

2 채널 제어 구조를 사용한 양방향 원격조종 시스템의 투명도 구현

김중현[†] · 장평훈* · 박형순**

(2003년 6월 9일 접수, 2003년 8월 27일 심사완료)

Transparency Implementation for Bilateral Teleoperation System by using Two-channel Control Architecture

Jong-Hyun Kim, Pyung-Hun Chang and Hyung-Soon Park

Key Words : Transparency(투명도), Two-channel Control Architecture(2 채널 제어 구조), Bilateral Control(양방향 제어), Teleoperation(원격조종), Impedance Model(임피던스 모델), Time Delay Estimation(시간지연추정)

Abstract

Transparency has been considered as a performance measure in bilateral teleoperation system. Therefore, many issues of transparency have been studied. This paper investigates the transparency in two-channel control architectures. At first, we show the feasibility using analytic transparency-conditions and present the two classes of two-channel control architecture, which are perfectly transparent under ideal situation. In addition, remedies to problems due to impedance model estimation errors under real situation are introduced. They are as follows; design guideline of control parameters to reduce the effect of model estimation error effect and introduction of time delay estimation for unknown dynamics. From these analyses, the systematic control scheme, which is stable and well transparent under real implementation, is proposed in two-channel control architecture. Finally, the proposed scheme is applied to a 2 D.O.F master-slave system and the experimental results show the validity of the theoretical work.

1. 서론

원격조종(teleoperation) 시스템은 멀리 떨어진 곳의 매니퓰레이터(manipulator)를 사람이 조종하면서 또한 그 매니퓰레이터와 환경(environment) 사이의 상호작용(interaction)을 느낄 수 있도록 하기 위해서 도입되었다.

이런 원격조종 시스템에서 투명도(transparency)라는 것은 조종자가 이 시스템을 통해서 환경을 얼마나 있는 그대로 느끼는가 하는 정도를 의미한다. 결국 투명도는 안정성(stability)과 더불어 원

격조종 시스템의 설계에 있어서 중요한 목표로 자리잡게 되었다.

기존에 안정성 또는 투명도를 최적화하기 위한 수많은 양방향(bilateral) 원격조종 시스템의 제어기 설계 연구들이 있었다. 이러한 연구들을 토대로 마스터(master)와 슬레이브(slave) 사이의 통신 채널(channel)의 개수에 따라 2 채널,⁽¹⁾ 3 채널,⁽²⁾ 4 채널⁽³⁾과 같은 제어 구조(control architecture)들이 제안되었다. 또한 투명도가 원격조종 시스템의 성능 지수로 언급되면서⁽³⁾ 이를 4 채널 제어 구조를 통해 구현하는 연구⁽³⁻⁵⁾가 이루어졌고, 로컬 힘 피드백(local force feedback)을 통해 3 채널 제어 구조에서도 투명도 구현이 가능하다는 연구⁽²⁾도 있었다.

하지만 가장 직관적인 구조라 할 수 있는 2 채널 제어 구조에서 투명도를 구현하는 것에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 또한 실제 시스템에 투명도를 구현하고자 할 경우 발생할 수 있는 문

[†] 책임저자, 회원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과
E-mail : isskylark@mecha.kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3266 FAX : (042)869-5226

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 대학원 기계공학과

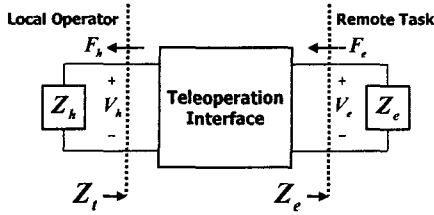


Fig. 1 General Two-Port Model⁽³⁾

제점에 대해 언급한 연구 역시 부족한 것이 사실이다.

따라서 본 연구에서는 2 채널 제어 구조에서 투명도를 구현하는 것이 가능한지를 살펴보고, 이를 실제로 적용할 경우의 문제점과 그에 대한 해결방안에 대해 생각해보고자 한다. 그리고 마지막으로 실험을 수행함으로써 본 연구의 결과를 검증하고 그 효용성을 살펴보도록 한다.

본 연구에서는 통신시간지연과 스케일계수(scale factor)를 고려하지 않는다는 두가지 가정을 전제로 한다. 이 두 개념은 본 논문에서 다루고자 하는 대상과는 거리가 있기 때문에 문제를 좀 더 간단히 하기 위해서 이러한 가정을 사용한다. 투명도 구현과 관련한 기존의 연구들을 보아도 이는 큰 무리가 없는 가정으로 생각된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 2 장에서는 2 채널 제어 구조에서 투명도를 구현하는 것이 가능하다는 것을 이론적으로 보인다. 다음 3 장에서는 이를 실제 시스템에 적용할 때에 고찰해야 할 사항으로 모델 추정과 그 오차에 대해 다룬다. 그리고 4 장에서는 실험을 통하여 본 연구의 결과를 검증하고 그 효용성을 보인다. 그리고 마지막으로 5 장에서는 결론을 맺도록 한다.

2. 2 채널 제어 구조에서의 투명도

2.1 투명도

본 연구는 투명도 구현에 대해 다루고 있으므로 우선은 투명도에 대해 간단히 짚고 넘어가도록 한다. 투명도의 기본 개념은 서론에서 언급했으므로 여기서는 이를 수학적으로 나타내고자 한다.

기존의 원격조종 시스템을 일반 2-포트 모델(general two-port model) (Fig. 1)로 표현한 연구에 의하면 가장 이상적인 경우인 완전 투명도(perfect transparency)는 다음과 같은 식으로 표현된다.⁽³⁾

$$Z_i = Z_e \quad (1)$$

여기서 Z_i 는 시스템을 통해 작업자가 느끼는 임피던스(impedance), Z_e 는 환경의 임피던스를 나타낸다.

Fig. 1 과 같은 원격조종 시스템을 2-포트 네트워크 혼합 행렬(two-port network hybrid matrix) 형태로 나타내면 다음과 같다.⁽⁵⁾

$$\begin{bmatrix} F_h \\ -V_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_h \\ F_e \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 h_{ij} ($i, j = 1, 2$)는 혼합 파라미터(hybrid parameter)라고 하며 각각은 마스터와 슬레이브의 다이내믹스(dynamics)와 그 제어 파라미터들에 대한 함수이다.

다음은 식 (2)에 나타난 혼합 파라미터를 이용해서 완전 투명도 조건을 나타내 보도록 한다. Fig. 1의 관계에서 식 (1), (2)를 연립해보면 그 결과는 다음과 같은 식으로 나타난다.

$$Z_i = \frac{F_h}{V_h} = \frac{h_{11} + (h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21})Z_e}{1 + h_{22}Z_e} = Z_e \quad (3)$$

이 식을 만족시키는 h_{ij} ($i, j = 1, 2$)의 조건이 바로 수학적인 완전 투명도 조건이 된다.

식 (3)이 모든 Z_e 에 대해서 항상 성립하기 위해서는 다음이 만족되어야 한다.⁽³⁾

$$\begin{cases} h_{11} = h_{22} = 0 \\ h_{12}h_{21} = -1 \end{cases} \quad (4)$$

식 (4)를 완전 투명도 조건이라 볼 수도 있으나 좀 더 정리된 결과를 얻기 위해 식 (4)를 식 (2)에 대입해보면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{cases} F_h = h_{12}F_e \\ -V_e = h_{21}V_h \end{cases} \quad (5)$$

식 (5)를 통해 h_{12} , h_{21} 은 마스터와 슬레이브 사이의 힘, 위치의 스케일계수를 의미한다는 것을 알 수 있다. 하지만 본 연구에서는 스케일계수를 고려하지 않으므로 이를 1로 생각하면 최종적으로 완전 투명도 조건은 다음과 같이 나타난다.⁽⁵⁾

$$\begin{cases} h_{11} = h_{22} = 0 \\ h_{12} = -h_{21} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

조건 (6)을 만족하면 그 원격조종 시스템은 완전 투명도를 구현한다고 볼 수 있다.

실제로 이러한 완전 투명도는 여러가지 불확실한 요소들(모델 추정 오차 등)의 영향으로 구현하기가 어렵다. 그래서 일반적으로는, 이상적인 경우에 조건 (6)을 만족하도록 설계된 시스템을 투명도가 구현된 시스템이라고 한다. 따라서 본 연구에서도 완전 투명도 조건 (6)을 만족하는지에 따라 투명도 구현 여부를 판가름하도록 한다.

