

# 햅틱과 영상의 시간지연 차이에 따른 원격조종 로봇시스템의 성능분석

## Performance Analysis of Telerobotic Systems with Different Haptic and Video Time-delay

김 예 술, 유 지 환\*  
(Ye-Seul Kim and Jee-Hwan Ryu)

**Abstract:** In this paper, we investigate the relationship between the performance of telerobotic systems and the two independent time-delay on different modality, which are haptic and video. Especially, we try to find some performance improvement when the amount of delay of haptic and video is synchronized. Experiments were conducted with 10 subjects by scanning the amount of video and haptic delay independently. It is rather interesting to note that the teleoperation performance was not that sensitive to video delay, and the synchronized video and haptic delay doesn't show better performance than the case when haptic delay is lower than video delay.

**Keywords:** haptic, teleoperation, time-delay, video delay

### I. 서론

로봇의 작업능력과 인간의 판단능력을 결합하여 원격지의 환경을 보다 효율적으로 조작하고 원하는 작업을 수행하기 위한 방법으로 원격조종로봇이 최근 많은 각광을 받고 있다. 원격조종로봇은 초기에 원격지의 탐사, 원자로 검사, 폭발물 탐지와 같은 인간이 접근하기 어려운 곳의 위험한 작업을 대신하는 용도로 주로 사용되었으며, 최근에는 원격수술과 마이크로나노 크기 물체의 조작 등에도 활용되어, 인간의 작업능력을 증대시키고 작업의 피로를 줄여주는 용도로도 활용되고 있다. 뿐만 아니라 체력학습도구, 각종 산업훈련의 도구 및 장애인의 재활 보조기구 등으로도 응용분야가 확대되고 있는 추세이다[1,2].

원격조종로봇은 사용자의 명령을 네트워크를 통해 실시간으로 받아 원격지에서 작업을 수행하는 로봇이기 때문에 명령과 피드백 정보 사이에 시간지연이 불가피하게 발생하게 된다. 또한, 이로 인하여 작업성능 및 안정성이 저하될 가능성이 있다. 이러한 시간지연에 따른 문제점을 해결하기 위하여 여러 가지 연구들이 수행되어 왔으며, 아직까지도 중요한 연구 주제로 남아있다[3-6].

원격조종로봇에서 조종자에게 전달되는 가장 보편적인 정보는 영상정보와 촉각 정보이다. 기본적으로 영상 및 촉각 정보는 데이터 크기에서 큰 차이가 있으며 원격통신의 경우 제한된 대역폭을 가지고 있기 때문에 업데이트 속도 및 시간지연의 크기가 다르다.

영상정보의 전송률이 촉각 정보에 비교할 때 매우 낮은 상황에서, 갱신되는 시각 정보와 일치되는 촉각 정보가 동시에 전달된다면 시간지연이 생기더라도 조종자에게 좀 더 조종

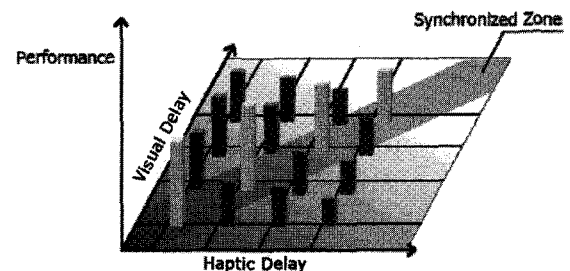


그림 1. 촉각 및 시각 정보의 시간지연과 조정성능 및 안정성과의 상관관계(가정).

Fig. 1. Hypothetical Relationship between performance and the amount of time-delay of haptic/video.

에 안정감을 느끼거나 작업성능향상에 유리할 것이라는 가정을 바탕으로 본 논문이 시작되었다[7]. 유사한 실험환경에서 조종자가 느끼는 민감도를 측정한 결과, 피실험자가 특정 작업을 수행할 때 그렇지 않을 때보다 시간지연 효과를 둔하게 느낀다는 결론을 얻었다[8]. 피실험자들은 촉각과 시각의 시간지연이 동시에 주어질 때, 가장 민감한 반응을 보였다는 점이 흥미롭다.

