

시간 지연이 있는 양방향 원격조작 제어 기술 동향

This paper presents the state of the art of control strategies for bilateral teleoperation systems under time delays. In the bilateral teleoperation that has force feedback, the time delay in the communication channel is the main source of instability. To cope with this problem, a number of control methods have been proposed. Among many control strategies, key aspects of the recent passivity-based methods are mainly summarized for approaches with wave variables, PO/PC (passivity observer/passivity controller), simple PD, and energy bounds.

■ 서창훈, 박성준, 류제하*
(광주과학기술원 기전공학부)

I. 서론

로봇기술의 발달로 공장에서의 반복적인 단순 작업 뿐만 아니라 현재 사람의 손으로 이루어지고 있는 힘들고 위험한 작업들이 로봇으로 대체되고 있다. 로봇을 이용한 무인화 기술은 비용절감의 효과뿐만 아니라 위험으로부터 인간의 안전을 보장한다는 장점이 있다. 그러나 현재의 기술 수준에서 로봇은 현장에서 발생할 수 있는 모든 상황을 스스로 인지하고 판단하여 행동을 취할 수 있을 정도의 지능을 갖추지 못하고 있다. 이러한 지능적 한계를 극복하기 위해서는 여전히 사람의 개입이 필요할 수 밖에 없다. 이를 가능하게 하는 것이 원격조작(teleoperation)이다.

원격 조작 시스템은 그림 1 과 같이 조작기를 이용하여 원격지에 있는 종로봇을 조작함으로써 조작자가 현장에서 직접 작업하는 것과 같은 효과를 만들어 낼 수 있다.

원격조작의 응용 분야는 심해, 우주공간, 방사능 지역 등 사람이 직접 작업하기 힘든 극한 작업환경에서 주로 사용되며 최근 우주 로봇, 원격 수술 로봇 뿐만 아니라 눈에 보이지 않는 미세 환경 등 고도의 정밀도와 능숙도가 요구되는 분야로 사용 범위가 확장되고 있다.

원격 조작에서 촉감 정보를 제시해 주면 작업을 하는데 현실감을 제공하거나 또는 작업능력을 증대시킬 수 있다. 원격 조작에서 이렇게 힘 정보를 제시해주는 경우를 통상적으로 양방향

원격 조작(bilateral teleoperation)이라고 한다. 일반적인 원격 조작 시스템은 마스터와 슬레이브로 구성되며, 힘 정보를 제시해 주는 양방향 원격 조작 시스템에서는 마스터(master)의 위치 또는 속도 정보가 통신 채널을 통하여 슬레이브(slave) 측으로 전송이 되고 슬레이브 측에서는 힘 정보가 통신 채널을 통하여 마스터 측으로 전송이 된다. 이 때 통신 채널에서 발생하는 시간 지연(time delay)이나 정보 손실(data loss) 등이 원격 조작 시스템의 안정성에 상당히 부정적인 영향을 미치게 된다[1].

따라서 시간 지연이 있는 양방향 원격 조작 제어에서 안정성을 확보하는 것은 중요한 연구 주제 중의 하나이다. 따라서 본 기고문에서는 시간 지연이 있는 양방향 원격 조작의 안정성을

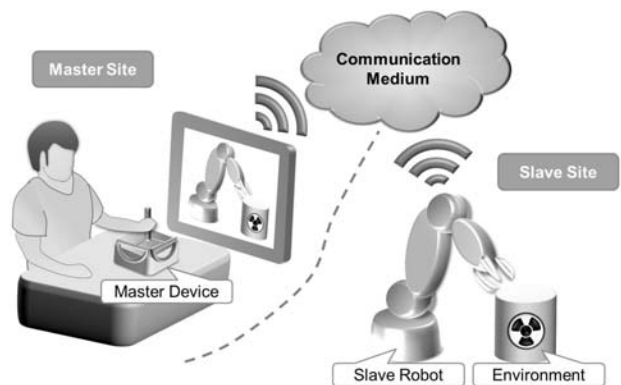


그림 1. 원격 조작 시스템.

확보하기 위한 여러 가지 제어 이론 중에서 최근 제어의 강건성 때문에 널리 사용되고 있는 수동성 이론을 이용한 제어 방법들에 대해 기본 알고리즘, 특성 및 장단점에 대해 정리하였다.

II. 양방향 원격조작 제어의 연구 동향

1940년대 후반 Raymond Goertz는 방사능 물질을 다루기 위하여 처음으로 기계적으로 제어되는 원격 조작 시스템(그림 2)을 개발하였다.

이후 1960년대 초반 Sheridan과 Ferrell [3]은 시간 지연이 있을 경우에 움직임과 정지를 반복하면서 작업을 수행하는 Move-and-wait strategy를 제안하였다. 이후 시간 지연 문제를 해결하기 위하여 관리 제어 방법 [4], 원격조작지향적 컴퓨터 소프트웨어 언어[5]-[8], 및 예측 디스플레이(predictive display)[5][9] 등이 등장하였다. 그러나 초기 연구는 대부분 실험적이고 경험적인 접근 방법에 국한되었고 1980년대에 들어서야 시간 지연에 의해

발생하는 불안정성 문제에 대한 이론적 연구가 본격적으로 시작되었다.

