

# 가상 슬레이브 정동역학 보정에 기반한 원격제어 시스템 개발

## Development of Teleoperation System with a Forward Dynamics Compensation Method for a Virtual Robot

양정연  
목원대학교 지능로봇공학과

Jeong-Yean Yang(jyyang@mail.mokwon.ac.kr)

### 요약

원격제어는 명령을 전달하는 마스터 장치와 원격지에 위치한 로봇을 슬레이브로 간주하는 방식이다. 이러한 원격제어의 경우, 양 에이전트 간의 동특성, 전송속도 차이에 의해 가상환경을 이용한 가상 슬레이브를 통해 조작자가 원격제어의 특수성을 선행 수행하는 것이 일반적이다. 기존의 가상 슬레이브는 연산량의 한계에 의해 동역학적 효과를 제거한 그래픽 모델로 구성하는 것이 일반적이나 이는 원격지 로봇의 동특성이 무시되어 실제 원격제어시의 실제감을 살리기 어렵다. 본 논문에서는 로봇의 정동역학 모델을 이용하여 이를 원격제어에 활용하고, 가상 환경에서 상대적으로 느린 제어 주기에 의해 발생하는 정동역학의 수치 오류를 보완하는 보상 기법을 제안하고 이를 실제 환경과의 원격제어와 비교하고자 한다.

■ 중심어 : | 가상슬레이브 | 원격제어 | 정동역학 | 패시브제어 |

### Abstract

Teleoperation is defined with a master device that gives control command and a slave robot in a remote site. In this field, it is common that a human operator executes and experiences teleoperation with a virtual slave, and preliminary learns dynamic characteristic and network environment from both agents. Generally, a virtual slave has neglected forward dynamics and its kinematic model has been implemented in computer graphics. This makes a operator to experience actual feelings. This paper proposes a dynamic teleoperation model in which a robotic forward model is applied. Also, a novel compensation method is proposed to reduce the numerical error problems in forward dynamics caused by low control sampling rate. Finally, its results will be compared to the teleoperation in an actual environment.

■ keyword : | Virtual Slave | Tele-Operation | Foward Dynamics Method | Passive Control |

## I. 서론

원격 제어는, 사용자의 조작을 처리하는 마스터 장치와 원격지의 슬레이브 장치인 로봇으로 구성되어 있다. 이러한 원격제어는 사람에게 유해한 위험 환경, 수술시 인체의 복강과 같은 협소한 공간, 사람의 접근이 불가

한 우주, 해저, 재난 지역 등에 적용되어 왔다.

이러한 원격제어는, 사용자가 명령을 전송하여 원격지 로봇을 단순 구동하는 방식을 벗어나, 원격지에서 측정된 힘과 같은 물리적 값을 피드백하여, 마스터 장치에서 원격 로봇의 힘을 재현하는 것이 일반적이다.

물리적 환경의 재현을 위해, 위치 및 힘으로 구성된

접수일자 : 2018년 06월 04일

수정일자 : 2018년 06월 28일

심사완료일 : 2018년 06월 29일

교신저자 : 양정연, e-mail : jyyang@mail.mokwon.ac.kr

임피던스 제어가 보편적이며 이를 위한 4채널 구조가 개발되어 왔다. 이는 다시 주어진 구동기 및 센서 유형 또는 원격 제어의 사용 목적에 따라, 위치-위치, 위치-힘, 힘-위치, 힘-힘으로 구성된 4가지 유형으로 분류된다.

이러한 원격제어는, 원격지 및 사용자에게서 측정된 위치 및 힘의 관계를 이용하여 4채널의 제어 시스템을 구성하고, 이를 통해 원격지의 물리적 특성을 사용자가 느낄 수 있도록 재현하는 것이 주요 목적이다[1].

이 경우, 마스터 또는 슬레이브 장치간의 임피던스 차이에 의해 사용자는 실제 슬레이브 로봇과 동특성의 차이를 느낄 수 있다, 이러한 경향을 피하고 안정성을 확보하기 위한 다양한 방법론이 제시되어 왔다[2][3].

