

DC 모터와 MR 브레이크로 이루어진 하이브리드 구동기의 힘 제어

安眞雄[†], 崔翼^{*}, 權東洙^{**}

Force Control of Hybrid Actuator Comprising DC Motor and MR Brake

Jinung An, Ick Choy, and Dong-Soo Kwon

요약

본 논문은 DC 모터와 MR(magnetorheological) 브레이크를 갖는 하이브리드 구동기의 제어 방법을 제안한다. 로봇을 포함하여 여러 영역에서 이용되는 DC 모터는 대표적인 능동형 구동기로 중량 대비 출력이 작고, 출력한계로 인해 어느 정도 이상의 제어 이득에서 힘 제어 특성이 불안정해지는 성질이 있다. 따라서 이러한 DC 모터의 제어 불안정성을 해결하고, 투명성을 높이기 위해 반능동형 구동기인 MR 브레이크를 DC 모터와 병렬로 연결한 하이브리드 구동기를 제안하고 이에 대하여 네트워크 이론에 기반을 둔 제어 방법을 제안한다. 입력전류의 방향에 따라 스스로 출력을 내는 DC 모터와는 달리 MR 브레이크는 입력전류의 부호가 바뀌는 것에 상관없이 외부의 부하와 반대의 출력을 내는 것이 그 특징이다. 이러한 MR 브레이크의 성질을 수동적이라 하고 네트워크 이론의 수동성을 이용한 하이브리드 구동기의 힘 제어 방법을 제안하고 실험을 통해 이의 성능과 안정성을 입증하였다.

ABSTRACT

This paper presents the control method for the hybrid actuator comprising a DC motor and an MR brake. Generally, a DC motor as an active actuator has a small power to weight ratio and goes unstable with higher force control gain due to its saturation limit. In order to cope with this instability and make the transparency higher, this paper proposes a hybrid actuator which consists of a DC motor and an MR brake as a passive actuator and its force control method based on network theory. A DC motor actively produces the output corresponding to the signs of the input currents. On the other hand, an MR brake passively resists against the external load independent of the sign changes of the input currents. This characteristics is widely known as "passive". This paper suggests a force control method based on passivity concept in network theory for the hybrid actuator and verified its performance and stability through the experiments.

Key Words : DC motor, MR brake, Force control, Passivity, Power Observer, Collaboration Control

1. 서론

로봇을 포함하여 여러 산업 현장이나 연구 환경에서 DC 모터는 대표적인 능동형 구동기로 널리 사용되고 있다. 특히 최근 각광을 받고 있는 로봇 분야인 햅틱 인터페이스나 원격 조종 로봇의 구동기로 이용되고 있다. 햅틱 인터페이스는 컴퓨터가 만들어내는 가상환경의 힘이나 토크 등과 같은 물리적 정보를 구동기를 갖는 기계적 장치를 통하여 사용자에게 전달해 주는 일종의 인간-로봇 상호작용 시스템이다. 따라서 햅틱 인

[†]교신저자 : 정희원, 광운대 정보제어공학과 전임강사

E-mail : anju@kw.ac.kr

^{*}정희원, 광운대 정보제어공학과 교수

^{**}정희원, 한국과학기술원 기계공학과 교수

접수일자 : 2005. 11. 29

1차 심사 : 2005. 12. 16

심사완료 : 2005. 12. 26

터페이스의 가장 중요한 목적은 사용자에게 가상 환경의 정보를 안정적으로 얼마나 생생하게 현실감 있게 느끼게 해 줄 수 있는가에 있다^[1]. 이와 마찬가지로 마스터와 슬레이브로 이루어진 원격 조종 로봇^[2]은 사용자가 마스터 로봇을 조작하여 이와 멀리 떨어진 슬레이브 로봇을 조종하여 원하는 목적을 달성하는 인간-로봇 상호작용 시스템으로 슬레이브 로봇이 놓인 환경의 정보들 예를 들면 힘, 토크, 위치, 방향 등을 마스터 로봇을 조작하는 사용자에게 있는 그대로 전달해 줄 수 있느냐가 안정성과 함께 원격 조종 로봇의 성능을 결정하는 중요한 요소이다.

따라서 힘, 토크, 중량, 관성 등의 전달을 위한 힘 제어가 필수적으로 동반되는 로봇 시스템에서는 구동기의 제어 안정성과 출력의 크기가 상당히 중요한 연구 쟁점이라 할 수 있다^[3]. 제어 안정성을 보장하기 위한 수많은 고전적인 힘 제어 방법들이 소개되었고^[4], 햅틱 인터페이스와 원격 조종 로봇에 그대로 적용되었다^[5,6,7]. 이러한 방법들은 본질적으로 감쇠 제어 이득을 크게 하여 전체 제어 시스템의 안정성 보장을 도모하는 것이다. 안정성과 함께 환경의 정보를 사용자에게 있는 그대로 전달해 주는 것(투명성)이 목적인 햅틱 인터페이스와 원격 조종 로봇 같은 사용자가 개입된 시스템에서는 위와 같은 방법들은 안정성을 보장해주는 대신 투명성을 해치는 결과를 초래한다. 말하자면 환경의 힘 정보가 10N이라면 안정성을 위해 감쇠 제어로 인한 2N의 힘 정보의 손실이 있다면 사용자에게 실제로 8N이라는 힘 정보만 전달되어 원래 요구되는 10N의 힘 정보를 그대로 전달 받지 못하게 된다는 것을 의미한다.

Colgate^[8]와 Adams^[9]등은 햅틱 인터페이스의 안정성을 보장하기 위해서는 물리적 감쇠가 필수적이라는 사실을 수동성을 이용하여 논리적으로 입증하였고, 사용자에게 안정하게 재현할 수 있는 임피던스의 범위로 정의되는 “Z-width”를 소개하였다^[10]. Colgate와 Brown은 안정성을 향상시키기 위해 물리적인 댐퍼를 DC 모터와 함께 사용하였다^[10]. 그러나 이 방법은 어떠한 물체와도 접촉이 없는 즉 마찰이나 저항력이 전혀 없는 자유의 가상공간을 재현하는 데는 상당한 제약이 따른다. 왜냐하면 물리적인 댐퍼가 갖는 감쇠력의 영향으로 가상환경이 마치 점성이 있는 유체 속에 있는 것처럼 사용자가 느끼게 되기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 DC 모터와 MR 브레이크를 갖는 하이브리드 구동기를 햅틱 인터페이스에 적용하여 다양한 가상 물체, 즉 레고블록, 스티로폼, 스프링, 댐