1980년대 후반에서 1990년대 초반에 이르러서는 원격 조작 시스템을 수동성 이론을 사용하여 해석하는 시도들이 이루어졌다. 전체 원격 조작 시스템을 마스터, 슬레이브, 조작자, 작업 환경의 2-포트 네트워크(2-port network) [10] 요소들로 모델링하고 여기에 수동성 이론을 적용하여 안정성을 확보하게끔 하였다

한편 1990년대 초반, Lawrence [11]는 투명성(Transparency)을 만족하기 위해서는 조작자 측에서 바라본 입력 임피던스와 작업 환경의 임피던스가 같아야 함으로 이 조건을 만족시키기 위하여 마스터와 슬레이브 양쪽의 속도 및 힘 변수들을 동시에 전송하도록 4-채널 구조(4-channel architecture)를 제안하기도 하였다. 이러한 4-채널 구조에서는 모델 기반의 고정 제어를 구성하기 위하여 조작자, 마스터, 슬레이브, 작업 환경의 임피던스를 가급적 정확히 획득하는 것이 필수적이다. 그러나 각 구성 요소의 동역학적 특성을 정확히 알아내는 것은 무척 어려운 일이기 때문에 각 파라미터의 불확실성(uncertainty)을 보상하기 위해 적응 제어(adaptive control) 기법[12]-[15]이 제안되었다. 또한 플랜트(plant)의 모델을 이용하여 종로봇 측의 상황을 예측하여 시간 지연 문제를 해결하는 예측 제어(Predictive control) 기법 [16]-[29]도 제안되었다. 그 외 H_{∞} 제어 [30], 슬라이딩 모드 제어(Sliding mode control) [31], Finite spectrum assignment [32] 등 다양한 제어 기법이 제안되어 사용되었다.

그림 3에 원격 조작 제어 연구의 역사를 간략히 정리하였다. 보다 자세한 내용은 참고문헌 [1]을 참조하기 바란다.

앞서 요약한 바와 같이 시간 지연에 의한 원격 조작 시스템의 불안정성을 극복하기 위해 다양한 제어 기법들이 제안되었다. 다음 장에서는 지금까지 개발된 다양한 원격 조작 제어 이론들 중에서 수동성 이론에 기반한 제어 이론들에 대해 좀 더 자세히 살펴해보도록 한다.



그림 2. 최초의 마스터-슬레이브 원격조작기 (2).

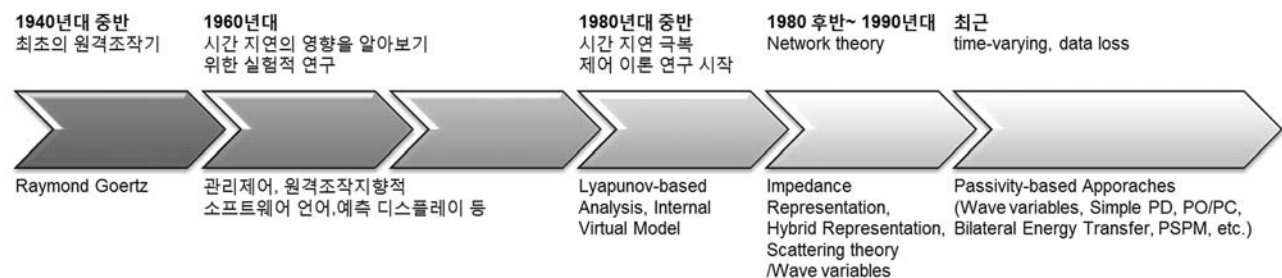


그림 3. 원격 조작 제어 연구의 역사.

Ⅲ. 수동성 이론 기반의 원격 조작 제어 연구 동향

수동성 이론(passivity theory)은 선형 및 비선형 시스템의 안정성을 에너지의 입/출력 관점에서 다룬다. 수동성은 안정성을 판별하는 충분조건으로 수동적인 시스템(passive system)은 에너지를 만들어내지 않고 시스템의 안정적인 거동을 보장한다. 그리고 수동성 이론은 사람이나 환경에 대한 모델을 전혀 고려할 필요가 없으므로 로봇틱스, 햅틱/원격 조작 제어의 복잡한 시스템의 안정성 분석에 널리 사용되고 있다.

1980년대 후반에서 1990년대 초반에 걸쳐 impedance representation [33], hybrid representation [34], scattering theory [35], wave variables [36] 와 같은 수동성 이론에 기반을 둔 원격 조작 제어 이론들이 등장하였고 이러한 수동성 기반의 접근으로 시간 지연이 있는 원격 조작 시스템의 안정화 문제를 체계적으로 다룰 수 있게 되었다.