본 논문에서는 촉각 및 시각 정보의 시간지연 변화 그리고 상대적인 지연 차이가 시스템의 성능변화에 미치는 영향에 대하여 분석을 시도하였다. 그림 1에서 나타난 것처럼 원격조종 시스템의 두 가지 시간지연 크기가 각각 두 축을 이루는 평면을 고려한다. 두 변수가 증가에 따른 원격조종 시스템의 성능 변화와 상관관계에 대한 검증을 논문의 목적으로 삼았다.

### II. 실험환경 및 과정

#### 1. 원격조종 로봇시스템

그림 2와 같이 가상의 슬레이브(slave) 로봇을 사용하여 원격조종 로봇시스템을 구성하고, 시각 정보와 촉각 정보의 전송시간을 가변 시켜가며 실험을 수행하였다. 여기에서 말하는 촉각 정보란 가상공간에서 생성되어 조종자에게 전해지

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 9. 1., 수정: 2009. 10. 6., 채택확정: 2009. 12. 24.

김예술: 한국항공우주연구원(yeseul@kari.re.kr)

유지환: 한국기술교육대학교 기계정보공학부(jhryu@kut.ac.kr)

\* 이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(KRF-2008-D00030).

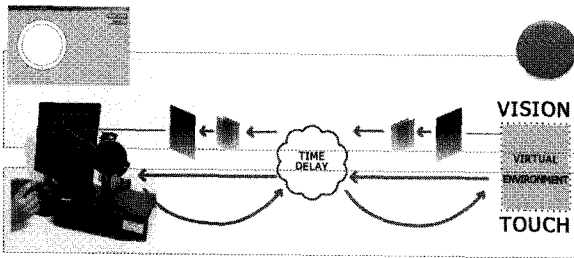


그림 2. 실험을 위한 원격조종 로봇시스템.  
Fig. 2. Telerobotic system for experiments.

는 힘을 말하며, 시각 정보란 조종자에게 보여지는 원격지의 화면정보를 말한다.

촉각 정보의 갱신율은 1kHz이며, 시각 정보 즉 화면의 경우는 30Hz 이다. 시간지연이 있더라도 촉각과 시각 정보의 갱신율은 변하지 않고 1kHz와 30kHz를 유지하도록 하였다. 이는 해당 갱신율이 사람이 시각/촉각 정보가 끊어지지 않고 연속적으로 전해진다고 느끼기 시작하는 최소한의 갱신율이기 때문이다. 따라서 네트워크의 상태와 무관하게 이를 유지할 필요가 있다.

총 10명의 20대 남녀에게 실험을 수행하였다.

실험 수행 전, 4-5회에 걸쳐 적응 실험을 지도하였으며 조종위치, PC 환경을 동일하게 설정하였다. 시간지연의 크기 증가를 순차적으로 증가하였고 모든 사람에게 같은 순서를 가지고 실험을 수행하였다. 사람의 반응으로 성능이 평가되기 때문에 모든 실험에 최대한 자연스럽게 참여하도록 유도하였다. 다만, 피드백 힘의 시간지연으로 인한 진동현상이 발생할 때에 마스터의 속도를 낮추도록 권하여 진동을 최소화하면서 실험을 수행하도록 하였다.

2. 실험과제 및 성능판단 기준

다양한 형태의 임무를 구상 및 예행해 본 결과, 실험의 목적에 잘 부합하고 실험수행에 용이한 과제로 다음 원 그리기 과제를 선정하였다. 다른 과제에 비해 단순한 모양을 가지고

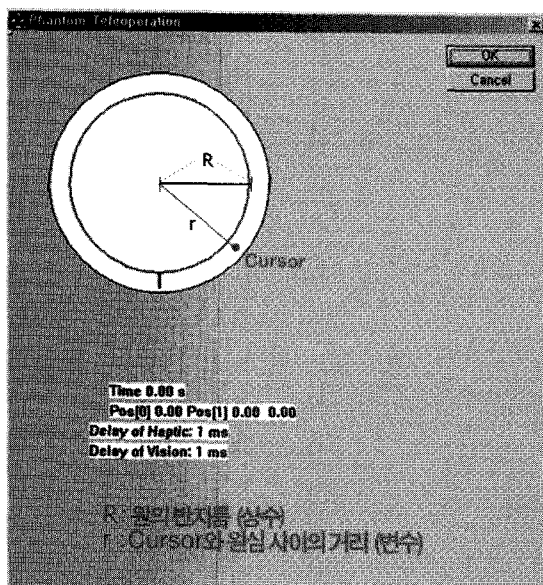


그림 3. 피실험자에게 보여지는 화면.  
Fig. 3. Video image for subjects.