최근 원격제어가 적용된 수술 로봇환경이 보편화되어 이러한 원격제어의 성능 및 향상에 대한 관심이 증가하고 있다. 가장 많이 보급된 다빈치 시스템의 경우, 복강, 혈관 등, 미소한 움직임을 가지는 인체 내의 슬레이브 로봇과 원격지에 위치한 사람의 조작에 따른 움직임간의 차이가 존재하여 이를 훈련하기 위한 환경 또한 보급하고 있다[4].

이러한 환경의 경우, 원격지 로봇의 질량, 관성 모멘트 등의 동특성이 작아, 정동역학이 배제된 그래픽 모델로 가상 로봇을 구현하고 있다. 하지만, 앞서 언급된 4채널 구조의 경우, 마스터-슬레이브 각 장치의 제어 파라미터, 특히 댐핑량의 조절에 따라 사용자가 마스터 장치를 통한 다른 유형의 동특성을 느낄 수 있어 힘 반향이 가능한 마스터 장치의 경우, 동특성을 가상으로 재현하는 것이 필요하다. 이와 달리, 원격지 로봇의 동특성이 큰 보행 로봇, 로봇 팔의 경우, 제어 파라미터를 고려한 힘반향이 필수적이다.

이와 같은 원격제어의 특수성에 따라, 위치, 힘간의 관계를 임피던스로 완벽히 재현하기에는 한계성이 있다. 사용자가 이러한 제한된 원격제어 환경에 적응하기 위해, 가상 환경을 이용하여 원격제어시의 특수성을 습득하고, 가상 로봇을 이용한 시각적 피드백을 활용하는 것이 일반적이다.

이러한 가상 슬레이브의 가장 큰 어려움은, 실시간성을 갖는 정동역학 기법을 적용하여 가속도와 토크에 따

른 정교한 위치 변화를 재현하는 것이다. 로봇의 동역학 수식은 다음과 같다.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\dot{\theta}, \theta) + G(\theta) = T$$

$$\therefore \ddot{\theta} = M^{-1}(\theta)(T - V(\dot{\theta}, \theta) + G(\theta))$$

M은 관성모멘트, G는 중력, V는 전항력, T는 토크 입력을 의미한다. 이러한 동역학 수식을 통해 각가속도를 추출할 수 있으나 모의 환경의 위치 표기를 위해서는 가속도에 대한 두 번의 적분이 필요하다. 비선형 시스템의 적분을 위해 수치적분을 사용하고 있으며, 이의 오류 감소를 위한 다양한 해가 제시되었으나[5], 적분시의 지연 문제 및 연산량 증가의 단점이 있으며, 반복된 연산 수행시 안정성에 문제가 생긴다.

이와 달리, 에너지 관점에서 제안된 방법론의 경우 [6], Galekin 방법론을 사용하여 투입된 에너지의 전체량을 감소시킴에 따른 정동역학 해의 안정성 문제를 해결하였다. 이러한 방법은 연산량의 증가로 인해 최근에는 강체 모델링을 피하고 위치, 힘 간의 임피던스에 기반한 정동역학 기법[7]이 많이 쓰인다. 이러한 물리엔진 기반의 방법은 정동역학 재현에 보편적이나, 원격제어의 가상 슬레이브에 적용시 연산량, 에너지 보존에 의한 제어기 구성의 어려움 등의 많은 문제점을 가지게 된다.

본 논문에서는, 이러한 원격제어 환경에서의 가상 슬레이브를 구현하고, PD(Proportional and Derivative)제어시 발생하는 수치 오류의 문제점을 해결하기 위해 수치미분의 오류에 의한 과도한 에너지를 제거하는 패시브 시스템 기반 보정 기법을 소개하고 이를 실 환경과 비교하여 성능 개선점을 언급하고자 한다.

## II. 원격 제어 환경

본 논문에서는 원격제어를 위해, [그림 1]과 같은 실제의 3 자유도 로봇 시스템 및 가상의 3 자유도 로봇을 구현하였다. 해당 로봇은, 3차원 공간에의 적용을 위해 PUMA 타입 로봇으로 기구적 관계를 설계하였고, 가상

로봇 또한 동일한 기구적 파라미터로 구성되었다.