1. 스캐터링 이론/웨이브 변수 기법

1989년 Anderson과 Spong [35]은 일정한 시간 지연(constant time delay)이 존재하는 힘 반향 양방향 원격 제어의 안정성을 유지하기 위하여 스캐터링 이론(Scattering theory)을 제안하였고 이후 Neimeyer와 Slotine [36]이 이것을 바탕으로 웨이브 변수(Wave variables) 기법을 제안하였다. 이들은 마스터와 슬레이브가 모두 수동적(passive)이라 가정하고 Two-Port로 모델링되는 통신 채널만 수동성을 만족시키면 전체 시스템의 수동성을 확보하여 안정성을 보장할 수 있다고 보았다. 따라서 통신 채널의 수동성을 만족시키기 위하여 U, V로 통칭하는 웨이브 변수들을 정의하고 위치/속도, 힘 등의 물리량을 웨이브 변수로 치환하여 이를 전송함으로써 전체 양방향 원격 조작 시스템의 수동성을 확보하고 따라서 안정성을 보장하게 된다.

웨이브 변수 기법에서 속도와 힘은 마스터와 슬레이브단에서 웨이브 변수 u_m 과 v_s 로 (1)-(2)와 같이 각각 변환된다.

$$u_m(t) = \frac{b\dot{x}_m(t) + F_m(t)}{\sqrt{2b}} \quad (1)$$

$$v_s(t) = \frac{b\dot{x}_s(t) - F_s(t)}{\sqrt{2b}} \quad (2)$$

여기서 $\dot{x}_m(t)$, $F_m(t)$, $\dot{x}_s(t)$ 와 $F_s(t)$ 는 각각 마스터와 슬레이브의 속도와 힘을 나타낸다. b 는 임의의 양수로 시스템 거동에

영향을 미치는 특성 임피던스(characteristic impedance or wave impedance)이다. 웨이브 임피던스 b 값이 클수록 댐핑이 커지는 효과가 있어 자유공간에서 움직일 때 조금 무겁게 느껴진다. 반대로 b 값이 작아질수록 댐핑이 줄어들어 자유공간에서의 움직임은 부드러워지지만 힘의 크기가 줄어들게 된다. 따라서 b 값을 통신 시간 지연 및 시스템의 특성에 따라 적절히 조절해 주어야 한다.

웨이브 변수 u_m 과 v_s 는 통신 채널을 통해 각각 마스터에서 슬레이브, 슬레이브에서 마스터 측으로 전송이 되고 각 웨이브 변수를 받는 수신단 측의 웨이브 변수 u_s 와 v_m 는 (3)-(4)와 같다.

$$u_s(t) = \frac{b\dot{x}_s(t) + F_s(t)}{\sqrt{2b}} = u_m(t - \tau_1) \quad (3)$$

$$v_m(t) = \frac{b\dot{x}_m(t) - F_m(t)}{\sqrt{2b}} = v_s(t - \tau_2) \quad (4)$$

여기서 τ_1 과 τ_2 는 각각 마스터에서 슬레이브, 슬레이브에서 마스터 측으로 전송되는데 걸리는 시간 지연을 나타낸다. 이 웨이브 변수 기법에서는 전송된 웨이브 변수에서 각각의 속도와 힘을 역으로 추출하는 과정을 거치게 된다. 여기서 속도 정보를 적분하여 위치 정보를 얻게 되는데 이 적분과정에서 발생할 수 있는 적분 오차에 의해 위치 정보에 오차가 생길 수 있다. 또한, 시간 지연이 일정하지 않을 경우, 추출된 힘/속도 정보가 왜곡될 수 있다. 따라서 시간에 따라 변하는(time-varying) 시간 지연에 대해서는 position drift라고 하는 마스터와 슬레이브 위치 간의 정상상태 오차가 발생한다. 따라서 이를 극복하기 위한 다양한 virtual time delay, wave predictor, drift compensation 등 다양한 추가적인 제어 기법[16]-[17], [38]-[42] 이 제안되었다. 표 1은

표 1. Position drift 현상을 해결하기 위한 제어 기법.

Author	Year	Proposed Method
Kosuge et al.	1996	- virtual time delay
Yokokohji et al.	1999	- integrating using time stamp
	2000 2002	
Munir&Book Ching&Book	2001	- wave predictor
	2006	- wave predictor + drift compensation
Chopra et al.	2006	- explicit position data transmission through additional path

position drift 현상을 해결하기 위한 추가적인 제어 기법에 대해 정리한 것이다.