있어 가상 힘이 복잡하지 않으며, 피실험자들도 큰 부담 없이 여러 번에 걸친 실험에 임할 수 있었다. 또한 성능을 판단할 수 있는 정확한 기준을 세우기에 적절하였다.

실험 임무는 모니터 상의 그림 3과 같은 화면을 보면서 안쪽 원주를 따라 그리는 것이다. 바깥 원을 벗어나지 않는 범위 안에서만 화면을 활용하게 된다. 현재 커서의 위치가 임의의 시각정보 시간지연을 가지고 조종자에게 보여지며, 피드백 힘의 경우, 커서가 안쪽 또는 바깥쪽 원을 침범하였을 경우 조종자에게 전달된다. 시작 지점에서 스위치를 눌러 시작시간을 기록하고 원을 그린 후 시작점으로 다시 돌아와서 스위치를 누르면 끝나는 시간을 한 번 더 기록하는 방식이다. 그 두 개의 시간차이를 과제수행완료시간으로 정하고 그 시간 동안 x와 y의 좌표를 모두 기록하여 원심과의 거리를 구한다. 원심과의 거리와 원의 반지름을 비교하여 성능을 판단하고자 하였다.

원 그리기 과제를 수행하는 동안에 시작과 끝점 사이의 걸린 시간을 T(sec), 원의 반지름 R(mm)과 원심과 커서 사이의 거리 r(mm)의 차의 합인 누적오류를 T로 나눈 값을 평균오류(mm/s)로 각각 정의하였다.

원 그리기 임무 수행 시, 커서가 안쪽 원주 속으로 들어가면 탄성력이 마스터 기구에 작용하며, 이는 원의 반지름 R과 원심과 커서 사이의 거리의 차이에 비례하여 주어진다. 여기에서 각각 거리는 mm, 힘은 N, 비례상수 k는 N/mm의 단위를 사용한다. 커서가 바깥 원주를 벗어나면, 벗어난 거리와 무관하게 10Hz의 0.1mm 크기의 진폭을 가지는 정현파를 발생하여 과도하게 경로를 벗어나지 않도록 유도한다. 그림 4는 커서의 위치에 따른 반발력을 설명한다.

본 연구에서는 k를 0.1N/mm과 1N/mm로 변화시키며 실험을 수행하였다. k는 힘 피드백의 차이를 두기 위하여 임의로 선택한 값으로서, 힘의 크기에 따른 성능을 비교하고자 사용한 값을 밝혀둔다. k가 0.1N/mm인 경우, 피드백 힘인 촉각 정보가 거의 적용되지 않고 조종자가 시각정보, 즉 모니터의 화면에만 의존하여 조종하게 된다는 것이고, 1N/mm인 경우 피드백 힘이 조종자에게 충분히 전달이 되고 조종자가 시각 뿐 아니라 큰 탄성력의 영향을 받게 된다는 것을 의미한다. 충분히 전달된다는 의미는 강체의 표면을 만지는 것 같은 반발력이 발생함을 의미한다. 0.1N/mm일 경우, 변형체를 만지는 것 같은 미약한 반발력이 발생함을 의미한다. 원의 반지름은 45mm이며, 마스터 장치의 위치명령을 2배로 스케일링하여 가상의 환경과 상호작용하게 된다.

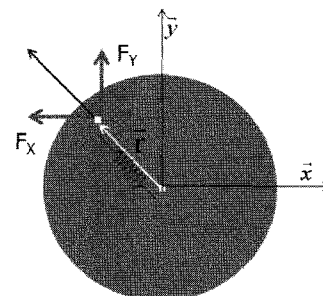


그림 4. 원 그리기 과제에 적용한 힘 모델.  
Fig. 4. Force model for the experiments.