퍼 등을 안정하고 투명하게 재현하는 연구를 이미 수행하였다^[11]. MR 브레이크는 자기장의 크기에 따라 점성이 변하는 자기유변유체(magnetorheological fluid)를 이용한 전기기기로 입력전류의 세기에 따라 발생 저항력의 크기가 달라지는 반능동형 구동기의 일종이다. 또한 MR 브레이크 등과 같이 물리적 감쇠를 제어 가능한 댐퍼와 DC 모터를 함께 갖는 하이브리드 구동기에 대하여 Z-width를 수학적으로 증명하고, 실험적으로 입증하였다^[12]. 이들로부터 하이브리드 구동기가 일반 DC 모터에 비해 안정성과 투명성이 훨씬 우수함을 확인할 수 있었다. MR 브레이크 등과 같은 반능동형 구동기는 본질적으로 외부적인 힘에 의해서만 저항력을 발생하는 수동성을 갖는다. 즉, 외부의 부하에 대하여 구동기의 에너지를 소모하는 특성이 있기 때문에 본질적으로 안정하다. 또한 MR 브레이크는 DC 모터에 비해 동일한 기계적 물리량인 중량이나 체적에 대하여 더 큰 출력을 생성한다. 표 1에 본 연구에서 사용한 MR 브레이크(MRB2107-3, Lord사)와 DC 모터(RE35-118778, Maxon사)의 제원을 서로 비교한 결과를 나타내고 있다.

표 1 DC 모터와 MR 브레이크의 비교
Table 1 Comparison of DC motor and MR brake

제원	DC 모터	MR브레이크
정격출력(Watt)	90	500
정격전압(V)	42	24
중량(kg)	0.34	1.41
최대토크(Nm)	1.07	5.6
단가(US \$)	300	250
출력대중량비(Watt/kg)	265	355
토크대중량비(Nm/kg)	3.15	3.97
출력대용적비(Watt/cm ³)	0.26	2.30
출력대가격비(Watt/\$)	0.3	2.0

본 연구에서는 중량 대 토크 비를 향상시킬 뿐만 아니라 안정성과 투명성을 동시에 제고하기 위해 DC 모터와 MR 브레이크를 갖는 하이브리드 구동기의 힘 제어 기법을 제안하고 이를 실험을 통하여 입증하고자 한다. 본 논문은 기존의 하이브리드 구동기의 힘 제어 방식을 소개하고 이의 문제점을 고찰한 다음 새로운 하이브리드 구동기의 힘 제어 방법을 제안하며 하이브리드 구동기를 갖는 2자유도 로봇에 적용한 실험 결과를 통해 제안하는 힘 제어 기법의 유용성을 평가하고

자 하며, 가상 환경의 물리적 정보를 사용자에게 투명하고 안정하게 제공하는 햅틱 인터페이스뿐만 아니라 실제 환경의 물리적 정보를 사용자에게 투명하고 안정하게 제공하는 것을 목적으로 하는 원격조작로봇(원격수술 로봇, 핵폐기물 처리 로봇 등)이나 peg-in-hole 등의 조립 로봇(엔진 블록 조립 로봇, 렌즈 가공 로봇 등)에 DC 모터와 MR 브레이크의 하이브리드 햅틱 제어를 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 하이브리드 구동기를 갖는 햅틱 인터페이스

강성이 상당히 큰 가상 벽에 대한 구현은 햅틱 인터페이스의 제어 특성을 가장 잘 표현하는 수단으로 널리 이용되고 있다. 그림 1은 전형적인 햅틱 인터페이스의 블록선도를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 햅틱 인터페이스의 구성은 사용자와 햅틱 장치 그리고 가상 환경으로 구성되어 있으며, 구동기로는 이상적인 능동형 구동기 예를 들면 DC 모터를 사용하고 센서로는 디지털 엔코더를 사용하고 있다. 또한 강성(K)과 감쇠(B)로 구성되는 가상 벽은 이산 시간에서 정의되며, 속도는 위치에 대하여 오일러의 후방 차이법에 의해 계산된다. 따라서 가상 벽은 구동기가 스스로 만들어 내는 힘을 사용자에게 되먹임 하는 PD 이산 시간 제어기라고 할 수 있다.

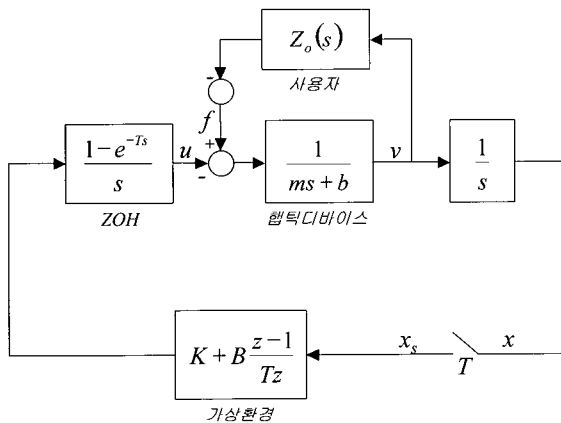


그림 1 햅틱 인터페이스의 블록선도
Fig. 1 Simplified model of a haptic interface

Colgate는 수동성을 이용하여 그림 1과 같이 강성(K)과 감쇠(B)로 이루어진 가상 환경을 구현하는 햅틱 시스템의 안정도를 식 (1)로 유도하였다^[8,10].

$$b > \frac{KT}{2} + B \quad (1)$$

식 (1)로부터 안정성을 보장하기 위해서는 시스템 고유의 물리적 감쇠(b)가 특정한 샘플링 시간을 갖는 이산 시간 제어기가 생성하는 전체 감쇠보다 반드시 커야 함을 알 수 있다. 따라서 DC 모터 등의 능동형 구동기를 사용하는 햅틱 인터페이스는 시스템 고유 감쇠(b)를 넘어서는 가상 환경을 안정하게 구현할 수 없다.

만일 가상 감쇠(B)를 만들어 낼 수 있는 물리적 감쇠기가 존재하고 동시에 가상 강성(K)을 DC 모터가 만들어 내는 햅틱 인터페이스를 고려하면 그림 2와 같으며, 이때의 물리적 감쇠기를 제어가능 감쇠기라고 정의한다.

