓰레이터의 구조(Configuration)나 부하(Payload)의 변화에 따라 시스템의 기본 고유 진동수에 현저한 변화를 가져올 상황에 대해서 입력 Shaping 필터를 적용시키기 위한 실시간 Fast Fourier Transform(FFT)의 사용도 검토해 볼 수 있는 사항이다. 국내에서도 중기 산업, 항공 및 우주 산업의 발달에 따라 공정 대상체가 대형화 되는 추세에 있으며, 기저부하를 담당하는 원자력 발전소의 가동으로 인하여 대형의 핵 폐기물은 계속 증가할 것이다. 따라서, 본 논문의 결과는 이러한 작업에서 유연한 로봇을 응용할 때 매우 유용한 결과로 이용될 수 있으리라 사료된다.

본 연구는 한국과학재단의 해외 Post-Doc. 연수 지원, 미국에너지성(과제번호 AC 05-840R 21400), 미국의 ORISE의 U.S DOE POST Graduate Research Program 의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] D.-S. Kwon, S. March-Leuba, S. M. Babcock, and W. R. Hamel, Parametric Design Studies of Long-Reach Manipulators, *Proceedings of the American Nuclear Society Fifth Topical Meeting on Robotics and Remote Handling*, pp. 265-73, 1993. 4.
- [2] D.-S. Kwon, S. March-Leuba, S. M. Babcock, and W. R. Hamel, *Key Design Requirements for Long-Reach Manipulators*, ORNL/TM-12251, Oak Ridge National Laboratory, 1993. 9.
- [3] W. J. Book, Controlled Motion in an Elastic World, *Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 115, pp. 252-61, 1993.6.
- [4] N. C. Singer and W. P. Seering, Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration, *Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 112, pp. 76-82, 1990.
- [5] D. P. Magee and W. J. Book, The Application of Input Shaping to a System with Varying Parameters, *Proceedings of ASME Japan-USA Symposium on Flexible Automation*, San Francisco, Vol. 1, pp. 519-26, 1992.
- [6] J. F. Jansen, *Control and Analysis of a Single-Link*

Flexible Beam with Experimental Verification, ORNL/TM-12198, Oak Ridge National Laboratory, 1992. 12.

[7] D.-S. Kwon and W. J. Book, An Inverse Dynamic Method Yielding Flexible Trajectories, *Proceedings of 1990 American Control Conference*, pp. 186-93, San Diego, 1990. 5.

[8] E. Bayo and B. Paden, On Trajectory Generation for Flexible Robots, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 4, pp. 229-35, No. 2, 1987.

[9] P. Kotnik, S. Yurkovich, and U. Ozguner, Acceleration Feedback for Control of a Flexible Manipulator Arm, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 5, No. 3, pp. 181-96, 1988.

[10] T. E. Alberts, H. Xia, and Y. Chen, Dynamic Analysis to Evaluate Viscoelastic Passive Damping Augmentation for Space Shuttle Remote Manipulator System, *Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 114, pp. 468-75, 1992.

[11] R. H. Cannon and E. Schmitz, Initial Experiments on the End-Point Control of a Flexible One-Link Robot, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 3, No. 3, pp. 62-75, Fall 1984.

[12] P. L. Butler, An Integrated Architecture for Modular Control Systems, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 10, No. 2-3, 1992.

[13] H.-J. Zimmermann, *Fuzzy Set Theory - and Its Application*, Kluwer Academic Publisher, Hington, MA, 1985.

[14] E. Kubica and D. Wang, A Fuzzy Control Strategy for a Flexible Single Link Robot, *Proc. 1993 IEEE Int. Conf. on Rob. and Auto.*, pp. 236-41, Atlanta, GA, 1993. 5.

[15] J.-W. Kim, Y.-K. Ha, and Y.-P. Park, Vibration Control of a Flexible Arm Using Fuzzy Control Theory, *Proc. of Motion and Vibration Control*, 1992. 9.

저 자 소 개



황 동 환 (黃 東 渙)

1962년 10월 29일생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사). 1991년~1992년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 연수연구원 1993년~1994년 미국 Oak Ridge National Lab Post DOC. 현재 한국과학기술연구원 기전연구부 선임연구원



권 동 수 (權 東 秀)

1957년 8월 26일생. 1980년 서울대 공대 기계공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 기계공학과(생산공학 전공) 졸업(석사). 1991년 미국, Georgia Institute of Technology, 기계공학과 졸업(박사). 현재 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과 조교수