3. 실험내용

일반적인 조종자의 경향과 신뢰도 있는 결과를 얻기 위하여 10명의 실험자를 대상으로 원 그리기 과제를 수행하였으며, 각 실험자를 대상으로 비례상수  $k$ 와 시각과 촉각의 시간 지연 정도를 변화시키며 총 50회에 걸친 실험을 수행하였다. 여기에서 사용된 촉각 기구는 SensAble 사에서 제작한 PHANTOM Premium 1.5A로서 가장 널리 사용되고 있는 촉각 기구이다. 이 기구는 3개의 축을 기준으로 위치와 각도 즉, 6 자유도의 입력을 가지고 있으나 이번 실험에서는 2자유도의 위치와 피드백 힘만을 사용하였다. 사용된 PC의 사양은 Pentium(R) D CPU 2.8 GHz이다.

실험 목표에 따라 다음 5가지 실험내용을 정하여 실험을 수행하였다.

- 실험 1: 촉각정보의 시간지연이 없고 시각정보의 시간지연만 0부터 400ms까지 증가하는 경우
- 실험 2: 시각정보의 시간지연은 없고 촉각정보의 시간지연만 0부터 400ms까지 증가하는 경우
- 실험 3: 촉각정보와 시각정보의 시간지연의 크기가 동시에 0부터 400ms까지 동일하게 증가하는 경우
- 실험 4: 촉각정보의 시간지연이 100ms로 일정하고 시각정보의 시간지연 이 0부터 400ms까지 증가하는 경우
- 실험 5: 시각정보의 시간지연이 100ms로 일정하고 촉각정보의 시간지연 이 0부터 400ms까지 증가하는 경우

시간지연의 크기 외의 모든 조건은 동일하게 맞추어 실험하였으며, 지연시간 크기의 변화를 0, 50, 100, 200, 400ms로 선정하여 실험을 수행하였다. 본 실험을 앞두고 시간지연의 크기를 선정하기 위한 실험을 실시하였으며, 동일한 조건에서 피실험자 5인을 대상으로 원 그리기 과제를 더 작은 시간지연 간격(10ms)을 가지고 실시한 결과, 시각정보의 시간지연의 변화에 따라 급격한 과제수행시간  $T$ 의 변화가 존재하는 지점들을 기준으로 오차범위를 선정하여 위와 같은 시간간격을 결정하였다.

III. 실험결과

1. 촉각 정보의 시간지연이 없는 경우

실험 1은 촉각 정보, 즉 피드백 힘의 시간지연이 없고 시각 정보의 시간지연만 0부터 400ms까지 증가하는 경우로써, 그림 5와 같은 결과를 갖는다. 전반적으로 조종하는 데에 있어서 어려움 없이 균일한 수행성능을 보이며 수행완료시간이  $k$ 가 0.1인 경우에는 8초 이하로  $k$ 가 1인 경우에는 7초 이하를 기록하였다. 평균 오류의 값 역시 최대 3000(mm/s)을 넘지 않는 정밀한 과제수행의 모습을 보여주고 있다.

촉각 정보의 시간지연이 없을 때에는  $k$ 가 1인 경우, 즉 피드백 힘이 있을 때에  $k$ 가 0.1인 경우보다 과제수행을 더 수월하게 할 수 있다는 것을 입증할 수 있다. 전반적으로 시각 정보의 시간지연이 있다 하더라도 원격조종 작업을 수행하는 때에는 성능차이가 많이 없다고 판단된다.