로봇의 공간상 명령 처리를 위한 마스터 장치로는, 휴머노이드 로봇에 활용되는 전자기 유도 방식에 의한 Razer Hydra 장치[8]를 활용하여 3차원 공간상의 높은 정밀도 및 정확도를 달성하였다. 장치에서 추출된 공간의 위치 정보는 역기구학을 통해 슬레이브 로봇의 관절 제어에 활용된다.

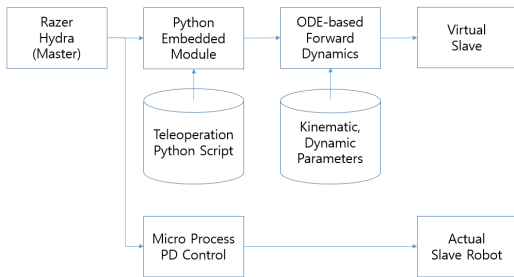
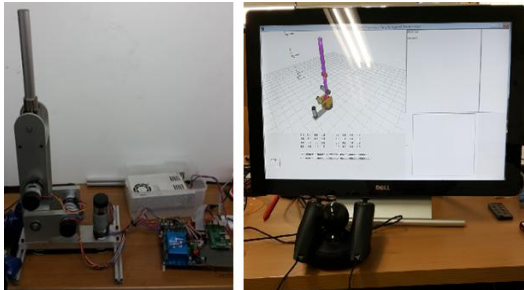


그림 1. 3자유도 PUMA타입의 실제 로봇 및 가상 로봇 슬레이브로 구성된 원격 제어 시스템. 실환경 슬레이브 로봇 및 제어 보드(좌), 3차원 공간입력 마스터 장치 및 가상 정동역학 슬레이브(우), 원격 제어 시스템의 모듈별 구성도(하)

슬레이브 로봇의 경우, 3개의 DC 모터로 구성되어 있으며, 역 구동을 위해 104:1의 낮은 기어비를 가지고 있어 PD 제어기의 D제어의 영향력이 두드러지게 설계되었다. 각 관절은 STM32 보드를 활용하여 2000Hz의 제어주기를 가지고 있으며, UDP 네트워크를 통해 초당 1000개의 명령 처리가 가능하다. 각 관절의 길이 및 오프셋은 110, 250, 250mm이다.

이러한 실제 슬레이브 로봇의 거동을 유사 표현하기 위해 가상 환경기반의 그래픽스 모델 및 정동역학 기법으로는 Open Dynamics Engine, (ODE)[7]을 사용하고

자 한다. 해당 방식은 임피던스를 이용하여 기존의 강체 기반 방식이 갖는 수치 적분 문제점을 일부 보완하고, 충격량 전파에 용이한 장점이 있다.

### III. 가상슬레이브의 정동역학 보정

#### 1. 정동역학 모의 실험의 문제점

사용되는 ODE 기반의 정동역학 기법은 에너지 보존에 기반하고 있어, 가상 환경 내의 PD 제어시 문제점을 내포하고 있다. 1차원 동적 모델을 통해 이를 나타내면 다음과 같다.

$$I\ddot{\theta} = T = K_p e + K_d \dot{e} \quad (1)$$

$$e = \theta_d - \theta$$

$$\therefore I\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e = 0$$

I는 관성모멘트, T는 토크, e는 오차값, Kp, Kd는 P, D제어 게인 값이다. 실환경과 달리 정동역학 모델은 운동 및 위치 에너지 간의 전환시 에너지 손실이 없어 관성의 법칙에 의해 영구운동을 하게된다. 따라서, 식 (1)과 같이, 오차동역학은 사용자가 추가한 D제어만을 통해 수렴하는 특수성을 갖는다.

이러한 성격은, 이산제어를 사용하는 실환경 제어시에도 유사한 패턴을 보여, 제어 주기를 짧게 유지할수록 D제어의 성능이 향상되며 안정성이 우수해지는 경향과 일치한다. 따라서, 고속, 정밀 제어가 필요한 경우는 2000Hz이상의 제어주기를 통해 D제어 성능을 향상시키는 것이 일반적이다.

가상 슬레이브에 그래픽스 기반의 동역학을 제거한 기구학만을 적용하는 경우, 최근 200Hz의 수행이 가능하나, 정동역학을 사용하는 경우 100Hz 이상의 연산시 실시간성이 깨져 다소 느리게 동작하기에 원격 제어에 적합하지 않다.