Table 1 Parameter Descriptions of Fig. 2

파라미터	설명
C_1	마스터 위치 피드포워드 제어기
C_2	슬레이브 힘 피드포워드 제어기
C_3	마스터 힘 피드포워드 제어기
C_4	슬레이브 위치 피드포워드 제어기
C_5	슬레이브 로컬 힘 피드백 제어기
C_6	마스터 로컬 힘 피드백 제어기
C_m	마스터 로컬 위치 제어기
C_s	슬레이브 로컬 위치 제어기

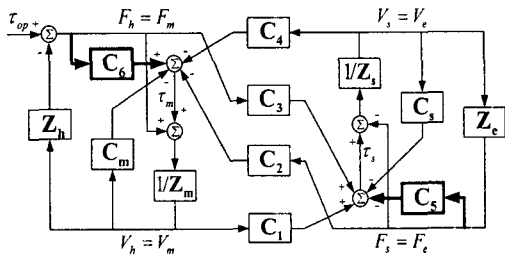


Fig. 2 General Bilateral Control Architecture

2.2 투명도 구현 조건

본 절에서는 2.1 절에서 명확해진 투명도 조건을 2 채널 제어 구조에서 만족시킬 수 있는지의 여부와 그 만족 조건에 대해 알아본다.

2.2.1 혼합 파라미터

앞서 2.1 절에서의 투명도 조건 (6)을 보면 혼합 파라미터로 표현되어 있는 것을 볼 수가 있다. 따라서 조건 (6)을 만족하는지를 확인하기 위해서는 이 혼합 파라미터들의 구체적인 형태를 알 필요가 있다.

이를 위해 원격조종 시스템을 위한 일반적 양방향 제어 구조(general bilateral control architecture) (Fig. 2)를 도입한다. 이 구조는 초기에 제안되었던 구조⁽³⁾에 로컬 힘 피드백이 추가된 형태⁽²⁾로 추가된 부분은 Fig. 2에 굵은 화살표로 표시되어 있다. 그리고 Fig. 2에 나타나는 각 파라미터에 대한 설명은 Table 1로 정리하였다.

Fig. 2를 통해 마스터와 슬레이브에 대한 다음과 같은 식을 얻을 수가 있다.

$$\begin{aligned} Z_m V_m &= F_m + \tau_m \\ &= F_m + (C_6 F_m - C_m V_m - C_4 V_s - C_2 F_s) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Z_s V_s &= \tau_s - F_s \\ &= (C_1 V_m + C_3 F_m - C_s V_s - C_5 F_s) - F_s \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 Z_m , Z_s 는 각각 마스터와 슬레이브의 임피던스를, 괄호 안의 부분은 각각 마스터, 슬레이브의 제어입력 τ_m , τ_s 를 나타낸다.

이제 각 혼합 파라미터들이 어떻게 표현되는지를 알아보자. Fig. 2의 관계를 통해 식 (7)과 (8)을 식 (2)와 결합하여 각 혼합 파라미터들을 구해보면 다음과 같이 나타낸다.

$$h_{11} = \frac{(Z_m + C_m)(Z_s + C_s) + C_1 C_4}{(1 + C_6)(Z_s + C_s) - C_3 C_4} \quad (9)$$

$$h_{12} = \frac{C_2(Z_s + C_s) - C_4(1 + C_5)}{(1 + C_6)(Z_s + C_s) - C_3 C_4} \quad (10)$$

$$h_{21} = -\frac{C_3(Z_m + C_m) + C_1(1 + C_6)}{(1 + C_6)(Z_s + C_s) - C_3 C_4} \quad (11)$$

$$h_{22} = \frac{(1 + C_5)(1 + C_6) - C_2 C_3}{(1 + C_6)(Z_s + C_s) - C_3 C_4} \quad (12)$$

여기서 각 혼합 파라미터들이 마스터와 슬레이브의 다이내믹스와 제어 파라미터들로 표현된 것을 볼 수 있다.

2.2.2 투명도 구현을 위한 파라미터 조건

이제부터 2.2.1의 결과를 통해 2 채널 제어 구조에서 투명도를 구현할 수 있는지를 알아본다. 이를 위해서는 우선 2 채널 제어 구조에 대해 좀 더 알 필요가 있다.

2 채널 제어 구조는 마스터-슬레이브가 채널을 통해 받는 F(힘, Force), P(위치, Position) 정보를 기준으로 4 가지로 분류할 수가 있는데 이는 각각 F-P, P-F, F-F, P-P 구조로 알려져 있다.⁽³⁾ 이제 각 구조들이 어떠한 파라미터 조건을 가질 경우에 투명도 구현이 가능한지를 알아보도록 한다.

① F-P 구조

F-P 구조를 Fig. 2의 제어 파라미터로 나타내보면 다음과 같은 경우가 된다.

$$C_3 = C_4 = 0 \quad (13)$$

투명도 구현 조건 (6)과 혼합 파라미터들에 관한 식 (9)-(12)를 구조에 따른 식 (13)을 이용하여 만족하는 조건을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} C_1 = Z_s + C_s \\ C_2 = 1 + C_6 \\ C_5 = -1 \\ C_m = -Z_m \end{cases} \quad (14)$$

결국 F-P 구조에서는 제어 파라미터가 식 (14) 과 같게 되면 투명도 조건을 만족하게 되어 투명도 구현이 가능하게 된다.

② P-F 구조

마찬가지로 P-F 구조로 인해 결정되는 제어 파라미터 조건은 다음과 같다.

$$C_1 = C_2 = 0 \quad (15)$$

앞서 F-P 구조에서 했던 바와 같이 투명도 조건을 만족하는 경우를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} C_3 = 1 + C_5 \\ C_4 = -(Z_m + C_m) \\ C_6 = -1 \\ C_s = -Z_s \end{cases} \quad (16)$$

결국 P-F 구조에서도 제어 파라미터가 식 (16) 와 같게 되면 투명도 조건을 만족하게 되어 투명도 구현이 역시 가능하게 된다.

③ P-P 구조

P-P 구조는 제어 파라미터로는 $C_2 = C_3 = 0$ 으로 표현된다. 이를 가지고 앞에서와 같은 방법으로 투명도 조건을 찾아보면 식 (10)에서 $h_2 = 0$ 이 되어 조건 (6)을 만족할 수 없게 되고, 따라서 P-P 구조를 통해 투명도를 구현하는 것은 불가능하다는 것을 알 수 있다.

④ F-F 구조

F-F 구조 역시 $C_1 = C_4 = 0$ 의 형태로 표현할 수 있다. 마찬가지로 투명도 조건을 찾아보면 식 (11)에서 $h_{21} = 0$ 이 되어 조건 (6)을 만족시킬 수 없다. 따라서 F-F 구조로도 투명도를 구현하는 것이 불가능하다.

결과를 정리해 보면 결국 2 채널 제어 구조로 투명도를 구현할 수가 있으며 이것이 가능한 구조는 F-P 구조와 P-F 구조가 된다. 또한 이 각각의 구조를 통해 투명도를 구현할 수 있는 제어 파라미터 조건은 (14)와 (16)으로 표현된다.

2.3 투명도 조건 고찰

다음은 2 절에서 얻은 결과를 기존의 투명도 구현 연구결과와 비교해 그 차이가 무엇인지를 살펴 보도록 한다. 기존에는 2 채널 제어 구조에서 투명도를 구현할 때 투명도 최적화 조건(transparency optimized control law) 에 따라 파라미터를 사용하였다.⁽⁶⁾ 이 경우 각각의 파라미터는 Table 2 에 정리되어 있다.

하지만 Table 2 의 (a)를 조건 (14)와, (b)를 조건 (16)과 비교해보면 (a), (b)의 조건이 부족하다는 것

Table 2 Existing conditions for transparency in two-channel control architectures

	F-P	P-F	P-P	F-F
조건	$C_1 = Z_m$	$C_1 = 0$	$C_1 = Z_m$	$C_1 = 0$
	$C_2 = 1 + C_6$	$C_2 = 0$	$C_2 = 0$	$C_2 = 1 + C_6$
	$C_3 = 0$	$C_3 = 1 + C_5$	$C_3 = 0$	$C_3 = 1 + C_5$
	$C_4 = 0$	$C_4 = -Z_m$	$C_4 = -Z_m$	$C_4 = 0$
	(a)	(b)	(c)	(d)

을 알 수 있다. 결국 (a)와 (b)의 조건만으로는 투명도 조건 (6)을 만족시키기 어렵게 된다. 또한 (c), (d)의 조건을 보면 이를 통해 투명도 조건 (6)을 만족시키는 것은 불가능한 것을 알 수 있다.