2. 시각 정보의 시간지연이 없는 경우

실험 2는 시각정보의 시간지연은 없고 촉각 정보의 시간지연만 0부터 400ms까지 증가하는 경우로써, 그림 6을 통하

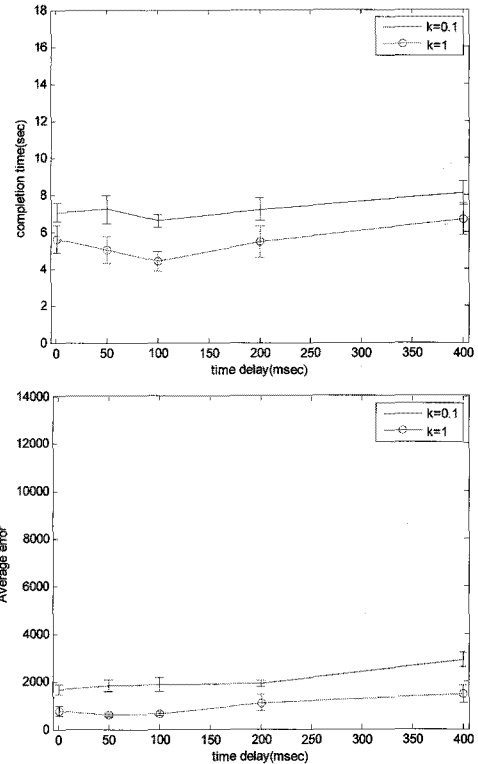


그림 5. 실험 1의 시각정보 시간지연에 따른 과제수행완료 시간과 평균오류.  
Fig. 5. Task Completion time and average error with respect to video time-delay in Exp. 1.

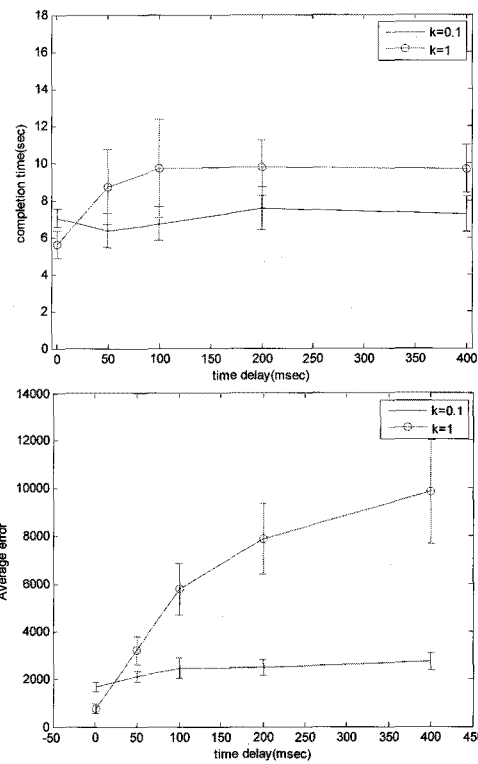


그림 6. 실험 2의 촉각정보 시간지연에 따른 과제수행완료 시간과 평균오류.  
Fig. 6. Task Completion time and average error with respect to haptic time-delay in Exp. 2.

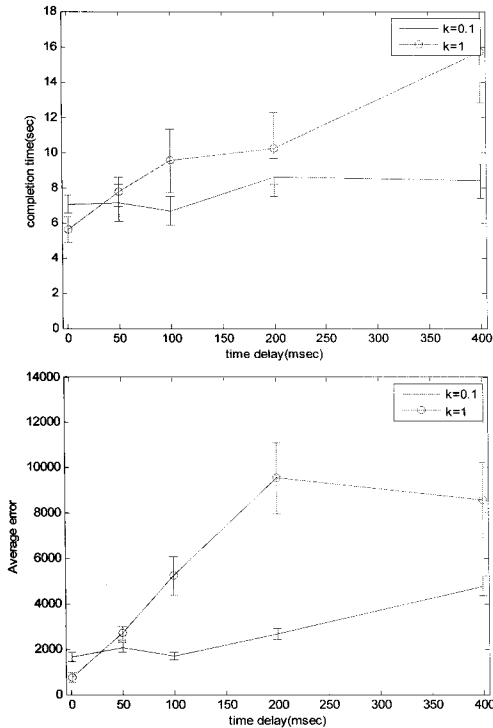


그림 7. 실험 3의 촉각과 시각정보의 동일한 시간지연에 따른 과제수행완료 시간과 평균오류.  
 Fig. 7. Task Completion time and average error with respect to synchronous haptic and video time-delay in Exp. 3.