2. 시간 영역 수동성 알고리즘(time domain passivity algorithm)

Hannaford와 Ryu [43]는 가상환경과의 안정적인 햅틱 상호 작용을 위해 시간 영역 수동성 알고리즘(time-domain passivity algorithm)을 제안하였다. 시간 영역 수동성 알고리즘에서는 (5)의 PO (Passivity Observer)가 각 샘플 시간마다 에너지를 모니터링 한다. 만약 PO에서 모니터링 하는 에너지가 다음 샘플 타임에서 시스템을 발산시킬 것이라 예측이 되면 (6)에 정의된 PC (Passivity Controller)가 과도하게 발생된 여분의 에너지를 소모하여 시스템을 안정화 시킨다. 여기서 PC는 PO의 값에 따라 동작이 되는 일종의 적응적인 댐핑(adaptive damping)이라 할 수 있다.

$$E_{obs}(n) = \Delta T \sum_{k=0}^n f(k)v(k) \quad (5)$$

여기서, ΔT 는 샘플링 주기이다.

$$a(n) = \begin{cases} -\frac{E_{obs}(n)}{\Delta T v(n)^2} & \text{if } E_{obs}(n) < 0 \\ 0 & \text{if } E_{obs}(n) \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

이후 Ryu 등 [44]은 위의 PO/PC 알고리즘을 마스터와 슬레이브 단에 두 쌍의 PO와 PC를 각각 배치하여 양방향 원격 조작에 적용하였는데 이 때에는 시간 지연에 대한 고려를 하지 않았다. 최근 Artigas 등 [45], Ryu 등 [46]-[48]은 각각 일정한, 또는 시변하는 시간 지연이 있는 양방향 원격 조작 시스템에 PO/PC 알고리즘을 각각 적용하였는데 실험 결과에서 PC의 동작에 의해 고주파 진동이 발생하였다. 이를 해결하기 위해 Artigas 등은 reference energy following [49]을 제안하였는데 이번 실험 결과에서는 마스터와 슬레이브 위치간 position drift가 발생하였고 이후 Artigas 등 [50]은 PO/PC를 기반으로 PC에 PCDC (Passive Continuous Discrete time Connector)를 추가하여 확장한 양방향 에너지 전송(bilateral energy transfer) 방법을 제안하였다. 하지만 여전히 [49]와 같이 position drift 현상 [50]이 관측되었고 후에 drift compensator [51]를 추가하여 position drift 현상을 해결하였다.

표 2. PO/PC 관련 연구 정리.

Author	Year	Time delay	Remarks
Ryu et al.	2004	No delay	
Artigas et al.	2006	constant delay (100 msec)	- high freq. oscillation
Ryu&Preusche	2007	variable delay (120 msec)	- high freq. oscillation
Artigas et al.	2007	constant delay (360 msec)	- position drift
Artigas et al.	2008	constant delay (200 msec)	- position drift
Artigas et al.	2009	constant delay (250 msec)	- simulation only

3. PD 제어기

Lee와 Spong [52]은 PD 제어기를 이용하여 슬레이브가 마스터를 잘 추종할 수 있도록 하고 (7)과 같이 PD 제어기에 에너지 소모항(dissipative term)을 추가하여 전체 양방향 원격 조작 시스템의 수동성을 만족하도록 하였다.

$$\begin{aligned} T_1(t) &= -K_v(\dot{q}_1(t) - \dot{q}_2(t - \tau_2)) - K_p(q_1(t) - q_2(t - \tau_2)) \\ &\quad - (K_d + P_\varepsilon)\dot{q}_1(t), \\ T_2(t) &= -K_v(\dot{q}_2(t) - \dot{q}_1(t - \tau_1)) - K_p(q_2(t) - q_1(t - \tau_1)) \\ &\quad - (K_d + P_\varepsilon)\dot{q}_2(t) \end{aligned} \quad (7)$$

이 연구에서는 시간 지연을 일정하다고 가정하였기 때문에 시변하는 시간 지연에 대해서는 버퍼를 사용하여 시간 지연을 일정하게 만들어 준다. 따라서 시간 지연의 예상 최대값을 알아야만 한다. 또한 에너지 소모항의 게인 K_d 은 아래의 (8)과 같이 정의되는데 PD 제어기의 P 게인(K_p)과 최대 왕복 시간 지연($\bar{\tau}_n$)과 관련이 있어 시간 지연에 따라 게인값을 달리 설정해 주어야 하는 단점이 있다.

$$K_d = \frac{\bar{\tau}_n}{2} K_p \quad (8)$$

벽 접촉 실험 결과에서는 벽에 접촉하기 전과 접촉 후 벽에서 떨어지는 부근, 즉 자유공간에서 원하지 않는 힘이 발생하는 현상이 관측된다. 이상적으로 자유 공간에서는 아무런 힘이 느껴지지 않아야 하는데 원하지 않는 힘이 느껴짐으로 인해 조작자가 접촉하는 순간을 정확히 알지 못하게 된다.

최근 Lee와 Huang [53]은 햅틱 상호작용 뿐만 아니라 시간 지

표 3. PD 제어기 요약.

Author	Year	Time delay	Remarks
Lee&Spong	2006	1.5 sec (constant)	- unwanted force peaks
Lee&Huang	2010	0.1~0.5 sec (variable)	- unwanted force peaks - over 90% data loss

연 및 데이터 손실이 발생하는 양방향 원격 조작에서의 안정성을 보장하기 위한 PSPM (passive set-position modulation) 방법을 제안하였는데 여기서도 마찬가지로 벽 접촉 전후에 댐핑항에서 계산된 힘이 나타난다.