결국 기존의 연구결과로는 2 채널로 투명도를 구현하기에 그 조건이 부족하거나 구현 자체가 불가능하다는 것을 알 수 있다.

그리고 투명도 조건 (14), (16)에서 추가로 다음과 같은 의미를 찾을 수 있다.

- F-P 구조의 경우는 C_6, C_s 가, P-F 구조에서는 C_5, C_m 이 투명도 구현 조건 (14), (16)으로는 정해지지 않는 자유 파라미터가 된다.
- 조건 (14)와 (16) 모두에서 로컬 힘 피드백을 나타내는 파라미터인 C_5 와 C_6 가 사용되는 것을 볼 수 있다. 따라서 2 채널 제어 구조로 투명도를 구현하려면 로컬 힘 피드백을 사용해야 한다는 것을 알 수 있다.
- F-P 구조에서는 $C_6 = 0$ 으로 잡을 수 있고 이 때 식 (7), (8)에서 마스터와 슬레이브의 제어 입력에 마스터의 힘 F_m 이 포함되지 않는 형태로 투명도 구현이 가능하게 된다. 이 경우 마스터의 힘을 측정하는 힘센서가 필요하지 않다. 마찬가지로 P-F 구조에서는 $C_5 = 0$ 으로 잡을 수 있고 이 때 슬레이브의 힘을 측정하는 힘센서 없이 투명도 구현이 가능하다.
- 투명도 조건 (14), (16)에서 C_m (또는 C_s)를 $-Z_m$ (또는 $-Z_s$)으로 정하게 된다. 따라서 2 채널 제어 구조로 투명도를 구현하기 위해서는 마스터와 슬레이브의 임피던스 모델을 알아야 한다는 것을 알 수 있다.
- 위와 같이 C_m (또는 C_s)를 $-Z_m$ (또는 $-Z_s$)으로 정하는 의미는 결국 마스터와 슬레이브 머니플레이터의 다이내믹스를 상쇄시켜 투명도를 구현하고자 하는 것으로 볼 수 있다.

본 장에서는 2 채널 제어 구조로 투명도를 구현할 수 있는지의 여부를 살펴보고 투명도 구현을 위한 각 제어 파라미터의 조건을 알아보았다. 그리고 기존 연구와의 비교를 통해 기존 연구의 문제점을 보이고 조건의 의미를 고찰해 보았다.

이로서 2 채널 제어 구조에서 투명도 구현이 가능하다는 결론은 얻었다. 하지만 이는 이상적인 경우이고, 실제 구현할 시에 발생할 수 있는 문제들에 대한 고찰은 행해지지 않았다. 따라서 이러한 문제들에 대해 3장에서 자세히 다루고자 한다.

3. 실제 시스템에의 적용

3.1 임피던스 모델 추정 오차

앞서 2장에서 구한 2 채널 제어 구조를 통한 투명도 구현 방법을 실제 시스템에 적용하려면 고려할 사항들이 있다. 그 중에서 가장 중요한 문제로 임피던스 모델(impedance model) 추정의 어려움과 그 오차에 따른 영향을 들 수가 있다.

3.1.1 모델 추정 오차의 표현

2 채널 제어 구조를 통해 투명도 구현을 하기 위해서는 2.3에서도 언급한 바와 같이 마스터와 슬레이브의 임피던스 모델을 알아야 하며 이를 위해서는 모델 추정이 필요하다.

시스템의 파라미터를 구하여 모델을 추정하는 방법은 기존에 이미 많이 연구되어 있다.⁽⁶⁾ 하지만 어떤 방법을 사용하더라도 그 추정 과정이 복잡하고 많은 노력을 요구할 뿐더러 정확한 추정이 어려운 것이 사실이다.

따라서 이상적인 경우가 아니라면 모델 추정 오차는 어느 정도 존재할 수 밖에 없게 된다. 결국 이러한 모델 추정 오차가 미치는 영향을 분석하여 이 영향을 줄이는 방법을 알 필요가 있다.

본 논문에서 사용할 임피던스 모델 추정 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{cases} e_m = Z_m - \bar{Z}_m \\ e_s = Z_s - \bar{Z}_s \end{cases} \quad (17)$$

여기서 \bar{Z}_m , \bar{Z}_s 는 추정한 마스터, 슬레이브의 임피던스 모델이다.

일반적인 경우, 마스터와 슬레이브의 실제 임피던스와 추정한 임피던스는 안정하게 된다. 따라서 이 경우 식 (17)과 같은 모델 추정 오차 역시 안정하다고 볼 수 있다.

다음 항에서는 본 항에서 정의한 모델 추정 오차가 있을 경우 이것이 전체 시스템에 어떠한 영향들을 미치는지에 대해 살펴보도록 한다.

3.1.2 안정성 문제

모델 추정 오차가 없는 이상적인 경우에는 완전 투명도가 구현되어 식 (1)에 의해 전체 시스템은 환경과 같다고 볼 수 있다. 일반적인 경우 상호작용의 대상이 되는 환경은 안정하므로 전체 시스템은 안정하다고 볼 수 있다.

하지만 모델 추정 오차가 있는 경우는 이와 같이 간단하게 안정성을 보장할 수가 없으므로 안정성에 대한 분석이 필요하다.

원격조종 시스템에서 안정성을 분석할 때 기존의 경우 수동성(passivity)이나 절대안정성(absolute stability)과 같은 개념을 사용하였다.⁽⁸⁾ 두 개념은 안정하기 위한 충분 조건을 제공하지만, 실제 상황에서 이를 만족시키도록 보장하는 것은 어렵다.

예로 절대안정성의 경우를 생각해보자. 식 (2)와 같은 혼합 행렬 형태로 표현된 시스템의 절대안정 조건은 다음과 같이 나타난다.⁽⁶⁾

$$\begin{cases} h_{11}, h_{22} : \text{positive real,} \\ \eta_p(w) := -\frac{\Re\{h_{12}h_{21}\}}{|h_{12}h_{21}|} + 2\frac{\Re\{h_{11}\}\Re\{h_{22}\}}{|h_{12}h_{21}|} \geq 1 \\ \text{for all } w \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

여기서 $\Re\{\bullet\}$ 은 \bullet 의 실수 값을 의미한다.

절대안정조건 (18)을 만족하기 위해서는 $\eta_p(w)$ 가 단조증가함수여야 한다. 하지만 실제 상황에서 식 (9)-(12)를 통해 $\eta_p(w)$ 는 단조증가함수가 아니라는 것을 알 수 있으며, 이는 결국 절대안정성을 보장하기가 어렵다는 것을 의미한다. 그리고 이 결과로 절대안정성의 충분조건이라 할 수 있는 수동성 역시 보장하기 어렵다는 것을 알 수 있다.

이와 같은 이유로 본 논문에서는 안정성 분석을 위해 전체 시스템의 전달함수(transfer function)를 이용한다. 이 방법은 기존의 인과성(causality) 분석 연구에서도 사용한 바가 있다.⁽⁹⁾

우선 F-P 구조의 경우를 생각해본다. Fig. 2와 같은 시스템에서 F-P 구조 조건 (13)을 적용했을 때의 전체 시스템을 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\frac{F_h}{V_h} = \frac{Z_{cm}[Z_{cs} + (1+C_5)Z_e] + C_1C_2Z_e}{(1+C_6)[Z_{cs} + (1+C_5)Z_e]} \quad (19)$$

여기서 $Z_{cm} = Z_m + C_m$, $Z_{cs} = Z_s + C_s$ 이다.

이제 Z_m , Z_s 대신 \bar{Z}_m , \bar{Z}_s 을 사용하여 모델 추정을 고려한 투명도 조건 (14)를 식 (19)에 적용하여 전달함수를 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{F_h}{V_h} = \frac{(\bar{Z}_{cs} + e_s)e_m + (1+C_6)\bar{Z}_{cs}Z_e}{(1+C_6)(\bar{Z}_{cs} + e_s)} \quad (20)$$

$$\text{or } \frac{V_h}{F_h} = \frac{(1+C_6)(\bar{Z}_{cs} + e_s)}{(\bar{Z}_{cs} + e_s)e_m + (1+C_6)\bar{Z}_{cs}Z_e} \quad (21)$$

여기서 $\bar{Z}_{cs} = \bar{Z}_s + C_s$ 이다.