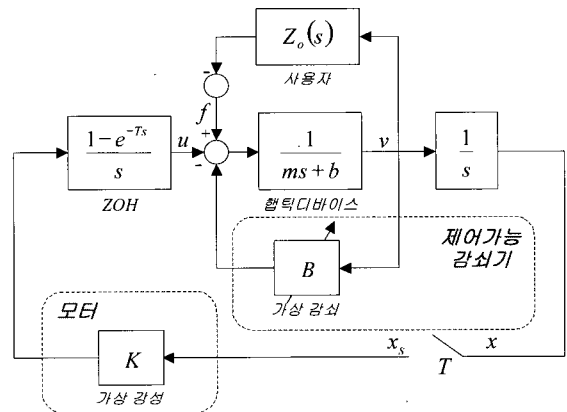


그림 2 제어가능 감쇠기와 모터로 이루어진 하이브리드 구동기를 갖는 햅틱 인터페이스의 블록선도
Fig. 2 Block diagram of the haptic interface actuated by motor and controllable damper

즉 DC 모터와 제어가능 감쇠기를 갖는 하이브리드 구동기의 햅틱 제어는 DC 모터가 가상 강성(K)을 모사하고 제어가능 감쇠기가 가상 감쇠(B)를 담당하도록 서로 독립적인(decoupled) 제어 구조를 갖는다. 그림 2의 경우에 대한 안정도는 식 (2)와 같다^[12].

$$b + B > \frac{KT}{2} \quad (2)$$

식 (2)와 식 (1)로부터 하이브리드 구동기가 DC 모터에 비해 더 큰 강성 및 감쇠 제어를 안정하게 수행할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 이유로 MR 브레이크와 DC 모터를 함께 사용하는 하이브리드 구동기의 일례를 제안하였다^[11,12]. 자기유변유체의 빙햄소성(Bingham plastic) 거동특성으로 인해 MR 브레이크는 쿨롱 마찰의 특성을 갖는다^[13]. 감쇠력은 속도에 비례하므로 일반성에 위배되지 않는 범위에서 또 다른 감쇠력은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$f_d = Bv = B|v|sgn(v) \quad (3)$$

따라서 MR 브레이크를 이용하여 마찰력의 크기 ($B|v|$)를 조절함으로써 원하는 감쇠력을 생성할 수 있다. 그림 1에서와 같이 디지털 엔코더를 사용하여 위치를 검출하는 경우에는 이산 시간 영역에서 추정된 속도를 사용하므로 요구하는 감쇠력은 식 (4)로 쓸 수 있다.

$$f_d = B|v^*|sgn(v) \quad (4)$$

이 때 v^* 는 이산 시간 영역에서 추정된 속도를 의미하고 마찰력의 크기, $B|v^*|$ 는 쿨롱 마찰로 모델화된 MR 브레이크의 입력인 시스템이 경험하는 연속 시간 영역에서의 속도에는 영향을 받지 않는다. 따라서 MR 브레이크는 연속 시간 영역에서의 속도의 방향에 따라 쿨롱 마찰력의 크기를 조절함으로써 감쇠력을 생성할 수 있다. 결론적으로 MR 브레이크는 제어 가능한 감쇠력을 생성할 수 있다. 그림 3에 감쇠력을 생성하는 MR 브레이크의 블록선도를 표시한다.

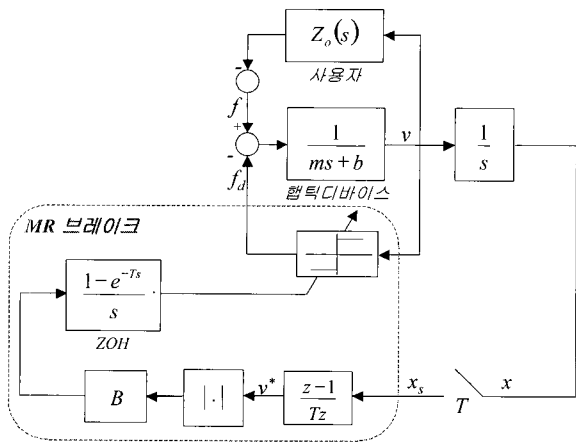


그림 3 감쇠 구현을 위한 MR 브레이크를 갖는 햅틱 인터페이스의 블록선도

Fig. 3 Block diagram of the haptic interface actuated by MR brake for damping display

이로써 그림 2의 제어가능 감쇠기 대신에 MR 브레이크를 이용하여 감쇠력을 재현하고 DC 모터를 이용하여 스프링에 대한 탄성력을 재현하는 하이브리드 구동기를 갖는 햅틱 인터페이스를 구성할 수 있으며, 하이브리드 구동기를 갖는 1 자유도 햅틱 인터페이스를 제작하여 이의 유용성을 검증하였다^[11,12]. 그림 4에 DC 모터와 MR 브레이크로 이루어진 하이브리드 구동기를 갖는 1 자유도 햅틱 디바이스를 나타낸다.