사용자 명령에 대한 빠른 응답을 요구하는 원격제어의 특성상 높은 게인 값을 사용하여 시스템 동역학의 속도를 높이는 것이 일반적이나, 이는 [그림 2]와 같은 공진현상을 유발한다. 실시간성을 위해 100Hz의 실환

경 제어기 보다 낮은 제어 주기를 사용하는 경우, D제어의 수치 미분 오류가 느린 제어주기를 갖는 정동역학의 수치 적분 오류와 함께 공진하는 현상이 발생한다.

이처럼 100Hz의 느린 제어주기로 인한, 모의 환경내의 시스템 동역학과 D제어기와의 공진에 의해 댐핑 효과가 사라져 안정성에 영향을 주게 된다. 이는 수치적분을 사용하는 모의 환경 내에서 자주 일어나는 현상으로 이산제어의 제어주기가 길어질수록 안정성 영역이 좁아지는 것과 일치한다.

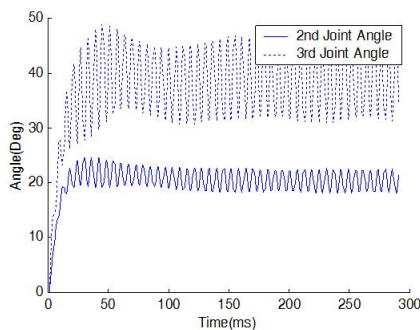


그림 2. 100Hz PD 제어시 가상 슬레이브 공진현상

이러한 수치적분 기반의 정동역학의 제어주기에 따른 문제점은 빠른 응답 및 실시간성을 요구하는 원격제어에 정동역학 모의환경을 구축하기 어려움 요인이다. 대안으로 연산 장치의 고속화를 통해 실시간성을 확보하고 짧은 제어주기를 사용할 수 있으나 연산한계, 비용 등의 현실적 제한이 있다.

본 논문에서는, 앞서 표기된 정동역학 물리엔진하의 제어가 갖는 오차동역학의 성격에 기반하여, 100Hz의 낮은 제어주기로 댐핑 조절이 용이한 보정기법을 제안하고자 한다.

## 2. 패시브 시스템 기반의 보상 기법

[그림 2]와 같은 진동 현상의 경우, 실 환경에서는 주파수 변화를 통해 수정가능하나, 시스템 동역학의 속도 변화가 용이하지 않은 가상환경에서는 패시브 시스템을 이용한 필터링 기법을 제안하고자 한다.

패시브 시스템은 시간에 따른 시스템 내의 에너지 총량의 변화가 감소하는 형태로, Lyapunov 함수기반의

안정성에 기인한다.

스칼라 함수인 Lyapunov 함수,  $L$ 이 양이고, 그 변화량이 음수이면 시스템내의 에너지는 시간변화에 대해 감소하기에 안정성을 보장할 수 있으며, 이러한 시스템을 패시브 시스템으로 정의한다. 식 (1)과 같이 제어에 의한 추가적인 댐핑항이 존재하지 않는 경우,  $L$ 의 미분값은 0으로 여유안정도를 유지한다.

이러한 패시브 시스템의 성격을 토대로, 제어기 구성시 투입되는 에너지 변화량을 감소시킴으로써 시스템의 안정성을 유지할 수 있다. [그림 2]의 경우, 수치적분에 의한 가상 시스템의 최대 속도에 제어기 주파수가 유사해짐에 따라, 가상 환경 내 시스템의 급격한 동적 변화가 다시 D제어상의 속도 변화에 연결되며, 에너지 감소가 원활하지 못하며 진동하는 현상을 보인다.

가상 슬레이브에서의 D 제어시 댐핑에 의해 투입되는 단위 시간당 에너지는 다음 P로 표현가능하다.

$$P = F_d v = F_d \dot{e} = K_d \dot{e}^2 \quad (2)$$

시간에 대한 에너지 변화량인 일률(Power), P는 댐핑에 의한 마찰력과 속도인 오차변화량의 곱으로 정의된다. 진동현상 발생 시의 P는 [그림 3]과 같다. 높은 D 계인에 의한 높은 댐핑효과가 오히려 증가, 감소를 반복하는 것으로, 시간이 지날수록 매우 느리게 감소하거나 또는 발산하는 등, 전체 제어 성능을 저하시키는 주요 인자이다.