일반적인 경우 Z_e 와 e_m , e_s 는 안정하므로 식 (20), (21)의 전달함수가 안정하려면 $1+C_6$ 와 \bar{Z}_{cs} 가 안정해야 한다는 것을 알 수 있다.

마찬가지 방법으로 P-F 구조에서의 전체 시스템의 전달함수를 구해보면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{F_h}{V_h} = \frac{(\bar{Z}_{cm} + e_m)[e_s + (1+C_5)Z_e]}{(1+C_5)\bar{Z}_{cm}} \quad (22)$$

$$\text{or } \frac{V_h}{F_h} = \frac{(1+C_5)\bar{Z}_{cm}}{(\bar{Z}_{cm} + e_m)[e_s + (1+C_5)Z_e]} \quad (23)$$

여기서 $\bar{Z}_{cm} = \bar{Z}_m + C_m$ 이다.

역시 Z_e 와 e_m , e_s 는 안정하므로 전달함수 식 (22), (23)이 안정하기 위해서는 $1+C_5$ 와 \bar{Z}_{cm} 이 안정해야 한다는 것을 알 수 있다.

3.1.3 투명도 문제

다음은 모델 추정 오차에 의해 투명도는 어떻게 변하는지를 생각해본다. 이상적인 경우와 다르게 모델 추정 오차가 있는 경우에는 완전 투명도를 구현할 수 없다.

모델 추정 오차의 영향을 보기 위해 3.1.2 에서 구한 전체 원격조종 시스템의 전달함수를 이용한다. 이를 통해 그 영향을 쉽게 확인할 수 있다.

우선 F-P 구조를 생각해본다. F-P 구조에서의 전체 시스템의 전달함수 중 식 (20)를 정리해 보면 다음과 같다.

$$\frac{F_h}{V_h} = Z_e + \left[\frac{e_m}{1+C_6} - \frac{e_s Z_e}{\bar{Z}_s + C_s + e_s} \right] \quad (24)$$

식 (24)로부터 모델 추정 오차로 인해 생기는 부분을 쉽게 판별할 수 있는데 이는 대괄호 안의 부분으로 나타난다. 이 부분의 영향을 줄여 좋은 투명도를 얻기 위해서는 결국 C_6 와 C_s 의 크기 (magnitude) 가 커야 한다는 것을 알 수 있다.

마찬가지로 P-F 구조의 경우는 식 (22)의 전달함수를 통해 투명도를 살펴본다. 식 (22)를 변형시켜보면 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{F_h}{V_h} = Z_e + \left[\frac{e_m Z_e}{\bar{Z}_m + C_m} + \frac{(\bar{Z}_{cm} + e_m)e_s}{(1+C_5)(\bar{Z}_m + C_m)} \right] \quad (25)$$

역시 식 (25)의 대괄호 안의 부분이 모델 추정 오차로 인한 영향이다. 따라서 투명도를 개선하기 위해서는 C_5 와 C_m 의 크기가 커져야 한다.

3.1.4 제어 파라미터의 선정 조건

이제 3.1.2, 3.1.3 항을 통해 분석된 결과를 정리해보도록 한다. 이는 다음과 같다.

- 2 채널 제어 구조를 통해 투명도를 구현하고자 할 때 모델 추정 오차에 의해 안정성과 투명도 2 가지 측면에서 문제가 생길 수 있다.
- 모델 추정 오차의 영향을 줄이기 위한 제어 파라미터의 선정 조건은 다음과 같다.

① F-P 구조

$$\begin{cases} \bar{Z}_s + C_s : \text{안정함} \\ 1 + C_6 : \text{안정함} \end{cases} \quad (26)$$

가급적 큰 크기의 C_6 , C_s (27)

② P-F 구조

$$\begin{cases} \bar{Z}_m + C_m : \text{안정함} \\ 1 + C_5 : \text{안정함} \end{cases} \quad (28)$$

가급적 큰 크기의 C_5 , C_m (29)

- 위 선정 조건은 2.3 절에서 언급된 자유 파라미터들로 구성된 것을 알 수가 있다. 결국 선정 조건 (26)-(29)는 모델 추정 오차의 영향을 줄이는 의미 외에도 자유 파라미터들의 선정 조건을 제시해주는 의미 또한 가지고 있다.
- 2.3 절에서 언급했던 힘센서를 사용을 줄이기 위한 방법은 C_5 또는 $C_6 = 0$ 이어야 하므로 조건 (29) 또는 (27)를 만족시키기 어렵다. 결국 이상적인 경우에는 하나의 힘센서만으로 투명도 구현이 가능하나, 모델 추정 오차가 있는 현실적인 경우에는 이 방법으로는 투명도 구현이 어렵다는 것을 알 수 있다.

본 절에서는 모델 추정 오차에 의한 영향에 대한 고찰을 통해서 크게 안정성과 투명도 측면에서 그 영향이 있다는 것을 알았다. 또한 이 영향을 줄이는 제어 파라미터 선정 조건을 구체적으로 구하고 그 의미를 정리하였다.

하지만 3.1.1 에서도 언급한 바와 같이 모델 추정은 꼭 필요하며 그 과정 자체가 어렵다는 사실은 변하지 않았다. 따라서 다음 절에서는 이 문제를 해결할 수 있는 방안을 모색하고자 한다.

3.2 제어기의 도입

본 절에서는 모델 추정의 문제점을 해결하여 실제 시스템에 투명도 구현 방법을 보다 쉽게 적용하고자 시간지연을 이용한 제어기(Time Delay Control : TDC) 에 기반한 혼합 제어 법칙(hybrid control law) 을 도입한 것에 대해 기술하고자 한다.

본 논문의 대상이 되는 양방향 원격조종 시스템의 경우는 마스터, 슬레이브가 다자유도 로봇

머니플레이터 형태인 경우가 대부분이다. 그리고 양방향 제어 구조 중에서도 특히 2 채널 F-P, P-F 제어 구조를 그 대상으로 하고 있으므로 위치와 힘의 혼합 제어의 형태가 필요하다.

많은 제어기 중 TDC는 시간지연추정(time delay estimation)이라는 방법을 이용하여 미지의 비선형 동역학 및 예측할 수 없는 외란을 추정하는 제어 기법이다. 이 제어기법은 시간지연추정을 이용하기 때문에 플랜트에 대한 작은 정보만으로도 제어가 가능하게 된다.⁽¹⁰⁾ 따라서 TDC를 도입하면 모델 추정을 따로 하지 않고도 제어가 가능하므로 모델 추정 과정에서의 문제점을 해결할 수 있다.

또한 TDC에 기반한 혼합 제어기는 TDC를 위치와 힘 혼합 제어 형태로 확장한 것으로 TDC의 장점을 그대로 가지고 있으며 로봇 매니플레이터에 대한 성능이 입증되어 있어⁽¹¹⁾ 본 연구에서 대상으로 하는 시스템에 적용하기에 적합한 제어기라 할 수 있다. 이러한 점들을 고려하여 TDC를 이용한 혼합 제어기를 도입하게 되었다.

3.2.1 TDC에 기반한 혼합 제어 법칙

이제는 본 연구에서 도입한 TDC를 이용한 혼합 제어 법칙에 대해 간단히 살펴보도록 한다.⁽¹¹⁾ 이 제어 기법은 직교 공간(cartesian space)에서 유도되었다.

우선 로봇의 동역학 식은 다음과 같다.

$$\mathbf{F}_u = \mathbf{M}_x(\boldsymbol{\theta})\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{V}_x(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{G}_x(\boldsymbol{\theta}) + \mathbf{F}_{\text{dist}} \quad (30)$$

여기서 $\mathbf{x} \in \mathcal{R}^m$ 는 위치 벡터, $\boldsymbol{\theta} \in \mathcal{R}^n$ 는 조인트 벡터, $\mathbf{F}_u \in \mathcal{R}^m$ 는 제어입력 벡터, $\mathbf{M}_x \in \mathcal{R}^{m \times m}$ 는 직교좌표에서의 관성행렬(inertia matrix), $\mathbf{V}_x \in \mathcal{R}^m$ 는 코리올리(coriolis)력과 원심(centrifugal)력 벡터, $\mathbf{G}_x \in \mathcal{R}^m$ 는 중력 벡터, $\mathbf{F}_{\text{dist}} \in \mathcal{R}^m$ 는 마찰력이나 기타 외란에 의한 힘 벡터를 나타낸다.