4. 에너지 제한 알고리즘(Energy-Bounding Algorithm)

Seo 등 [55]-[59]은 안정적인 햅틱 상호작용을 위해 개발한 에너지 제한 알고리즘 [54]을 시간 지연이 있는 양방향 원격 조작 제어에 적용하였다. 두 개의 에너지 제한 알고리즘을 마스터와 슬레이브에 각각 적용하여 시간 지연의 크기, 변동, 데이터 손실에 상관없이 안정성을 보장한다.

에너지 제한 알고리즘은 P-F (Position-Force) Architecture의 경우 마스터, 슬레이브에 각각 (9)와 (10)의 제어 법칙과 수동성을 만족시키기 위한 (11)-(12)의 제한 법칙을 갖는다. 단, 슬레이브의 경우, Δx 대신 Δe 를 사용한다.

마스터 에너지 제한 알고리즘 제어 법칙:

$$F_m[k] = F_m[k-1] + \beta_m[k]\Delta x_m[k] \quad (9)$$

여기서, $\beta_m[k] = \frac{F_{md}[k] - F_m[k-1]}{\Delta x_m[k]}$ for $\Delta x_m[k] \neq 0$,

$\Delta x_m[k] = x_m[k+1] - x_m[k]$, x_m 은 마스터의 위치, F_m 은 마스터 장치의 command force, F_{md} 는 슬레이브 측에서 전송된 마스터 장치의 desired force를 나타낸다.

슬레이브 에너지 제한 알고리즘 제어 법칙:

$$F_s[k] = F_s[k-1] + \beta_s[k]\Delta e_s[k] \quad (10)$$

여기서, $\beta_s[k] = \frac{F_{sd}[k] - F_s[k-1]}{\Delta e_s[k]}$ for $\Delta e_s[k] \neq 0$,

표 4. 양방향 원격 조작 에너지 제한 알고리즘 요약.

Author	Year	Time delay	Remarks
Seo et al.	2007	constant/variable 100~2500 msec (free motion)	- master force magnitude reduction - over 90% data loss
	2008	constant/variable 100~300 msec (contact motion)	
	2011		

$\Delta e_s[k] = e_s[k+1] - e_s[k]$, e_s 는 마스터 측에서 전송된 위치 command x_{sd} 와 슬레이브의 위치 x_s 의 차이를 나타내며, F_s 는 슬레이브 장치의 command force, F_{sd} 는 슬레이브 장치의 desired force를 나타낸다.

제한 법칙:

$$\text{if } \beta[k] > \beta_{\max}[k] \text{ then } \beta[k] = \beta_{\max}[k] \quad (11)$$

$$\text{if } \beta[k] < \beta_{\min}[k] \text{ then } \beta[k] = \beta_{\min}[k] \quad (12)$$

여기서, $\beta_{\max}[k] = \min(c, \gamma_{\max}[k])$, $\beta_{\min}[k] = \gamma_{\min}[k]$,

$$\gamma_{\max}[k] = c - \frac{F[k-1]}{\Delta x[k]} + \sqrt{c^2 + \left(\frac{F[k-1]}{\Delta x[k]}\right)^2},$$

$$\gamma_{\min}[k] = c - \frac{F[k-1]}{\Delta x[k]} - \sqrt{c^2 + \left(\frac{F[k-1]}{\Delta x[k]}\right)^2}, \quad c \text{는 양수이다.}$$

양방향 원격 조작 에너지 제한 알고리즘은 표 4에 정리된 것 같이 실험 결과 시간지연의 크기나 변동에 상관없이, 그리고 데이터 손실이 90% 이상 발생할 경우에도 안정한 거동을 보인다. 표 4에서 Contact Motion 실험의 경우 마스터-슬레이브의 운동범위가 제한되어 300 msec.까지 실험을 하였지만 이론적으로는 임의의 시간 지연에 대해서도 안정적인 원격제어가 가능하다. 그러나 마스터 측의 힘의 크기가 기본적으로는 시간지연에 반비례하여 줄어들어 마스터-슬레이브 장치의 물리적 감쇄를 크게 하거나 시간지연을 예측보상하여 투명성을 향상 시키는 연구가 필요하다.

5. 장단점 분석

웨이브 변수 기법은 통신 채널을 수동적으로 만들기 위하여 웨이브 변수를 전송함으로써 전체 양방향 원격 조작 시스템의

안정성을 피한다. 그러나 웨이브 변수에서 속도를 역변환하고 다시 적분하는 과정을 거쳐 위치 정보를 추출하기 때문에 특히, 시변하는 시간 지연에 대해서 마스터-슬레이브 간의 위치 오차가 발생하게 된다. 따라서 이를 해결하기 위하여 추가적인 많은 방법들이 제안되었다. 또한 웨이브 임피던스 값 b 는 시간 지연의 크기, 시스템의 특성에 따라 적절히 조절되어야 한다.