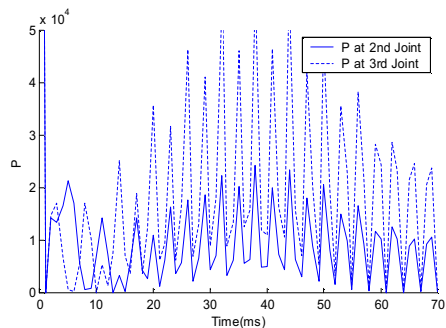


그림 3. 100Hz PD 제어시 댐핑의 일률, P

이와 같이, 수치 오류에 의한 불필요한 에너지가 투

입되어 진동을 유발하는 현상을 막고, 빠른 제어 성능을 얻기 위해서, 패시브 시스템의 Lyapunov 함수 개념을 사용하였다. 공진에 의한 댐핑의 과도한 투입을 막기 위해 다음과 같은 보정효과를 설계하였다.

$$T = K_p e + K_d \dot{e} = T_p + T_d \quad (3)$$

$$\begin{cases} T_d = K_d \dot{e} & P_{k+1} < P_k \\ T_d = (1 - \lambda) K_d \dot{e} + \lambda P_k \dot{e} & P_{k+1} \geq P_k \end{cases}$$

가상 슬레이브 로봇에 투입되는 제어기의 출력 토크는 PD 제어에 의해 P와 D로 분리한다. 식(1)에 의해 댐핑이 없는 가상 슬레이브 로봇의 경우, P 제어는 에너지 보존에 의해 투입된 에너지가 보존되어 여유 안정성을 가진다.

이와 달리, 식(1)의 D 제어는 댐핑을 통해 가상 슬레이브 로봇의 수렴성을 좌우한다. [그림 3]의 공진에 의한 불필요한 에너지의 제거를 위해, 식(3)은 시간 변화에 따라 감소 추세를 갖는 이산 Lyapunov 함수 형태를 갖는다.

식 (3)은, 에너지가 감소하는 경우는 일반적인 PD 제어기와 동일하나, 에너지가 불필요하게 증가하는 경우는 기존 P 보다 크지 않도록 보정한다.  $\lambda$ 가 1인 경우, 댐핑을 위해 투입된 기존 에너지와 동일한 값을 유지하여 여유 안정도를 유지하며,  $\lambda$ 가 0인 경우는 기존 D 제어와 동일하다. 이처럼 댐핑에 의해 과도한 에너지가 유입을 보정하여 공진에 의한 댐핑과 수치오류에 의한 불안정성을 회피하고자 한다.

제안된 보상기는 D 제어만을 고려할 경우, 완전한 패시브 시스템으로 보기에는 어렵다. 파라미터  $\lambda$ 에 의해 D 제어와 전 스텝의 P 값의 합이 결정되기에, 댐핑 효과가 완전한 감소형태를 갖지는 못한다. 하지만, P제어와 결합된 D제어기의 보상기법은, 파라미터  $\lambda$ 의 조절에 의해 에너지 감소에 의한 패시브 시스템을 유지할 수 있다.

패시브 시스템 기반 보정 방식의 결과를 [그림 4]에 명시하였다. [그림 2]의 과도한 댐핑에 의한 위치 제어 결과와 비교 시, 동일한 게인 값을 적용함에도 진동이 제거되며, 오버슈트가 작고 정상상태 구간에 진입 시에

도 댐핑이 효과적임을 알 수 있다. [그림 3]의 진동시 P 값과 비교하면 보상된 P 값이 10배 이상 감소하였으며, 이에 따라 진동 감소가 빠르게 진행되어 제안된 보상기법이 효과적임을 알 수 있다.