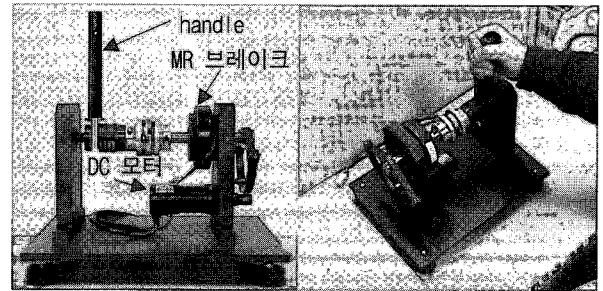


그림 4 DC 모터와 MR 브레이크를 갖는 1자유도 햅틱 인터페이스

Fig. 4 A single DOF haptic interface with DC motor and MR brake

3. 하이브리드 구동기의 힘 제어 기법

DC 모터가 강성 제어를 담당하고 MR 브레이크가 감쇠 제어를 담당하는 독립적인 PD제어기에 대하여 2장에서 설명하였다. 특별히 강성과 감쇠를 갖는 선형 가상 환경 모델에 대하여 햅틱 인터페이스를 구성하고 이 때 하이브리드 구동기를 사용하였다. 일반적으로 로봇들이 접촉하는 환경과 에너지를 서로 주고받는 경우에 힘 제어가 필요하다. 햅틱 인터페이스는 가상 환경과 접촉하고, 조립용 로봇은 peg-in-hole과 같은 실제 환경과 접촉한다. 앞서 설명한 바와 같이 기존의 힘 제어 방식은 접촉 환경과 로봇 간의 상호 작용을 강성, 감쇠, 질량과 같은 선형적인 모델로 제어기를 구성하여 구현하고 있다. 이러한 방법은 물리적으로 비선형성을 갖는 수많은 접촉 환경을 모델링이 용이한 선형 시스템으로 근사화하는 것으로 실제 접촉 환경과의 상호작용을 그대로 재현하거나 모사할 수 없다. 특히 접촉 환경의 물리적 정보를 가감 없이 사용자에게 전달해야 하는 햅틱 인터페이스를 예로 들면 이러한 선형 근사화 방법은 구현하고자 하는 가상 환경의 대상과 폭을 좁게 만든다. 말하자면 강성(K)만으로 구성된 제어기는 공과 같은 탄성체 등을 어느 정도 만족할 만한 수준으로 구현할 수 있고, 감쇠(B)만으로 구성된 제어기는 물과 같은 유체 등을 재현할 수 있을 뿐, 마찰이나 스티로폼 같은 비선형성을 갖는 물체를 사용자에게 생생하게 재현할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 로봇과 환경사이의 상호작용을 에너지적 관점에서 고찰하고자 하며 네트워크 이론에 기반을 둔 작력 (effort)과 흐름(flow)로 표현되는 에너지 변수를 이용한 제어기를 설계하고자 한다.

DC 모터와 MR 브레이크로 이루어진 하이브리드 구동기의 제어 기법을 로봇이 접촉하는 환경의 전달함

수(임피던스)로 표현되는 PID 등의 선형 제어 법칙이 아니라 환경과의 상호작용을 물리적인 에너지(수동성) 법칙으로 제안하고자 한다. 일반적으로 수동성은 원격 조종로봇, 햅틱 인터페이스 등을 포함하여 다양한 형태의 제어 시스템의 해석에 널리 이용되고 있다^[5,7,14].

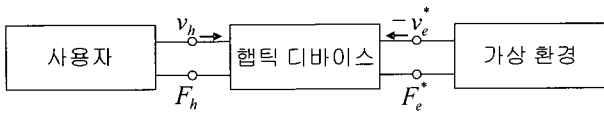


그림 5 햅틱 인터페이스의 네트워크 모델
Fig. 5 Network model of a haptic interface

시스템으로부터 에너지가 만들어지지 않는 한 시스템은 수동적이다. 달리 말하면, 수동적인 시스템은 에너지를 저장하거나 소모시킬 뿐이다. 사용자와 가상 환경 간의 에너지의 교환이 햅틱 디바이스를 통해 이루어지는 햅틱 인터페이스의 네트워크 모델을 고려해 보자(그림 5). 이산 변수(discrete variable)는 별표로 첨자 표시하고, 별표가 없는 것은 연속 시간 변수이다. 수동성의 정의로부터 식 (5)를 만족할 때 그림 5의 햅틱 인터페이스는 수동성을 만족한다.

$$\int_0^t [f_h(\tau)v_h(\tau) + f_e^*(\tau)(-v_e^*(\tau))]d\tau > 0, \forall t > 0 \quad (5)$$

사용자가 의도적으로 시스템을 불안정하게 만들지 않는다고 가정하면, 식 (5)는 식 (6)으로 간단히 표현된다.

$$\int_0^t f_e^*(\tau)(-v_e^*(\tau))d\tau > 0, \forall t > 0 \quad (6)$$

식 (6)은 사용자가 수동적이라는 가정 하에 햅틱 디바이스와 가상 환경의 상호작용이 수동적이면 햅틱 인터페이스가 수동적이라는 것을 뜻하고, 가상환경으로부터 햅틱 디바이스로 공급되는 에너지를 의미한다. 이는 다시 모든 시간 범위에 걸쳐 일률(power), $f_e^*(t)(-v_e^*(t))$ 이 양의 값을 가지면, 햅틱 인터페이스는 언제나 수동적이라는 것을 이른다. 이를 순간 수동성(instant passivity)으로 정의하면 식 (7)과 같고 이는 식 (6)의 모든 시간에 대한 미분 형태가 된다.

$$f_e^*(t)(-v_e^*(t)) > 0, \forall t > 0 \quad (7)$$

매 샘플링 순간마다 일률은 양이거나 음일 것이다.

일률이 양일 때, 수동형 구동기인 MR 브레이크는 힘을 생성할 것이므로 순간 수동성을 이용하여 햅틱 인터페이스를 제어할 수 있다. 즉 다시 말해서, 매 샘플링 순간에 관측되는 일률이 양이면 수동형 구동기인 MR 브레이크로 가상환경을 구현하고, 그렇지 않으면 능동형 구동기인 DC 모터를 제어하여 가상환경을 재현하는 것이다. 이러한 일률을 관측하는 것을 일률 관측기(power observer, PO)로 정의하고 일률 관측기에 의한 접근 방법을 그림 6에 나타낸다.

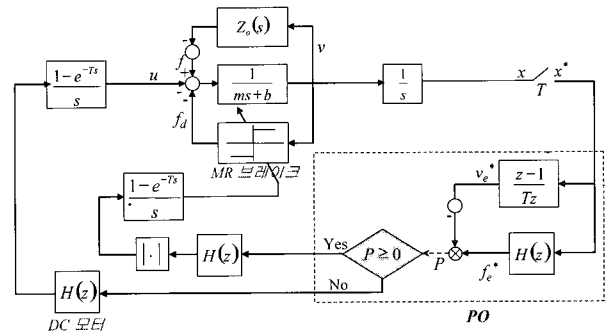


그림 6 일률 관측기(PO)에 의한 하이브리드 구동기의 힘 제어
Fig. 6 Force control of a hybrid actuator corresponding to power observer(PO)

그림 6에 의하면, PO에 의한 제어 방법은 아래와 같이 수학적으로 표현된다.

$$\begin{aligned} f_e^*(-v_e^*) \geq 0 &\Rightarrow \begin{bmatrix} u \\ f_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ |H(z)x(z)ZOH|sgn(v) \end{bmatrix}, \\ f_e^*(-v_e^*) < 0 &\Rightarrow \begin{bmatrix} u \\ f_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(z)x(z)ZOH \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

이 때, $ZOH = (1-e^{-Ts})/s$ 이다. 이 방법은 수동성 여부에 따라 MR 브레이크와 DC 모터를 계속 번갈아 구동하기 때문에 제어 상태가 바뀌는 순간에 불연속성이 필연적으로 발생하게 된다. 이러한 불연속성은 시스템을 비인과적(non-causal)으로 만들어 시스템의 안정성을 해치는 요소가 된다. 따라서 시스템의 안정성을 개선하기 위한 보다 나은 제어 방법이 필요하다.