PO/PC에서는 PC의 동작에 따라 고주파의 진동이 발생하게 되는데 이를 보상하기 위하여 energy reference following, bilateral energy transfer concept 등이 제안되었으나 position drift 현상을 야기시키고 이를 해결하기 위하여 추가적인 drift 보상이 필요하다. PO/PC에서는 PO에서 에너지를 정확히 모니터링하는 것이 관건이다. 그러나 시간 지연 및 데이터 손실 때문에 마스터와 슬레이브 양단의 에너지를 정확하게 모니터링 하는 것은 쉽지 않다.

PD 제어를 이용하는 방법에서는 안정성을 보장하기 위하여 댐핑항을 추가하였는데 이 댐핑항에 의해 자유 공간에서 느끼지 말아야 할 힘이 느껴지게 된다. 이는 자유 공간에서의 움직임을 원활하지 못하게 하며 정확히 언제 벽에 접촉하는 지를 구분하지 못하게 하는 단점이 있다. 또한 추가적인 댐핑 계인이 시간 지연 및 PD 제어기의 P-계인에 영향을 받기 때문에 웨이브 변수 기법처럼 시간 지연에 따라 댐핑 계인을 조절해야 한다.

양방향 원격 조작 에너지 제한 알고리즘은 시간 지연의 크기 및 변동에 상관없이 그리고 임의의 데이터 손실에 대해서도 제어 계인의 수정 없이 양방향 원격 조작 시스템이 안정함을 보였다. 그러나 마스터 힘의 크기가 줄어들어 투명성을 향상시킬 필요가 있다. 에너지 제한 알고리즘의 경우에는 장치의 에너지 소모 요소 이내로 에너지를 제한시켜주므로 투명성을 향상시키기 위해서는 에너지 소모 요소, 즉 장치의 댐핑값을 정확히 알아야 한다.

IV. 결론 및 향후 연구 방향

양방향 원격 제어는 사람이 일할 수 없는 극한환경 및 원격지에서 업무의 수행을 가능하게 하며, 또한 촉감 정보 제시를 통하여 현실감 제공 및 작업능력의 향상을 꾀할 수 있다. 그러나 원격 진찰 및 원격 수술 같은 의료서비스, 위험지역에서의 구조 업무, 그리고 나노 레벨에서의 조작 등에서 요구하는 복잡하고 숙련된 조작을 제공하기 위해서는 더 많은 연구가 필요하다. 본 논문에서 살펴본 바와 같이 지금까지 많은 알고리즘이 제안되었으나 아직까지 안정성과 투명성을 동시에 만족시키

는, 실용성이 확보된 알고리즘은 더 많은 기초연구를 필요로 한다. 이를 위해서는, 제어 측면에서는 열악한 환경에서도 강건한 원격 조종이 이루어지도록 안정화에 대한 연구가 더 이루어져야 하며, 현실감 있는 촉감 정보를 통해 능란한(dexterous) 조종이 가능하도록 투명성 제고에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다. 또한 조작자에게 현실감을 제시해줄 수 있는 마스터 인터페이스 뿐만 아니라 원격지 환경의 정보를 획득할 수 있는 센싱 시스템, 이와 더불어 시간 지연을 줄이거나 데이터를 효율적으로 전송할 수 있도록 네트워크 관련 연구도 필요하다.

※ 이 논문은 방위사업청과 국방과학연구소 (계약번호 UD100004ID), Global Frontier <Human-centered Interaction for Coexistence> (MEST; NRF-M1AXA003-2010-0029746), 그리고 ITRC (NIPA-2011-C1090-1131-0006)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] P. F. Hokayem and M. W. Spong, "Bilateral Teleoperation: An Historical Survey," *Automatica*, vol. 42, no. 12, pp. 2035-2057, 2006.
- [2] <http://www.anl.gov> (Argonne National Laboratory).
- [3] T. B. Sheridan and W. R. Ferrell, "Remote manipulative control with transmission delay," *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, vol.4, pp. 25-29, 1963.
- [4] W. R. Ferrell and T. B. Sheridan, "Supervisory control of remote manipulation," *IEEE Spectrum*, pp. 81-88, 1967.
- [5] C. Fong, R. Dotson, and A. K. Bejczy, "Distributed microcomputer control system for advanced teleoperation," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 987-995, 1986.
- [6] S. Lee, G. Bekey, and A. K. Bejczy, "Computer control of spaceborne teleoperators with sensory feedback," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 205-214, 1985.
- [7] A. Madni, Y. Y. Chu, and A. Freedy, "Intelligent interface for remote supervision and control of underwater manipulation," *OCEANS*, vol. 15, pp.106-110, 1983.
- [8] T. Sato and S. Hirai, "Language-aided robotic teleoperation system (larts) for advanced teleoperation," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 3, no. 5, pp. 476-481, 1987.