또한, 짧은 제어주기를 갖는 200Hz의 위치제어 결과와 비교해보면, 100Hz기반의 보상 기법이 동일 게인 값을 가지고 매우 유사함을 알 수 있다. 200Hz의 모의환경의 경우, 느린 재현 속도에 의해 사용자가 무거운 느낌을 갖는 시스템 동역학의 재현한계가 있기에, 제안된 방법은 100Hz의 빠른 모의실험 결과를 가짐에도, 높은 게인 값을 쓸 수 있기에 원격제어를 위한 보상기법에 적절하다.

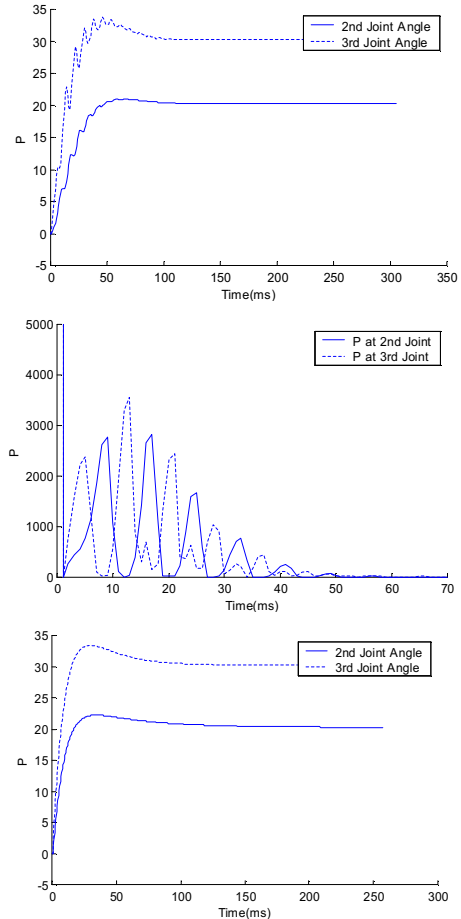


그림 4. 100Hz 패시브 보상기반의 위치제어(위), P값(중간), 및 200Hz 위치 제어 비교(아래)

이러한 패시브 시스템 기반 보정기법은, 수치 미분기반의 다른 방법론과 비교하였다. 다차원 다항식을 사용하는 뉴턴-그레고리(Newton-Gregory, N-G) 정방향 수치미분은, 제어시의 연속된 입력치를 토대로 현 스텝에서의 미분치를 보정 가능하여 제어기의 고정밀 보정에 자주 사용된다[9]. 이러한 N-G 수치미분을, [그림 5]와 같이 제안된 패시브 보정 기법과 비교하였다.

테스트 환경은, 2자유도 로봇 팔의 동역학 수식을 사용하였으며, D 제어시의 보정 성능을 확인하기 위해 D 계인 값이 다소 높은 상태로 100Hz 제어주기로 구성되었다. 앞서의 N-G방법론은, 충분한 양의 미분 보정치를 위해 10개의 상태량을 통해 현재의 오차 미분값을 추정하도록 하였다. 이에 따라 N-G보정은 9차 방정식을 통해 구현되며, 일반적인 D제어의 오일러 미분보다 정교한 결과값을 가진다.

[그림 5]의 결과를 보면, 초기에는 N-G보정 기법의 결과도 동일하게 진행되나, 작은 수치 미분 오차가 미분에 의해 증폭되는 현상을 볼 수 있다.

이러한 성향은, 일반적인 실환경 제어와 달리 수치적분에 의한 정동역학 모의환경에서 주요한 이슈라 할 수 있다. 수치미분 자체의 개선보다는 오히려 제안된 패시브 보정기법과 같은 불완전한 수치 미분 결과의 제거가 연속적인 동적 프로그래밍 환경에서 더 중요함을 알 수 있다.

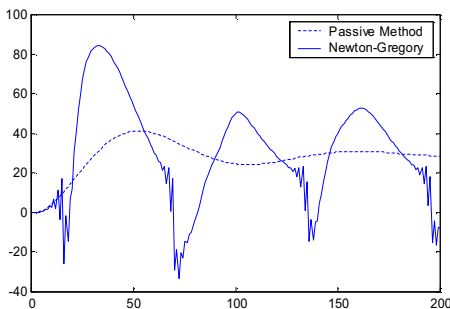


그림 5. 100Hz환경에서의 제안된 패시브 보정 기법과 뉴턴-그레고리 기반 수치 미분 보정기법과의 비교

#### IV. 원격 제어 실험 및 비교

원격제어 환경을 통해 제안된 방법의 테스트 및 실제 로봇과의 비교 실험을 수행하였다. 테스트를 위한 태스크의 경우, 사용자가 원격의 궤적을 임의로 그리고, 이를 실환경 슬레이브 로봇 및 가상 슬레이브 로봇에 각각 적용하여 움직임을 추출, 비교하고자 한다[10].