이에 $\mathbf{M}_x(\boldsymbol{\theta})$ 에 기준하여 선정되는 상수 행렬 $\bar{\mathbf{M}}_x \in \mathcal{R}^{m \times m}$ 를 도입하면 식 (30)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{F}_u = \bar{\mathbf{M}}_x \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) \quad (31)$$

여기서 $\mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})$ 는 로봇의 모든 비선형 항과 외란 등을 포함하며 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{H} = (\mathbf{M}_x - \bar{\mathbf{M}}_x)\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{V}_x + \mathbf{G}_x + \mathbf{F}_{\text{dist}} \quad (32)$$

그리고 충분히 작은 L 이라면 식 (31)을 통해서 다음과 같은 가정이 성립된다.

$$\mathbf{H} \cong \mathbf{H}(t-L) \cong \mathbf{F}_u(t-L) - \bar{\mathbf{M}}_x \ddot{\mathbf{x}}(t-L) \quad (33)$$

이 식 (33)은 시간지연추정을 나타내고 있다.

한편 원하는 폐회로(closed loop) 시스템의 오차 동역학(error dynamics)은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \mathbf{S}[(\ddot{\mathbf{x}}_d - \ddot{\mathbf{x}}) + \mathbf{K}_v(\dot{\mathbf{x}}_d - \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{K}_p(\mathbf{x}_d - \mathbf{x})] = \mathbf{0} \\ (\mathbf{I} - \mathbf{S})[(\ddot{\mathbf{F}}_d - \ddot{\mathbf{F}}) + \mathbf{K}_{vf}(\dot{\mathbf{F}}_d - \dot{\mathbf{F}}) + \mathbf{K}_{pf}(\mathbf{F}_d - \mathbf{F})] = \mathbf{0} \end{cases} \quad (34)$$

여기서 $\mathbf{x}_d \in \mathcal{R}^m$ 와 $\mathbf{F}_d \in \mathcal{R}^m$ 는 원하는 위치와 힘 벡터, $\mathbf{K}_v, \mathbf{K}_p, \mathbf{K}_{vf}, \mathbf{K}_{pf} \in \mathcal{R}^{m \times m}$ 는 각각의 게인 행렬, $\mathbf{S} \in \mathcal{R}^{m \times m}$ 는 선택 행렬⁽¹¹⁾이다.

식 (31), (33), (34)를 연립하면 다음과 같은 혼합 제어 법칙이 유도된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_u &= \bar{\mathbf{M}}_x \mathbf{S}[\ddot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{K}_v(\dot{\mathbf{x}}_d - \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{K}_p(\mathbf{x}_d - \mathbf{x})] \\ &+ \bar{\mathbf{M}}_x (\mathbf{I} - \mathbf{S}) \mathbf{K}_c^{-1} [\ddot{\mathbf{F}}_d + \mathbf{K}_{vf}(\dot{\mathbf{F}}_d - \dot{\mathbf{F}}) + \mathbf{K}_{pf}(\mathbf{F}_d - \mathbf{F})] \quad (35) \\ &+ \mathbf{F}_u(t-L) - \bar{\mathbf{M}}_x [\mathbf{S}\ddot{\mathbf{x}}(t-L) + (\mathbf{I} - \mathbf{S})\mathbf{K}_c^{-1}\ddot{\mathbf{F}}(t-L)] \end{aligned}$$

식 (35)는 환경을 강성(stiffness)으로 볼 수 있다는 가정 하에서 유도된 것으로, $\mathbf{K}_c \in \mathcal{R}^{m \times m}$ 는 환경의 강성 행렬이 된다.

3.2.2 제어 파라미터와의 비교

이제부터는 3.1 절까지 다루었던 제어 파라미터들로 이루어진 식 (7), (8)과 같은 제어기와 TDC에 기반한 혼합 제어 법칙 (35)을 비교해본다. 이를 통해 도입된 제어기를 사용할 경우 각 제어 파라미터들이 어떻게 표현되는지를 알아내어 2장에서 결정된 투명도 구현 조건을 만족할 수 있는지를 검증해 보도록 한다.

TDC에 기반한 혼합 제어 법칙을 보면 다자유도 형태이고 원격조종 제어기 형태와는 차이가 있어 직접적인 비교는 어려움이 있다. 따라서 제어 파라미터와의 직접적인 비교를 위해서는 제어 법칙 (35)의 형태를 변환하여 비교해야 한다.

제어 법칙 (35)를 1 자유도로 간략화하면서 마스터와 슬레이브를 따로 생각하는 형태로 변환하면 $\mathbf{x}, \mathbf{x}_d, \mathbf{F}, \mathbf{F}_d$ 는 마스터의 경우 스칼라 값인 x_m, x_s, F_m, F_s 로 표현되고 슬레이브의 경우는 반대로 x_s, x_m, F_s, F_m 으로 표현된다.

그리고 선택 행렬 \mathbf{S} 의 경우는 1 자유도 해석을 위해 스칼라 값으로 정해주어야 한다. \mathbf{S} 는 위치 제어와 힘 제어를 선택하는 역할을 하므로 제어 구조에 따라 F-P 구조에서는 마스터는 $\mathbf{S}=0$, 슬레이브는 $\mathbf{S}=1$ 으로, P-F 구조에서는 반대로 마스터는 $\mathbf{S}=1$, 슬레이브는 $\mathbf{S}=0$ 으로 표현된다. 이러한 과정을 거친 F-P 구조에서의 제어 법칙 (35)의 변형된 형태는 다음과 같다.

$$\tau_m = \frac{\bar{M}_m}{k_e} [\ddot{F}_s + k_{vf}(\dot{F}_s - \dot{F}_m) + k_{pf}(F_s - F_m)] + \tau_m(t-L) - \frac{\bar{M}_m}{k_e} \ddot{F}_m(t-L) \tag{36}$$

$$\tau_s = \bar{M}_s[\ddot{x}_m + k_v(\dot{x}_m - \dot{x}_s) + k_p(x_m - x_s)] + \tau_s(t-L) - \bar{M}_s \ddot{x}_s(t-L) \tag{37}$$

여기서 k_v , k_p , k_{vf} , k_{pf} 는 각 계인, \bar{M}_m , \bar{M}_s 는 추정 관성 수치, k_e 는 환경의 강성치이다.

이제 기존 제어 파라미터와의 비교를 위해 마스터와 슬레이브의 동역학 관계를 사용한다. 동역학 식 (7), (8)을 제어입력에 관한 식으로 표현해 식 (36), (37)에 각각 적용하여 정리한 뒤 라플라스 변환(laplace transform)을 거친다. 이러한 과정을 통해 최종적으로 정리된 F-P 구조에서의 TDC에 기반한 혼합 제어 법칙은 다음과 같다.

$$\tau_m = [-\frac{\bar{M}_m}{k_e}(e^{-Ls}s^2 + k_{vf}s + k_{pf}) + e^{-Ls}]F_m + [e^{-Ls}Z_m]V_m + [\frac{\bar{M}_m}{k_e}(s^2 + k_{vf}s + k_{pf})]F_s \tag{38}$$

$$\tau_s = [\bar{M}_s(s + k_v + \frac{k_p}{s})]V_m - [\bar{M}_s(e^{-Ls}s + k_v + \frac{k_p}{s}) - e^{-Ls}Z_s]V_s + [e^{-Ls}]F_s \tag{39}$$

이제 식 (38), (39)와 식 (7), (8)의 제어입력 부분을 비교해보면 각 제어 파라미터가 어떻게 표현되는지를 알 수 있다. 그 결과는 다음과 같다.

$$C_2 = -\frac{\bar{M}_m}{k_e}(s^2 + k_{vf}s + k_{pf}) \tag{40}$$

$$C_6 = -\frac{\bar{M}_m}{k_e}(e^{-Ls}s^2 + k_{vf}s + k_{pf}) - e^{-Ls} \tag{41}$$

$$C_m = -e^{-Ls}Z_m \tag{42}$$

$$C_1 = \bar{M}_s(s + k_v + \frac{k_p}{s}) \tag{43}$$

$$C_s = \bar{M}_s(e^{-Ls}s + k_v + \frac{k_p}{s}) - e^{-Ls}Z_s \tag{44}$$

$$C_5 = -e^{-Ls} \tag{45}$$

여기서 TDC에서의 시간지연 L 이 매우 작다고 가정하면 $e^{-Ls} \approx 1$ 로 볼 수 있으므로 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

• 식 (43), (44) $\rightarrow C_1 = Z_s + C_s$

• 식 (40), (41) $\rightarrow C_2 = 1 + C_6$

• 식 (45) $\rightarrow C_5 = -1$

• 식 (42) $\rightarrow C_m = -Z_m$

이 관계는 결국 F-P 구조에서의 투명도 구현 조건 (14)와 같다. 따라서 이 결과로 시간지연 L 이 충분히 작은 경우 TDC에 기반한 혼합 제어 법칙을 도입하여 2 채널 F-P 제어 구조에서 투명도 구현이 가능하다는 것을 알 수 있다. 그리고 이는 P-F 구조에서도 마찬가지로 성립한다.