여 촉각 정보 시간지연의 영향을 살펴볼 수 있는 결과이다. 평균오류의 값이 k가 1인 경우 계속해서 증가하게 되었고, 과제수행완료 시간도 10초 근처로 크게 증가하는 모습을 볼 수 있다. k가 0.1인 경우에는 조종자에게 미치는 힘의 크기가 작기 때문에 변화의 폭이 크진 않지만 앞서 수행한 실험1의 경우와 비교하여 볼 때, 평균오류가 30% 정도 증가되었고, 과제수행완료 시간도 평균적으로 1초 정도 증가하게 된 것을 확인할 수 있다.

3. 촉각 정보와 시각 정보의 시간지연이 일치하는 경우

실험 3은 촉각과 시각정보의 시간지연의 크기가 동시에 0부터 400ms까지 동일하게 증가하는 경우이다. 과제수행완료 시간에 있어서 가장 큰 값, 즉 조종성능에 좋지 않은 결과를 보여주고 있다(그림 7). 평균오류 또한 k값에 상관없이 크게 증가하는 것을 확인하였다. k가 1인 경우에 두 개의 시간지연이 0인 경우를 제외하고 모든 시간지연의 조합에서 평균오류 및 과제 수행완료시간에서 큰 수치를 갖게 되었다.

4. 촉각 정보의 시간지연이 일정한 경우

실험 4는 촉각정보의 시간지연이 100ms로 일정하고 시각 정보의 시간지연이 0부터 400ms까지 증가하는 경우로, 그림 8과 같이 시각정보의 시간지연 변화와는 무관하게 과제수행 완료 시간이 크게 유지되고 있으며 평균오류 역시 3000 이상의 큰 값을 유지하고 있다. 그림 5와 비교하면, 촉각 시간지연이 추가되면서 전체적으로 성능 저하가 나타나며 전달되는 힘이 클수록 성능 저하가 큼을 알 수 있다.

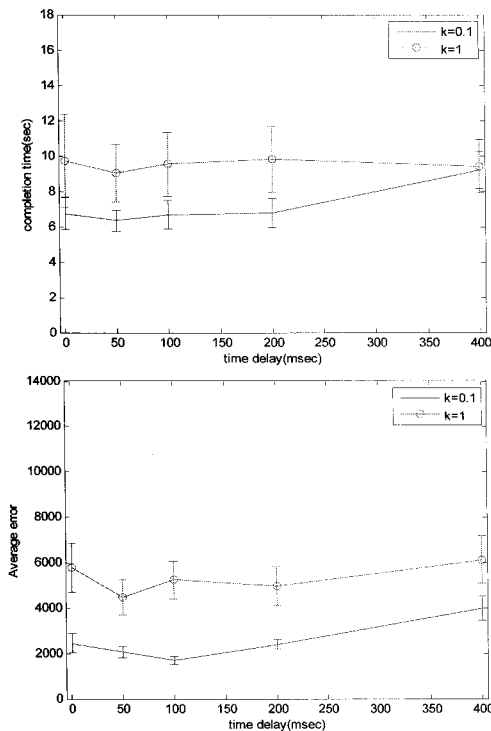


그림 8. 실험 4의 촉각 정보 시간지연이 일정한 경우(100ms), 시각 정보 시간지연에 따른 과제수행완료 시간과 평균오류의 그래프.  
 Fig. 8. Task Completion time and average error with respect to video time-delay when the haptic time-delay is constant (100 ms) in Exp. 4.