- [9] A. K. Bejczy and W. S. Kim, "Predictive displays and shared compliance control for time-delayed telemanipulation," *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 1, pp. 407-412, 1990.
- [10] B. Hannaford, "A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 4, pp. 426-434, 1989.
- [11] D. A. Lawrence, "Stability and transparency in bilateral teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 5, pp. 625-637, 1992.
- [12] K. H-Zaad and S. E. Salcudean, "Adaptive transparent impedance reflecting teleoperation," *Proc. of International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1369-1374, 1996.
- [13] H. K. Lee and M. J. Chung, "Adaptive controller of a master-slave system for transparent teleoperation," *Journal of Robotic Systems*, vol. 15, no. 8, pp. 465-475, 1998.
- [14] W. H. Zhu and S. E. Salcudean, "Stability guaranteed teleoperation : An adaptive motion/force control approach," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 45, no. 11, pp. 1951-1969, 2000.
- [15] J. -H. Ryu and D. S. Kwon, "A novel adaptive bilateral control scheme using similar closed-loop dynamic characteristics of master/slave manipulators," *Journal of Robotic Systems*, vol. 18, no. 9, pp. 533-543, 2001.
- [16] S. Munir and W. J. Book, "Internet-based teleoperation using wave variables with prediction," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 7, pp. 124-133, 2002.
- [17] H. Ching and W. J. Book, "Internet-based bilateral teleoperation based on wave variable with adaptive predictor and direct drift control," *Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, vol. 128, pp. 86-93, 2006.
- [18] Y. -J. Pan, C. Canudas-de-Wit, and O. Sename, "A new predictive approach for bilateral teleoperation with applications to drive-by-wire systems," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 22, pp. 1146-1162, 2006.
- [19] K. Yoshida, T. Namerikawa, and O. Sawodny, "A state predictor for bilateral teleoperation with communication time delay," *Proc. of the 47th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 4590-4595, 2008.
- [20] S. Sirouspour and A. Shahdi, "Model predictive control for transparent teleoperation under communication time delay," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 22, pp. 1131-1145, 2006.
- [21] K. Yoshida and T. Namerikawa, "Stability and tracking properties in predictive control with adaptation for bilateral teleoperation," *Proc. of the American Control Conference*, pp. 1323-1328, 2009.
- [22] L. Huijun and S. Aiguo, "Virtual-environment modeling and correction for force-reflecting teleoperation with time delay," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, pp. 1227-1233, 2007.
- [23] A. Bemporad, "Predictive control of teleoperated constrained systems with unbounded communication delays," *Proc. of the IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 2, pp. 2133-2138, 1998.
- [24] P. A. Prokopiou, S. G. Tzafestas, and W. S. Harwin, "Towards variable time delays robust telemanipulation through master state prediction," *Proc. of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 305-310, 1999.
- [25] H. -J. Im, W. -K. Chung, and I. -H. Suh, "Predictive control of bilateral teleoperation with short time delay," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 6, no. 4, pp. 295-304, 2000.
- [26] J. Sheng and M. W. Spong, "Model predictive control for bilateral teleoperation systems with time delays," *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, vol. 4, pp. 1877-1880, 2004.
- [27] T. Slama, N. D. Rossi, A. Trevisani, D. Aubry, and R. Oboe, "Stability experiments of a scaled bilateral teleoperation system over Internet using a model predictive controller," *Proc. of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 3150-3156, 2007.
- [28] T. Slama, A. Trevisani, D. Aubry, and R. Oboe, "Experimental analysis of an internet-based bilateral teleoperation system with motion and force scaling using a model predictive controller," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, pp. 3290-3299, 2008.
- [29] A. Iqbal and H. Roth, "Predictive time domain passivity control for delayed teleoperation using energy derivatives," *Proc. of the 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, pp. 1-6, 2006.
- [30] G. M. H. Leung and B. A. Francis, "Robust nonlinear control of bilateral teleoperators," *Proc. of the IEEE American Control Conference*, vol. 2, pp. 2119-2123, 1994.