실제 로봇의 댐핑값을 조절하여 슬레이브의 움직임에 대해 조작자가 유사한 느낌을 가지도록 구성하였다. [그림 6]와 같은 환경에서, 사용자가 약 25cm 크기의 원형 평면을 따라 그리도록 하였으며, 사용자의 움직임에 따라 생성하는 궤적의 속도와 위치차이가 있다.

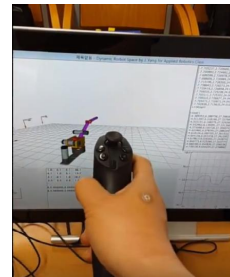


그림 6. 가상 슬레이브의 원격 제어

[그림 7]의 경우, 위, 중간 그래프는 사용자 움직임에 따라 가상 로봇에서 재현된 1, 2축 조인트의 궤적이다. 궤적이 동일성 보다는, 주로 슬레이브의 동적 효과를 볼 수 있는 변곡점 부분의 움직임, 즉 속도 변화가 큰 경우를 주목할 수 있다.

첫 번째 그림에서는 100Hz에서 제안한 보상기법을 적용하여, 두 번째 그림의 200Hz기반 PD 제어와 매우 유사한 동특성을 재현하였다. 두 번째 축의 경우, 사용자가 관절한계를 인지하지 못하여 약 (-)80도 근처에서 부드럽지 못한 곡선을 그렸으나, 가상 슬레이브상의 변화를 확인 뒤 관절한계 안쪽으로 곡선을 그리려 함을 알 수 있다.

세 번째 표의 경우, 가상로봇의 결과와 실환경 로봇과의 결과를 비교하고 있다. 실환경 로봇과 가상 로봇의 추종 및 동특성이 유사하나, 속도 변화가 급격한 변곡점 부위에서 다소의 차이를 볼 수 있다.

실제 로봇의 경우, 변곡점 부위에서 다소 완만한 커

브를 그리고 있어, 사용자가 입력한 마스터 장치의 정보를 로봇이 다소 부정확하게 추종하고 있음을 관찰할 수 있다. 이는 관절의 속도 부호가 변화할 시에 나타나는 데드존(Dead zone) 현상으로 예상된다. 향후, 실환경 로봇을 대체하기 위해서는, 가상 슬레이브에 이러한 데드존 모델의 추가가 필요할 것으로 보인다.