강성이 무한히 큰 가상 벽을 구현하는 이상적인 경우를 생각해 보자. DC 모터나 MR 브레이크 모두 출력한계를 가지므로 앞서 말한 이상적인 가상 벽을 재현하는 것은 불가능하다. 이런 이유로 PO가 수동적일 때, 동시에 DC 모터와 MR 브레이크를 함께 사용하는 것이 더욱 바람직하다. 그러나 DC 모터는 큰 강성 제

어 이득에서 시스템을 불안정하게 만들기 때문에 수동성을 깨뜨리지 않도록 DC 모터를 제어하는 것이 필요하다. 이를 위해 수동성을 언제나 보장하면서 제어 상태가 바뀌는 순간마다 DC 모터와 MR 브레이크의 협력 제어(Collaboration Control, CC)를 제안하며, 그림 7에 이해를 돕고자 CC에 대한 개념을 도식적으로 표현한다.

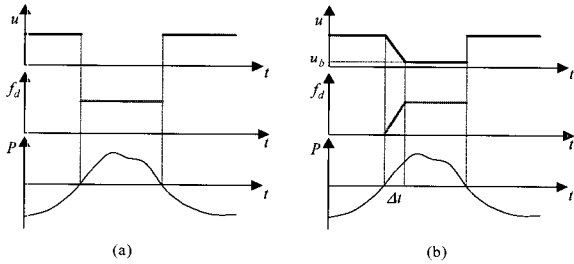


그림 7 DC 모터와 MR 브레이크의 협력제어 개념도
Fig. 7 The concept of collaboration control by DC motor and MR brake

그림 7(a)는 PO에 의한 제어기법으로 DC 모터의 제어 출력(u)과 MR 브레이크의 제어 출력(f_d)이 일률(P)의 상태에 따라 서로 스위칭하고 있음을 나타낸다. 일률이 음에서 양으로 변하는 순간에 DC 모터의 제어를 끊게 되면, 이산 제어 구조의 특성인 단위 지연과 계산 지연 등의 영향으로 수치적으로는 일률이 "0"이나 실질적으로는 여전히 음인 값으로 수동성을 확보하지 못한 상태가 된다. 이 때 수동성을 보장하기 위한 방법은 PO가 "0"에 가까운 음의 값을 가진 상태에서 MR 브레이크의 제어를 시작하는 방법과 PO가 "0"인 순간부터 확실히 수동성을 보장할 때 까지 DC 모터의 제어 출력의 크기를 서서히 줄이고 이에 상응하여 동시에 MR 브레이크의 제어 출력의 크기를 증가시키는 방법이 있다. 그러나 전자의 방법은 PO의 변동이 급격한 경우에는 미래의 일률의 값을 예측하기 힘들기 때문에 제어 범칙을 정하는 데 큰 어려움이 있다. 반면에 후자의 방법은 과거의 값들만을 이용하기 때문에 인과적(causal)이며 DC 모터와 MR 브레이크의 출력한계를 최대한 활용할 수 있는 장점이 있다. 그림 7(b)에 후자의 방법을 나타낸다. PO가 양에서 음으로 변할 때 역시 제어 출력의 급격한 변동이 예상되므로 DC 모터의 제어 출력을 수동성을 깨뜨리지 않는 최소의 크기로 계속해서 유지하여 DC 모터의 제어 출력의 연속성을 보장해 주는 것이 필요하다. 이를 다리처럼 연결한다는 의미로 교량 제어 출력(u_b)으로 정의한다.

제안한 CC 방법은 수학적으로 식 (9)로 표현되며

이를 설명하면 다음과 같다. 즉, 일률이 양의 값을 가지면 DC 모터의 제어 출력(u)을 교량 제어 출력(u_b)이 될 때 까지 점차적으로 줄이고 동시에 MR 브레이크의 제어 출력(f_d)을 서서히 증가시킨다. 만일 DC 모터의 제어출력(u)이 그의 출력한계에 다다르면, 가상환경이 요구하는 힘에 대하여 DC 모터의 출력한계를 제외한 나머지의 힘을 MR 브레이크가 보전하도록 제어 출력(f_d)을 만들어 낸다.

$$f_e^*(-v_e^*) \geq 0 \Rightarrow \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} u \\ f_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aH(z)x(z)ZOH \\ (1-a)|H(z)x(z)ZOH \operatorname{sgn}(v) \end{bmatrix},$$

where $a \geq 0, \beta > 0, \gamma > 0,$

$$u_b = \gamma H(z)x(z)ZOH,$$

and $\alpha: 1 \xrightarrow{T} (1-\beta)$ if $a \geq \gamma,$

otherwise $\alpha = \gamma$

$$f_e^*(-v_e^*) < 0 \Rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} u \\ f_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(z)x(z)ZOH \\ 0 \end{bmatrix}$$

매개변수 α 는 수동성을 보장하기 위한 DC 모터의 비용으로 PO가 양인 순간부터 매 샘플링 순간마다 상수 β 만큼씩 감소하여 교량제어출력(u_b)에 해당하는 상수 γ 이하로는 떨어지지 않는다. 즉 DC 모터의 제어 출력(u)은 PO가 양인 구간에서 교량제어출력(u_b)으로 수렴한다. 또한 상수 β 는 수동성을 보장하기 위한 MR 브레이크의 기여이다.

제안된 제어 기법은 시스템의 모델 정보를 전혀 필요로 하지 않아 햅틱 인터페이스뿐만 아니라, 힘 제어가 필요한 일반적인 로봇 시스템 등에 적용이 가능하며 같은 이유로 실시간 계산에 따른 부하가 굉장히 작다는 장점이 있다.