3.2.3 제어기의 계인 선정 조건

앞서 3.2.2의 결론은 시간지연이 충분히 작은 경우에 성립하는 것으로, 만일 시간지연 L 이 작지 않다면 구현 시에 문제가 생길 수 있다.

이를 TDC의 관점에서 생각해보자. TDC에서 시간지연이 커진다는 것은 예측할 수 없는 모델을 추정하기 위해 사용하는 시간지연추정의 오차가 점점 커진다는 것을 의미한다.⁽¹⁰⁾ 이는 결국 3.1절에서 분석했던 모델 추정 오차가 점차 커지게 되는 것과 비슷한 의미가 된다.

따라서 3.1절에서 모델 추정 오차의 영향을 줄이기 위해 제시되었던 제어 파라미터의 선정 조건이 TDC에 기반한 혼합 제어 법칙을 사용할 경우 어떻게 되는지를 보면 시간지연이 커짐으로 인해 생기는 영향을 줄이는 제어기의 계인 선정에 도움이 될 수 있다.

예로 F-P 구조인 경우를 생각해보자. 3.1.4에서 안정성에 관한 조건 (26)를 식 (41)을 통해 생각해 보면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\text{if } \bar{M}_m > 0, \quad k_e < 0 \tag{46}$$

이는 안정하기 위해서는 강성 행렬의 값이 음의 부호를 가져야 한다는 것을 의미한다.

또한 식 (41), (44)에서 C_6 가 \bar{M}_m , C_s 가 \bar{M}_s 에 의해 그 크기가 결정되는 것을 알 수 있으므로, 이를 이용하여 앞서 정리한 3.1.4의 투명도 조건 (27)을 다음과 같이 재구성할 수 있다.

$$\text{가급적 큰 크기의 } \bar{M}_m, \bar{M}_s \tag{47}$$

이 조건 (47)은 시간지연에 의한 영향을 줄여 투명도를 향상시키기 위해 마스터와 슬레이브 각각의 \bar{M} 를 가급적 크게 잡는 것이 필요하다는 것을 의미한다.

P-F 구조의 경우 역시 비슷한 과정을 거치면 C_5 가 \bar{M}_s , C_m 이 \bar{M}_m 에 의해 크기가 결정된다는 사실을 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

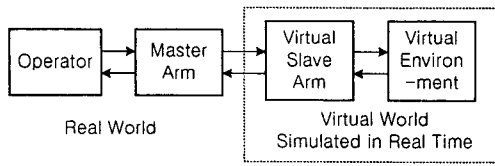


Fig. 3 Experiment Structure for 4.1

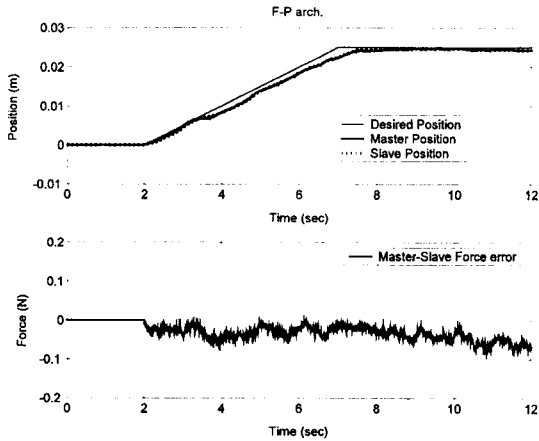


Fig. 4 Experiment result (F-P architecture)

$$\text{if } \bar{M}_s > 0, \quad k_e > 0 \quad (48)$$

$$\text{가급적 큰 크기의 } \bar{M}_s, \bar{M}_m \quad (49)$$

이로서 TDC 에 기반한 혼합 제어 법칙을 사용해 2 채널 제어 구조로 투명도를 구현할 경우 안정성을 위해 강성 행렬 K_e 의 부호를 제어 구조에 맞게 정해주어야 하며, 좋은 투명도 구현을 위해 안정한 범위 내에서 마스터와 슬레이브의 \bar{M} 계인을 키워야 한다는 것을 알 수 있다.

4. 실험

4.1 파라미터 조건 검증 실험

이번 장에서는 앞서 2 장과 3 장에서 얻어진 결과들을 실험을 통해 검증하고자 한다. 이를 위해서 Fig. 3 과 같은 실험 장치를 구성하였다.

실험 장치 중 마스터는 끝부분에 힘 센서가 부착된 팬텀(PHANTOM) 형 마스터를 사용하였다. [Fig. 9(a)] 그리고 가상 슬레이브와 가상 환경은 실시간 운영체제(real time OS) 인 QNX 의 제어 프로그램 내에서 4 차 룬지-쿠타(runge-kutta) 방법으로 구현하였다.

실험은 1 자유도로 수행되었고 제어기는 Fig. 2 의 형태에서 식 (7), (8)과 같은 형태로 F-P, P-F 제어 구조를 구현하였다. 전체 제어기는 $L=0.001$ 초의 샘플링 시간(sampling time) 으로 구동하였으며

Table 3 Impedance Model Parameters

	질량(kg)	댐퍼(Ns/m)	스프링(N/m)
마스터	0.05	0.01	0.30
가상 슬레이브	6.0	48.0	96.0
가상환경	1.0	10.0	18.0

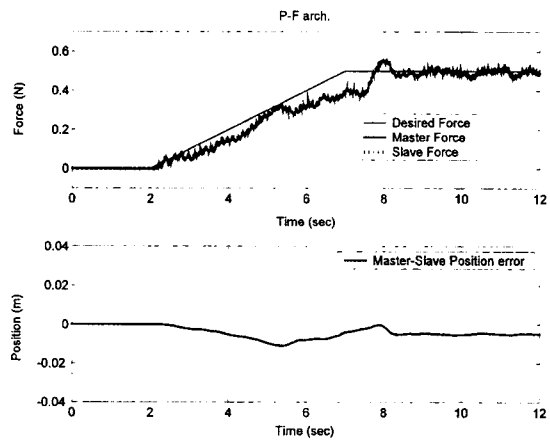


Fig. 5 Experiment result (P-F architecture)

실험에 사용된 추정된 마스터의 임피던스 파라미터와 임의로 정해 준 가상 슬레이브, 환경의 임피던스 모델 파라미터는 Table 3 에 정리하였다.

실험은 실시간으로 화면에 디스플레이되는 위치 또는 힘 궤적을 마스터의 위치 또는 힘이 따라가도록 하는 목표에 따라 작업자가 마스터를 움직이는 방법으로 수행되었다.

4.1.1 투명도 구현 조건

우선 2 장에서 구한 2 채널 제어 구조에서의 투명도 구현 조건을 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 먼저 F-P 구조로 투명도 구현 조건 식 (14)를 만족시키도록 제어 파라미터를 구성하여 실험한 결과는 Fig. 4 와 같다.

실험 결과 마스터의 움직임을 슬레이브가 잘 따라가고 있고 마스터와 슬레이브에서의 힘 오차도 매우 작은 것을 알 수 있다. 결국 F-P 구조에서 투명도 구현이 잘 이루어지는 것을 알 수 있다.

P-F 구조 역시 투명도 구현 조건 식 (16)을 만족하도록 제어 파라미터를 구성하여 실험하였다. 그 결과는 Fig. 5 와 같다.