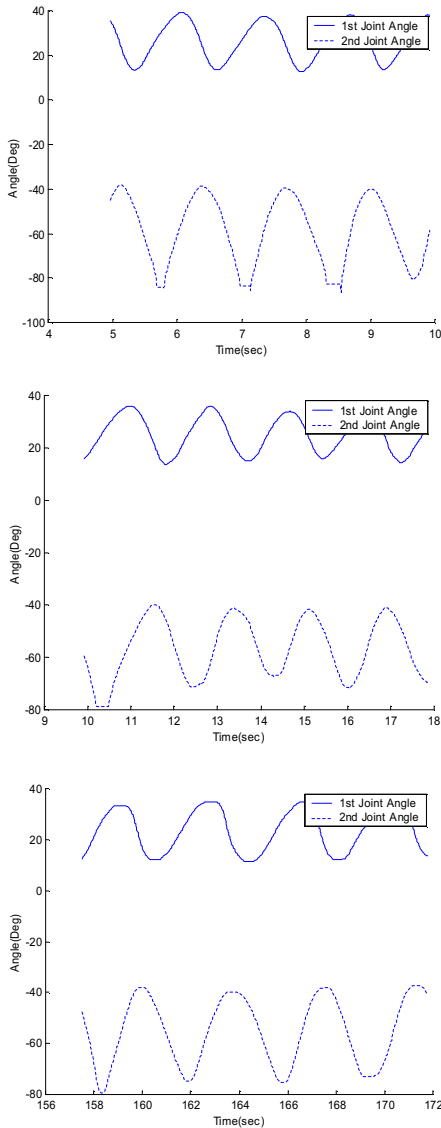


그림 7. 3자유도 가상 슬레이브의 1, 2 관절의 각도 추종결과. 보상기법 기반 100Hz 가상 로봇(위), 기존 PD 기반 200Hz 가상 로봇(중간), PD기법의 실환경 로봇(아래)

### V. 결론

본 논문에서는 원격제어에 사용되는 가상 슬레이브 로봇의 정동역학 보정기법을 제안하였다. 사용자 조작에 대한 빠른 응답이 필수적인 슬레이브 로봇의 경우, 가상화에 따른 시각적 피드백과 연산량과의 관계로 기존 그래픽 모델 기반 표현과 대비하여 고속화에 어려움이 있다.

정동역학해를 구하는 경우 발생하는 수치적분과 PD 제어에 사용되는 수치미분에서 발생하는 수치오류가 낮은 제어주기를 갖는 경우, 정동역학 해의 발산 및 안정성에 저하를 가져온다.

본 논문에서는 패시브 시스템의 에너지 감소 방식을 적용하여, 가상 슬레이브의 공진에 따른 불필요한 댐핑 효과를 제거하는 보상 기법을 제안하였다. 가상 환경내에 적용된 보상 기법은 100Hz의 일반적인 제어 주기 한계에서의 활용이 가능함을 확인하였고, 이를 이용한 가상 슬레이브 로봇과 실환경 슬레이브 로봇과의 관계를 통해 적용 및 확장 가능성을 확인하였다.

이러한 보상기법은, 낮은 제어 주기에서 동작 가능하므로 정동역학 기반의 가상 슬레이브 로봇의 활용성을 확장하고 다자간 접촉문제로의 적용으로 확장 가능할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

- [1] Y. Yokokohji and T. Yoshikawa, "Bilateral Control of Master-slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling-Formulation and Experiment," IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol.10, No.5, pp.605-620, 1994.
- [2] J. H. Ryu, D. S. Kwon, and B. Hannaford, "Stable Teleoperation with Time Domain Passivity Control," IEEE Trans. Robot. Autom., Vol.20, pp.365-373, 2004(4).
- [3] R. Muradore and P. Fiorini, "A review of bilateral teleoperation algorithms," Acta Polytech.

- Hung., Vol.13, No.1, pp.191-208, 2016.
- [4] C. E. Reiley, T. Akinbiyi, D. Burschka, D. C. Chang, A. M. Okamura, and D. D. Yuh, "Effects of Visual Force Feedback on Robot-Assisted Surgical Task Performance," *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, Vol.135, No.1, pp.196-202, 2008.
- [5] U. M. Ascher, D. K. Pai, and B. P. Cloutier, "Forward Dynamics, Elimination Methods, and Formulation Stiffness in Robot Simulation," *Int. J. Rob. Research*, Vol.16, No.6, pp.749-758, 1997.
- [6] M. M. Vainberg, *Variational methods and methods of nonlinear operators in the theory of nonlinear equations*, Wiley, 1973.
- [7] <http://www.ode.org>
- [8] J. I. Lipton, A. J. Fay, and D. Rus, "Baxter's Homunculus: Virtual Reality Spaces for Teleoperation in Manufacturing," *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol.3, No.1, pp.179-186, 2018.
- [9] L. Földváry, "Analysis of Numerical Differentiation methods applied for Determination of Kinematic Velocities for LEOs," *Period Polytech Civ Eng*, Vol.51, No.1, pp.17-24, 2007.
- [10] <http://youtu.be/UEkcMAfiwUc>

#### 저 자 소 개

양 정 연(Jeong-Yean Yang)

정회원



- 2000년 2월 : KAIST 기계공학과(공학석사)
- 2011년 8월 : KAIST 기계공학과(공학박사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 목원대학교 지능로봇공학과 교수

<관심분야> : 지능 로봇