4. 하이브리드 구동기를 갖는 2자유도 로봇의 힘 제어

제안된 제어 기법의 타당성을 검증하기 위하여 그림 8과 9에 보인 DC 모터와 MR 브레이크를 갖는 2자유도 햅틱 디바이스를 이용한 실험을 수행하였다. 실험에 쓰인 2자유도 햅틱 디바이스는 두 개의 DC 모터(maxon사 제품)와 두 개의 MR 브레이크(Lord사 제품)가 5절 링크 메커니즘에 결합된 형태이다. 모터에는 1회전에 4,000펄스를 검출할 수 있는 엔코더가 부착되어 1개의 DC 모터와 1개의 MR 브레이크로 이루어진

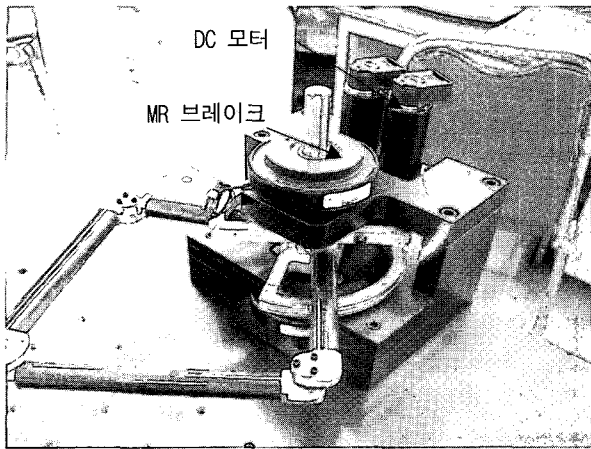


그림 8 DC모터와 MR브레이크를 갖는 2자유도 햅틱 디바이스
Fig. 8 A 2-DOF haptic device comprising of DC motors and MR brakes

하이브리드 구동기 축의 각도를 측정한다. DC 모터와 MR 브레이크는 10:1의 기어 비를 갖는 케이블 트랜스미션(cable transmission)에 의해 병렬로 연결되어 DC 모터와 MR 브레이크의 출력의 합 토크를 내도록 설계되어있다. 전체 로봇의 관성을 줄이기 위해 탄소섬유로 가공된 중공형 파이프를 로봇의 링크(뼈대)로 사용하였다. 엔코더와 드라이버는 PC와 DAC 보드에 연결되어 있으며 실시간운영체제인 QNX 4.2를 플랫폼으로 사용하고 제어 주기를 1kHz로 하였다.

햅틱 디바이스의 마찰 보상을 수행한 후에 제안한 제어 기법의 유용성을 실험하였다. 그림 4에 보인 1자유도 햅틱 디바이스에 대하여 제안한 제어 기법을 적용하고, 그림 8의 2자유도 햅틱 디바이스에 대하여 제안한 제어 기법을 적용하였다.

일반적으로 로봇은 여러 개의 모터를 장착한 일종의 서보 시스템이라 할 수 있다. 서보시스템에서는 급격한 부하의 변동이나 속도의 변화로 인해 관성계수가 가변되는 현상이 발생하며 이러한 관성계수의 변화는 서보 시스템을 불안정하게 만드는 요소로 알려져 있다^[15].

peg-in-hole과 같이 로봇이 한 개의 부품을 이에 대응하는 부품에 조립하는 경우 부품들이 서로 접촉하는 순간에 로봇의 관성계수의 급격한 변화로 인한 동역학적 특성이 접촉하지 않은 경우에 대하여 크게 달라지게 되어 시스템의 안정성을 악화시키는 현상을 초래하는 것은 널리 알려진 사실이다^[4]. 특히 이들 부품들이 서로 강성이 큰 경우에는 접촉 불안정성이 반드시 나타나게 되며 이를 해결하기 위한 방법들로 로봇 그리퍼를 강성이 작은(compliant) 구조로 만드는 방법들이

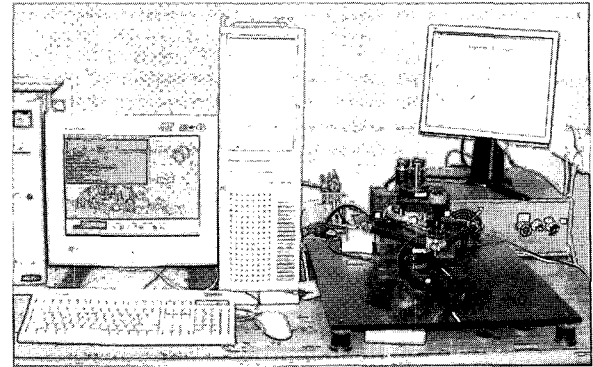
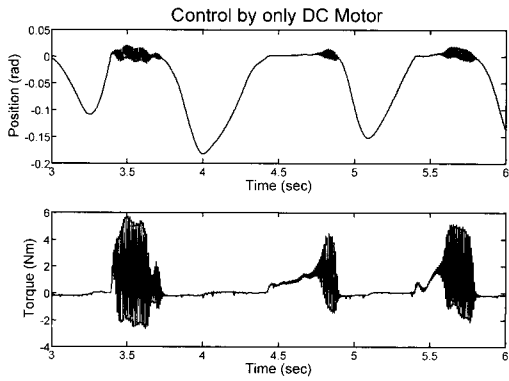


그림 9 DC 모터와 MR 브레이크를 갖는 2자유도 햅틱 인터페이스
Fig. 9 A 2-DOF haptic interface comprising of DC motors and MR brakes

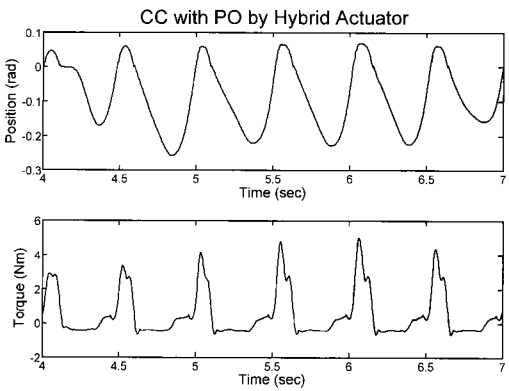
제안되기도 한다^[16]. 또한 강성이 큰 차체 표면을 정해진 마이크로 두께로 가공하는 연삭 로봇의 경우에도 연삭기를 장착한 로봇의 그리퍼와 표면이 접촉하는 순간에 진동 등과 같은 제어 불안정성이 나타나고 또한 표면을 따라서 연삭하는 경우에도 진동 등이 나타나게 된다^[4]. 따라서 일반적으로 로봇의 힘 제어에서는 강성이 큰 벽에 대한 접촉 안정성과 접촉 후의 벽면을 따라서 이동할 때의 안정성을 이의 유용성을 평가하는 큰 잣대로 사용하고 있다. 이와 마찬가지로 햅틱 인터페이스의 제어의 유용성을 입증하기 위해 강성이 큰 가상벽에 대한 실험이 많이 이루어지고 있다.