- [31]H. C. Cho, J. H. Park, K. Kim, and J.-O. Park, "Sliding mode-based impedance controller for bilateral teleoperation under varying time-delay," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 1025-1030, 2001.
- [32]A. Fattouh and O. Sename, "Finite spectrum assignment for teleoperation systems with time delay," *Proc. of the IFAC Robot Control*, pp. 599-604, 1997.
- [33]G. J. Raju, G. C. Verghese, and T. B. Sheridan, "Design issues in 2-port network models of bilateral remote manipulation," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 1316-1321, 1989.
- [34]B. Hannaford and P. Fiorini, "A detailed model of bilateral teleoperation," *Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 1, pp. 117-121, 1988.
- [35]R. J. Anderson and M. W. Spong, "Bilateral control of teleoperators with time delay," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 34, no. 5, pp. 494-501, May 1989.
- [36]G. Niemeyer and J.-J. E. Slotine, "Stable adaptive teleoperation," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 152-162, 1991.
- [37]G. Niemeyer and J.-J. E. Slotine, "Telemanipulation with time delays," *International Journal of Robotics Research*, vol. 23, no. 9, pp. 873-890, 2004.
- [38]K. Kosuge, H. Murayama, and K. Takeo, "Bilateral feedback control of telemanipulators via computer network," *Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, pp. 1380-1385, 1996.
- [39]Y. Yokokohji, T. Imaida, and T. Yoshikawa, "Bilateral teleoperation under time-varying communication delay," *Proc. of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1854-1859, 1999.
- [40]Y. Yokokohji, T. Imaida, and T. Yoshikawa, "Bilateral control with energy balance monitoring under time-varying communication delay," *Proc. of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2684-2689, 2000.
- [41]Y. Yokokohji, T. Tsujioka, and T. Yoshikawa, "Bilateral control with time-varying delay including communication blackout," *Proc. of 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 285-292, 2002.
- [42]N. Chopra, M.W. Spong, R. Ortega, and N.E. Barabanov, "On tracking performance in bilateral teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 22, pp. 861-866, 2006.
- [43]B. Hannaford and J.-H. Ryu, "Time domain passivity control of haptic interfaces," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 1, pp. 1-10, 2002.
- [44]J. -H. Ryu, D. S. Kwon, and B. Hannaford, "Stable teleoperation with time-domain passivity control," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 20, no. 2, pp. 365-373, 2004.
- [45]J. Artigas, J. Vilanova, C. Preusche, and G. Hirzinger, "Time domain passivity control-based telepresence with time delay," *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, pp. 4205-4210, 2006.
- [46]J. -H. Ryu and C. Preusche, "Stable bilateral control of teleoperators under time-varying communication delay: Time domain passivity approach," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3508-3513, 2007.
- [47]J. -H. Ryu, "Bilateral controller for time-varying communication delay: Time domain passivity approach," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol.13, no.11, pp.1099-1105, 2007.
- [48]J. -H. Ryu, "Bilateral control with time domain passivity approach under time-varying communication delay: Resetting scheme," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol.14, no.11, pp.1124-1129, 2008.
- [49]J. Artigas, C. Preusche, and G. Hirzinger, "Time domain passivity for delayed haptic telepresence with energy reference," *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, pp. 1612-1617, 2007.
- [50]J. Artigas, C. Preusche and G. Hirzinger, G. Borghesan, C. Melchiorri, "Bilateral energy transfer in delayed teleoperation on the time domain," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 671-676, 2008.
- [51]J. Artigas, C. Preusche and G. Hirzinger, G. Borghesan, C. Melchiorri, "Bilateral energy transfer for high fidelity haptic telemanipulation," *Third Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC2009)*, pp. 488-493, Salt Lake City, UT, USA, March 2009.
- [52]D. Lee and M. W. Spong, "Passive bilateral teleoperation with constant time delay," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 22, no.

2, pp. 269-281, 2006.

[53] D. Lee and K. Huang, "Passive-set-point-modulation framework for interactive robotic systems," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 2, pp. 354-369, 2006.

[54] J. -P. Kim and J. Ryu, "Robustly stable haptic interaction control using an energy-bounding algorithm," *International Journal of Robotic Research*, vol. 29, no. 6, pp. 666-679, 2010.

[55] J. -P. Kim, C. Seo, and J. Ryu, "A preliminary test for bilateral teleoperation using energy bounding algorithm," *Proc. of 16th IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication (RO-MAN 2007)*, pp. 304-309, 2007.

[56] C. Seo, J. Kim, J.-P. Kim, J. H. Yoon and J. Ryu, "Stable bilateral teleoperation using the energy-bounding algorithm: Basic idea and feasibility tests," *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2008)*, pp. 335-340, 2008.

[57] C. Seo, J. -P. Kim, J. Kim, H. -S Ahn and J. Ryu, "Robustly stable bilateral teleoperation under time-varying delays and data losses: An energy-bounding approach," *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011. (accepted)

[58] S. Park, C. Seo, J. -P. Kim, and J. Ryu, "An Energy-Bounding Approach to Rate-Mode Bilateral Teleoperation of Remote Vehicles in Constant Time-delayed Environments," *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5806-5811, 2010.

[59] S. Park, C. Seo, J. -P. Kim, and J. Ryu, "Robustly stable rate-mode bilateral teleoperation using an energy-bounding approach," *Mechatronics*, vol. 21, issue. 1, pp. 176-184, Feb. 2011.

저 자 약 력



서창훈

- 2003년 부산대학교 전자전기통신공학부 졸업.
- 2005년 광주과학기술원 기전공학과 석사 졸업.
- 2005~현재 광주과학기술원 기전공학부 박사과정 재학 중.
- 관심분야 : 햅틱/원격 조작 제어, 햅틱 인터페이스.



박성준

- 2007년 국민대학교 기계·자동차공학부 졸업.
- 2010년 광주과학기술원 기전공학과 석사 졸업.
- 2010년~현재 광주과학기술원 기전공학부 박사과정 재학 중.
- 관심분야 : 양방향 원격 제어, 햅틱 장비 제어.



류제하

- 1982년 서울대학교 기계공학과 졸업.
- 1984년 한국과학기술원 기계공학과 석사 졸업.
- 1991년 University of Iowa 기계공학과 박사 졸업.
- 현재 과학기술원 기전공학부 교수.
- 관심분야 : 햅틱 제어/모델링/렌더링, 원격 조작 제어, 촉감 방송 등 다양한 햅틱/멀티미디어 응용분야.