실험 결과 역시 마스터의 힘과 움직임을 슬레이브가 잘 따라가는 것으로 보아 P-F 구조에서도 투명도 구현이 잘 이루어지는 것을 알 수 있다. 다만 그 오차가 F-P 구조 실험에 비해 약간 큰 것을 볼 수 있는데 이는 주어진 힘 궤적을 따라가는 것이 위치를 따라가는 것에 비해 비교적 어렵기

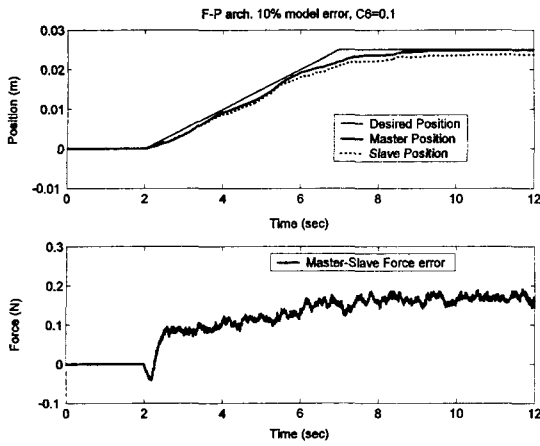


Fig. 6 Experiment result (F-P, model error, small C_6)

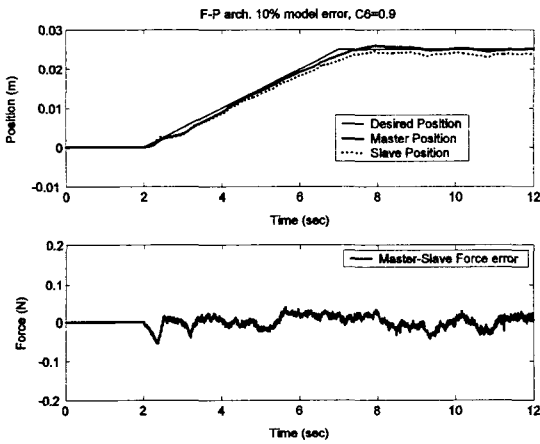


Fig. 7 Experiment result (F-P, model error, large C_6)

때문으로 생각된다.

결국 본 실험의 결과를 통해 2 장에서 밝힌 2 채널에서의 투명도 구현 조건이 성립한다는 것을 확인할 수가 있다.

4.1.2 모델 추정 오차의 영향을 줄이는 조건

다음은 3 장에서 얻은 모델 추정 오차의 영향을 줄이는 조건을 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 이를 위해 슬레이브에 모델 추정 오차가 있는 경우를 생각하였다.

모델 추정 오차로 인한 영향을 줄이기 위한 조건은 식 (22)~(25)에 나타나 있다. 본 실험에서는 그 중에서도 F-P 구조에서 투명도 향상에 영향을 미치는 C_6 의 조건을 그 대상으로 하였다.

먼저 투명도 구현 조건을 만족시키는 F-P 구조에서 10% 모델 추정 오차가 있는 파라미터를 사용하고 $C_6=0.1$ 인 경우의 실험을 수행하였다. 그

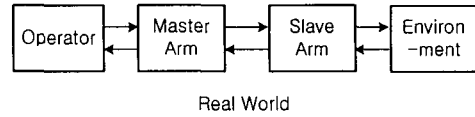
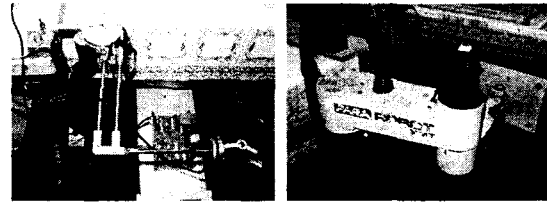


Fig. 8 Experiment Structure for 4.2 Exp.



(a) Master (b) Slave
Fig. 9 Master, Slave and Environment

결과는 Fig. 6 과 같다.

실험 결과 마스터의 움직임과 슬레이브의 움직임에 차이가 보이고 힘 오차 역시 큰 것으로 보아 투명도가 구현되지 못하는 것을 알 수 있다.

F-P 구조에서 모델 추정 오차의 영향을 줄여 투명도를 향상시키기 위해서는 식 (23)에 따라 C_6 가 커지는 것이 좋다. 이를 적용해 $C_6=0.9$ 로 바꾸고 실험을 수행한 결과는 Fig. 7과 같다.

실험 결과 C_6 가 커지면서 힘 오차와 투명도 측면에서 큰 향상을 보이는 것을 알 수 있다.

이 밖에도 F-P 구조에서 C_5 의 크기를 크게 하는 것 역시 마찬가지로의 결과를 얻을 수 있다. 그리고 P-F 구조에서도 식 (25)에 의해 C_5 , C_m 의 크기가 커짐으로서 모델 추정 오차로 인해 발생하는 투명도 저하를 줄이는 결과를 얻을 수 있다.

결국 본 실험을 통해서 3 장에서 제시했던 모델 추정 오차의 영향을 줄이는 조건이 투명도 측면에서 성립한다는 것을 알 수 있다.

4.2 실제 시스템 적용 실험

앞서 4.1의 실험을 통해 본 논문의 2장과 3장에서 얻어진 결과들이 잘 작동한다는 것을 알 수 있었다. 하지만 이 실험으로는 실제 시스템을 통한 구현이라고 말하기는 어렵다.

따라서 본 절에서는 2 채널 제어 구조를 통해 다자유도 실제 시스템에서 투명도를 구현하는 실험을 수행하여 본 논문의 결과를 검증하도록 한다. 이를 위해 실험 장치를 Fig. 8과 같이 구성하였다.

여기서 마스터는 4.1의 실험에서 사용한 것과 동일한 2 자유도 PHANTOM 형 장치를 사용하였고 [Fig. 9(a)], 슬레이브는 끝단에 물러와 힘센서가 부

Table 4 Gains of the Controller for 4.2 Exp.

계 인	
공통	$\bar{M}_r = \mathbf{J}^T \bar{M}(\theta) \mathbf{J}^{-1}, \mathbf{K}_r = \begin{pmatrix} -10000 & 0 \\ 0 & 10000 \end{pmatrix}$
마스터	$\bar{M}_m(\theta) = \begin{pmatrix} 0.0005 & 0 \\ 0 & 0.0005 \end{pmatrix}, \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
	$\mathbf{K}_v = \begin{pmatrix} 60 & 0 \\ 0 & 60 \end{pmatrix}, \mathbf{K}_p = \begin{pmatrix} 900 & 0 \\ 0 & 900 \end{pmatrix}$
슬레이브	$\bar{M}_s(\theta) = \begin{pmatrix} 0.0070 & 0 \\ 0 & 0.0010 \end{pmatrix}, \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$
	$\mathbf{K}_v = \begin{pmatrix} 20 & 0 \\ 0 & 20 \end{pmatrix}, \mathbf{K}_p = \begin{pmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{pmatrix}$

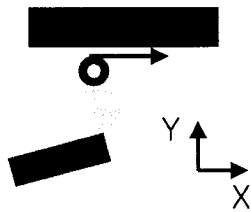
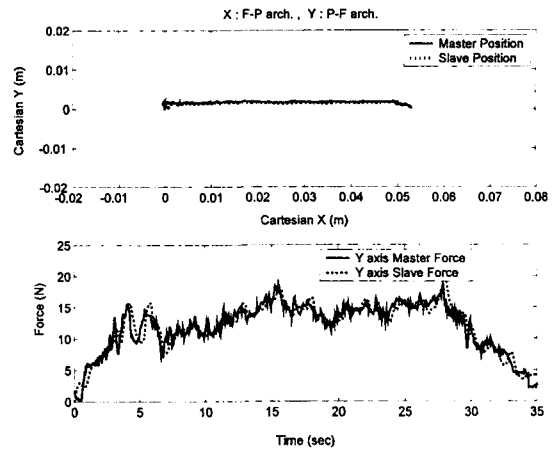