하이브리드 구동기를 갖는 1자유도 햅틱 디바이스에 대해 제안한 제어기법을 적용하여 가상 벽 구현을 실험한 결과를 그림 10에 나타낸다. 능동형 구동기인 DC 모터만으로 0 rad에 위치한 가상 벽을 구현하고자 하는 경우, 물체가 없는 자유공간에서 자유롭게 움직이던 1자유도 로봇 핸들을 잡고 있는 사용자가 가상 벽에 접촉하는 순간에 접촉 불안정성으로써 큰 진동(oscillation)을 경험하게 된다(그림 10(a)). 이와는 반대로 DC 모터와 MR 브레이크로 이루어진 하이브리드 구동기에 제안한 힘력제어(CC)기법을 사용하여 1자유도 로봇으로 사용자가 가상 벽을 안정되게 성공적으로 구현함을 알 수 있다(그림 10(b)). 또한 제안한 제어기가 PO의 상태에 따라 제대로 작동하고 있음을 그림 11에 나타낸다.

제안한 제어기법의 다자유도 확장성과 범용성을 입증하기 위해 하이브리드 구동기를 갖는 2자유도 햅틱 인터페이스에 대하여 실험을 수행한 결과를 그림 12, 13과 14에 보인다. 그림 12의 세로로 일직선으로 놓인 가상 벽의 위치는 $x = 0$ 에 있다. 그림 13은 2자유도



(a)



(b)

그림 10 1자유도 햅틱 인터페이스의 실험 결과: 협력제어와 DC 모터 제어의 비교
 Fig. 10 Experimental results for 1 DOF haptic interface : comparison of CC with PO and control by DC motor only

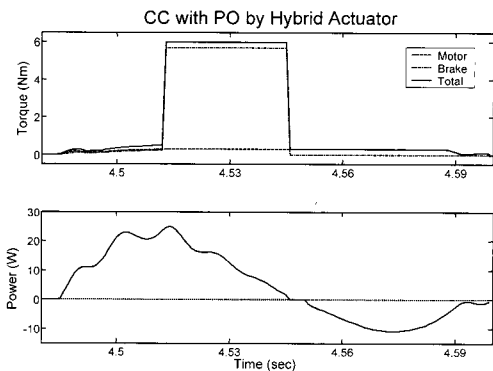
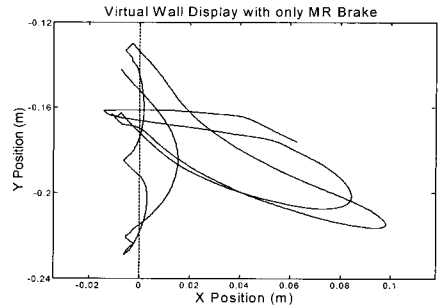
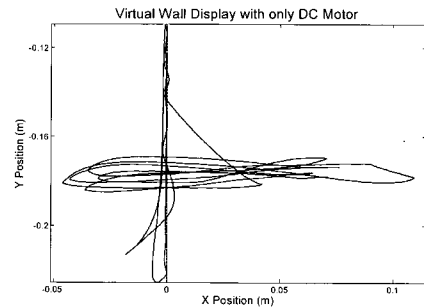


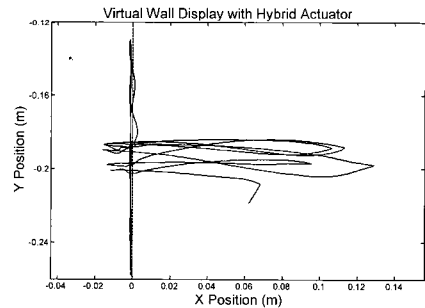
그림 11 1자유도 햅틱 인터페이스의 실험 결과: 협력제어 시의 일률 관측기(PO)의 동작과 각 구동기들의 출력 토크
 Fig. 11 Experimental results for 1 DOF haptic interface : CC with PO



(a)



(b)



(c)

그림 12 2 자유도 햅틱 인터페이스의 실험 결과
 Fig. 12 Experimental results for 2 DOF haptic interface

햅틱 디바이스의 두 개의 관절(joint) 중 하나의 경우에 대해 하이브리드 구동기의 협력제어가 어떻게 이루어지고 있는지를 보여준다.

그림 14는 원형으로 놓인 가상 벽을 구현하는 실험이다. 그림 12(a)와 그림 14(a)를 살펴보면, MR 브레이크만으로는 2자유도의 가상 환경을 구현할 수 없음을 알 수 있다. 이때 사용자는 가상 벽 속에 박힌 느낌을 갖게 된다. 그림 12(b)와 그림 14(b)에서와 같이 DC 모터만을 이용해 가상 벽을 구현하는 경우, 사용자는 DC 모터의 출력한계로 인해 강성이 큰 가상 벽을 느끼지 못하고 가상 벽을 쉽게 통과하여 마치 스프링을 접촉하는 느낌을 갖게 된다. 만일 출력한계를

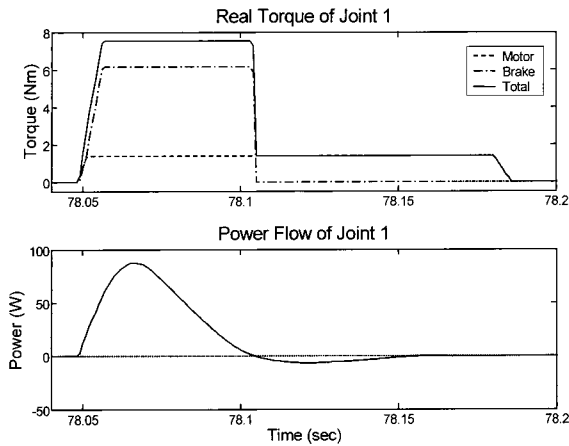


그림 13 2 자유도 햅틱 인터페이스의 실험 결과: 협력제어
Fig. 13 Experimental results for 2 DOF haptic interface: CC with PO

고려하지 않고 DC 모터의 순간 최대 출력을 내도록 하는 경우에는 그림 10(a)에서와 같이 극심한 진동을 경험하게 된다. 그림 12(c)와 그림 14(c)의 결과는 하이브리드 구동기의 협력제어(CC)를 2자유도 햅틱 인터페이스에 적용한 것으로 강성이 큰 가상 벽을 성공적으로 구현하는 것을 볼 수 있다. 특히 그림 14(c)를 그림 14(b)와 함께 비교해 보면 사용자의 손잡이(handle)에서 측정된 힘이 하이브리드 구동기의 협력제어를 수행한 결과가 그렇지 않은 경우에 비해 훨씬 큰 상태에서 가상 벽을 잘 구현하고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론

DC 모터와 MR 브레이크로 이루어진 하이브리드 구동기의 힘 제어 기법을 네트워크 이론의 수동성을 이용하여 제안하였다. 제안한 방법은 순간 수동성을 일률의 관점에서 정의하고 이를 제어하는 모든 시간 영역에 대하여 만족하도록 DC 모터와 MR 브레이크를 협력 제어하는 것이다. 제안한 방법의 효용성을 입증하기 위해 1자유도 및 2자유도 햅틱 인터페이스에 대하여 실험을 수행하였다. 실험 결과로부터 하이브리드 구동기가 제어 안정성과 투명성을 동시에 높일 수 있음을 확인 하였다. 제안한 방법은 시스템의 모델 정보를 전혀 필요로 하지 않아 실시간제어에 유리하므로 햅틱 인터페이스뿐만 아니라 원격 조종 로봇, 조립 로봇, 가공 로봇 등 힘 제어가 필요한 다양한 영역에 적용이 가능할 것으로 예상된다.