Fig. 10 Rolling the wall

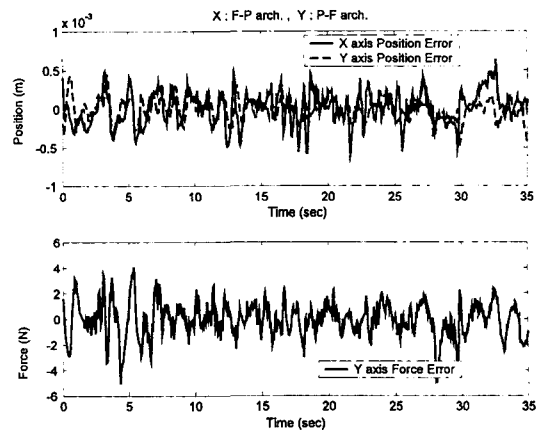
착되어 있는 2 자유도 SCARA 형의 로봇을 사용하였다. [Fig. 9(b)] 그리고 환경으로는 강성(stiffness)이 대략 10000 (N/m) 정도인 실리콘 벽을 사용하였다. [Fig. 9(b)]

본 실험에서의 제어기는 3.2.1 의 (35)의 형태인 TDC 에 기반한 혼합 제어 법칙을 사용하였다. 이 제어기는 3.2.2 의 결과로 본 실험에 사용 가능함이 판명되었으며 또한 쉽게 적용이 가능하였다. 제어기는 0.01 초의 샘플링 시간으로 구동되었고 사용한 각 계인은 Table 4 와 같다. 계인을 선정할 때 3.2.3 의 식 (46), (48)의 결과로 강성 행렬 \mathbf{K}_e 의 부호를 결정하였고, 조건 (47), (49)를 토대로 안정한 범위 내에서 가급적 큰 \bar{M} 을 사용하였다.

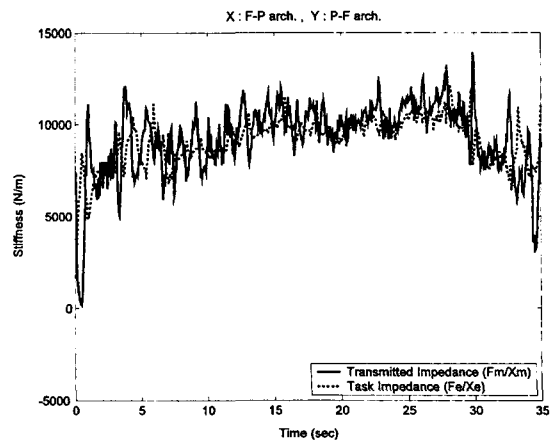
실험은 투명도 구현 여부를 확인하고자 Fig. 10 과 같은 벽 옮기기를 수행하였다. 작업의 특성상 X 축 방향은 위치 제어가 중요하므로 2 채널 제어 구조 중 F-P 구조를, Y 축 방향은 힘 제어가 중요하므로 이에 유리한 P-F 구조를 각각 사용하였다.



(a) X-Y plot, Master/Slave Force



(b) Position / Force Error



(c) Transparency

Fig. 11 Experiment result (Rolling the wall)

이러한 조건을 통해 실험을 수행한 결과는 Fig. 11 과 같다. 실험 결과를 보면 Fig. 11(a)에서 마스

터의 위치와 힘을 슬레이브가 잘 따라가면서 벽 훑기가 잘 수행된 것을 볼 수 있다. Fig. 11(b)에는 마스터와 슬레이브 사이의 위치와 힘 오차가 나타나 있는데 위치 오차에 비해 힘 오차가 크게 나타난다. 이는 힘센서에 의한 노이즈(noise)가 원인으로 생각된다. 그리고 Fig. 11(c)에서 작업자에게 전달되는 임피던스(F_m/X_m)와 작업 임피던스(F_e/X_e)를 보면 두 값이 비슷하게 나타나는 것을 통해 투명도가 잘 구현된다는 것을 알 수 있다. 또한 결과의 임피던스 값이 실제 사용한 환경인 실리콘 벽의 강성 10000 (N/m) 정도로 나오는 것으로 보아 본 결과가 올바른 것임을 예상할 수 있다.

결국 이 실험 결과로 TDC에 기반한 혼합 제어 법칙을 사용하여 2 채널 제어 구조에서 투명도 구현이 가능하다는 것을 실제로 확인할 수 있었다.

본 장에서는 2장에서 보인 2 채널 제어 구조를 사용한 투명도 구현 조건과 3장에서 제시한 실제 시스템에의 적용 방법들을 실험을 통해 검증하였다. 실험 결과 투명도 구현이 가능하였고 파라미터 선정 조건에 따른 모델 추정 오차를 줄이는 성능 역시 입증되었다. 그리고 TDC에 기반한 혼합 제어 법칙을 사용함으로써 본 방법을 실제 시스템에도 쉽게 적용 가능하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 중요한 성능지수인 투명도에 있어서 2 채널 제어 구조를 사용하여 이를 구현하는 방법에 대해 다루었다. 우선 2 채널 제어 구조를 통해 투명도가 구현 가능하다는 사실을 알아내었다. 분석 결과 2 채널 제어 구조 중에서도 F-P, P-F 구조인 경우에 투명도 구현이 가능하였으며 이에 따른 각각의 투명도 구현 조건을 밝혔다.

다음은 이러한 투명도 구현 방법의 실제 적용에 있어서 문제가 될 수 있는 요인인 모델 추정과 그 오차에 대한 문제를 다루었다. 먼저 모델 추정 오차가 있는 경우의 영향을 안정성과 투명도 관점에서 분석하고 그 영향을 줄이는 방법을 제시하였다. 또한 모델 추정의 어려움 해결을 위해 TDC에 기반한 혼합 제어를 도입하여 이를 통한 투명도 구현 가능성과 계인 선정 기준에 대해 살펴보았다.

마지막으로 본 연구 결과의 검증을 위한 실험을 수행하였다. 먼저 2 채널 제어 구조를 사용한 투명도 구현 조건과 모델 추정 오차를 줄이기 위한 조건을 검증하였다. 그리고 실제 시스템에 이를 적용하여 벽 훑기를 구현함으로써 본 연구에서 제시한 방법이 잘 작동한다는 것을 보였다.

결국 2 채널 제어 구조를 사용하여 투명도 구현

이 가능하며 실제 구현에 있어서 발생할 수 있는 문제점 또한 해결이 가능하다. 그리고 TDC에 기반한 혼합 제어를 사용하면 쉽게 실제 시스템에 적용 가능하면서도 좋은 투명도를 구현할 수 있다는 장점을 가지게 된다.

참고문헌

- (1) Raju, G. J., Verghese, G. C., and Sheridan, T. B., 1989, "Design Issues in 2-Port Network Models of Bilateral Remote Manipulation," *IEEE Int. Conference on Robotics and Automations*, pp. 1316~1321.
- (2) Hashtrudi-Zaad, K. and Salcudean, S. E., 2002, "Transparency in Time-Delayed Systems and the Effect of Local Force Feedback for Transparent Teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 1, pp. 108~114.
- (3) Lawrence, D. A., 1993, "Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 5, pp. 624~637.
- (4) Yokokohji, Y. and Yoshikawa, T., 1994, "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.
- (5) Blake Hannaford, 1989, "A Design Framework for Teleoperators with Kinesthetic Feedback," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 5, No. 4, pp. 426~434.
- (6) Hashtrudi-Zaad, K. and Salcudean, S. E., 2001, "Analysis of Control Architectures for Teleoperation Systems with Impedance/Admittance Master and Slave Manipulators," *Int. J. Robotics Research*, Vol. 20, No. 6, pp. 419~445.
- (7) Pieter Eykhoff, 1974, *System Identification : Parameter and State Estimation*, John Wiley & Sons.
- (8) Richard J. Adams, Blake Hannaford, 1999, "Stable Haptic interaction with Virtual Environments," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 5, pp. 465~473.
- (9) Hyung-Soon Park, Pyung H. Chang, 2002, "Causality Analysis using Bond-Graph and Its Significance in Bilateral Teleoperation," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 2991~2998.
- (10) Hsia, T. C. and Gao, L. S., 1990, "Robust Manipulator Control Using Decentralized Linear Time-Invariant Time-Delayed Joint Controllers," *IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 2070~2075.
- (11) Pyung H. Chang, Byung S. Park and Ki C. Park., 1996, "An Experimental Study on Improving Hybrid Position / Force Control of a Robot Using Time Delay Control," *Mechatronics*, Vol. 6, No. 8, pp. 915~931.
- (12) Craig, J. J., 1989, *Introduction to Robotics : Analysis and Control*, 2nd edn. Addison-Wesley, Reading, MA.