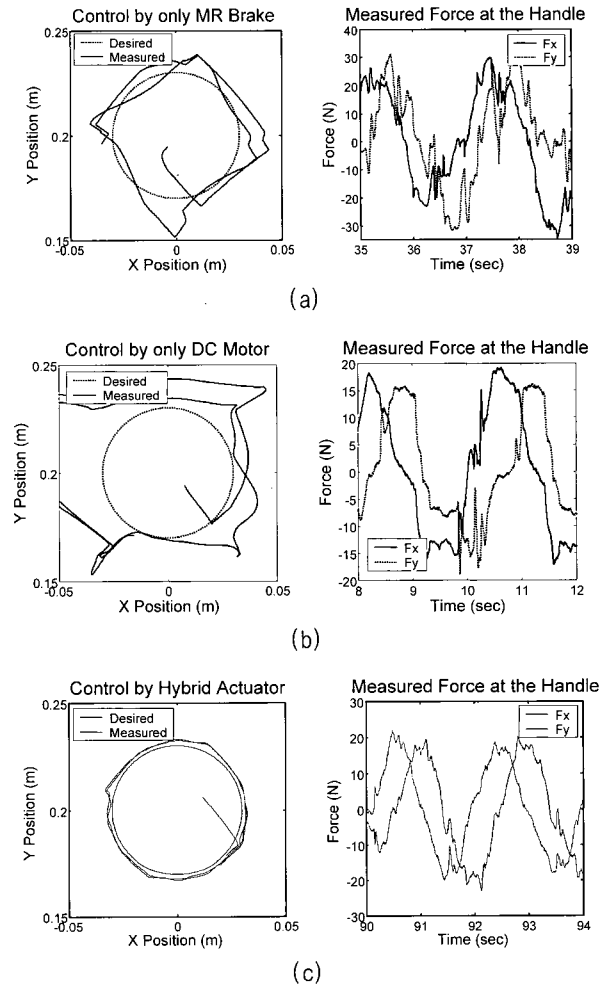


그림 14 2 자유도 햅틱 인터페이스의 실험 결과: 원형 가상벽 구현
Fig. 14 Experimental results for 2 DOF haptic interface: circular wall following

본 연구는 2005년 광운대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] 강원찬, 김동욱, 신석두, 김영동, “3자유도 힘 반향 역감 장치” 전력전자학회논문지, 제4권5호, pp.455-461, 1999.
- [2] 김대현, 김영동, “가상환경을 이용한 힘반영 원격조작 시스템에 관한 연구” 전력전자학회논문지, 제5권1호, pp.63-71, 2000.
- [3] H. Kazerooni, A Robust Design Method for Impedance Control of Constrained Dynamic Systems, Ph.D. thesis,

- M.I.T. Department of Mechanical Engineering, February 1985.
- [4] D. Whitney, "Historical perspective and state of the art in robot force control," Proc. of 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 262-268, Mar 1985.
- [5] N. Hogan, "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I-Theory," ASME on Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control, 107:1-7, March 1985c.
- [6] D. A. Lawrence, "Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 9, pp. 624-637, 1993.
- [7] J. H. Ryu, D. S. Kwon, and B. Hannaford, "Stable Teleoperation with Time Domain Passivity Control," Proceedings of IEEE International Conf. on Robotics and Automation, Washington DC, pp. 3260-3265, 2002.
- [8] J. E. Colgate and G. G. Schenkel, "Passivity of a Class of Sampled-Data Systems: Application to Haptic Interfaces," Proceedings of American Control Conference, Baltimore, MA, pp. 3236-3240, 1994.
- [9] R. J. Adams and B. Hannaford, "Stable Haptic Interaction with Virtual Environments," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 15, no. 3, pp. 465-474, 1999.
- [10] J. E. Colgate and J. M. Brown, "Factors Affecting the Z-Width of a Haptic Display," Proceedings of IEEE International Conf. on Robotics and Automation, San Diego, CA, Vol. 4, pp. 3205-3210, 1994.
- [11] J. An and D. Kwon, "Haptic Experimentation on a Hybrid Active/Passive Force Feedback Device," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, May, 2002, pp. 4217-4222.
- [12] J. An and D. Kwon, "In Haptics, the Influence of the Controllable Physical Damping on Stability and Performance," Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, September, 2004, pp. 1204-1209.
- [13] J. An and D. Kwon, "Modeling of a Magnetorheological Actuator including Magnetic Hysteresis," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 14, No. 9, pp. 541-550, September 2003.
- [14] J. E. Colgate and N. Hogan, "Robust Control of Dynamically Interacting Systems," International Journal of Control, Vol. 48, No. 1, pp. 65-88, 1988.
- [15] 이교범, 송중호, 최익, 유지윤, "확장 루엔버거 관측기를 이용한 전동기의 저속 성능 향상", 전력전자학회 논문지, 제9권3호, pp. 231-239, 2004.
- [16] S.-R. Oh, R.L. Hollis, and S.E. Salcudean, "Precision assembly with a magnetically levitated wrist," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, May, 1993, Vol. 1, pp. 127-134.

저 자 소 개



안진웅(安眞雄)

1966년 9월 27일생. 1993년 성균관대 공대 기계설계학과 졸업. 1997년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 2005년 한국과학기술원(공박). 2000년 독일항공우주연구소 방문연구원. 2005년~현재 광운대 정보제어공학과 전임강사.



최익(崔翼)

1956년 6월 5일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1982~2003년 한국과학기술연구원 책임연구원. 2003년~현재 광운대 정보제어공학과 교수. 당 학회 기획이사.



권동수(權東洙)

1957년 8월 26일생. 1980년 서울대 공대 기계공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 1991년 Georgia Tech.(공박). 1991~1995년 Oak Ridge National Laboratory(미국) 연구원. 1995년~현재 한국과학기술원 기계공학과 교수.