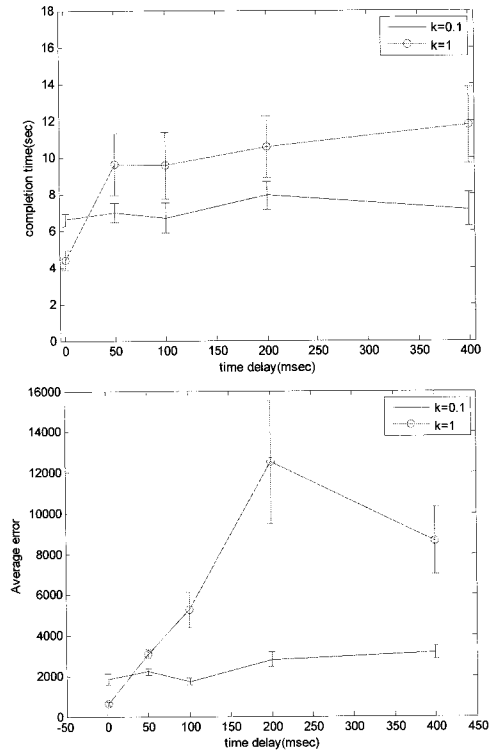


그림 9. 실험 5의 시각 정보 시간지연이 일정한 경우(100ms), 촉각 정보 시간지연에 따른 과제수행완료 시간과 평균오류의 그래프.  
 Fig. 9. Task Completion time and average error with respect to haptic time-delay when the video time-delay is constant (100 ms) in Exp. 5.

5. 시각 정보의 시간지연이 일정한 경우

실험 5는 시각 정보의 시간지연이 100ms로 일정하고 촉각 정보의 시간지연이 0부터 400ms까지 증가하는 경우이다. 그림 9에서와 같이 평균오류의 값이 촉각 정보 시간지연에 따라 계속해서 증가하였고 특히 평균오류의 최대값을 기록하게 되었다. 두 가지 정보의 시간지연이 같이 일어날 때 조종 성능을 저하시키게 된다.

IV. 결과분석 및 논의

그림 10은 시각정보와 촉각정보의 시간지연의 조합에 따라 성능, 즉 과제수행완료시간(sec) 값을 보여주는 3차원 그래프이다. 그림 11을 통하여 촉각 정보와 시각 정보의 시간지연 일치 혹은 두 정보의 시간지연 차이에 따른 성능의 변화를 전체적으로 알 수 있다. 먼저, 그래프에서 k가 0.1인 경우, 1인 경우에 비하여 변화의 폭이 적고, 시각 정보의 시간지연이 촉각 정보의 시간지연보다 커질 때, 평균적으로 과제를 수행하는데 더 많은 시간이 소요되었다(표 1). 즉, 시각 정보가 촉각 정보에 비하여 지배적으로 작용하는 k가 0.1인 경우에는 시각정보의 시간지연이 클 경우, 과제수행완료 시간이 전체적으로 커지게 된다. 반대로, k가 1인 경우, 촉각 정보의 시간지연이 시각 정보의 시간지연보다 큰 경우, 평균적으로 과제수행 완료시간이 증가했다. 과제수행완료 시간에서의

표 1. 성능기준에 대한 시간지연의 분산분석 결과(P-value, 유의수준 = 0.05).

Table 1. Result of ANOVA test of the haptic and video delay with Performance criteria (significance level is 0.05).

성능기준	Completion time (sec)		Average Error	
	0.1	1	0.1	1
시각지연	0.003	0.111	1.51E-10	0.583
촉각지연	0.286	1.67E-6	1.92E-12	2.13E-27

최대값은 k가 0.1과 1일 때 각각, 9.694(sec)와 15.733(sec)이었다. 최소값은 6.336(sec)과 4.388(sec)으로 얻어졌다.

평균오류 (mm/s)의 전체 그래프, 그림 11는 과제수행완료 시간의 그래프와 마찬가지로 k가 0.1인 경우 변화의 폭이 상대적으로 적다. 주목할 점은 k값에 무관하게 촉각 정보의 지연과 비례하여 평균오류가 증가하게 되는 반면, 시각 정보의 지연에는 둔감하게 반응하고 있다는 점이다. 표 1과 같이 이원 배치법(분산분석)을 통해 평균오류의 값과 촉각과 시각 정보의 시간지연과의 관계를 분석한 결과, 유의수준=0.05, k=0.1인 경우, 시각정보와 촉각정보의 시간지연에 의한 P값은 각각  $1.51E-10 < 0.05$ ,  $1.92E-12 < 0.05$  로 유의성을 가진다. k=1인 경우, P 값은 각각  $0.583 > 0.05$ ,  $2.133E-27 < 0.05$ 로 촉각 시간지연의 차이가 유의성을 갖는다는 결론을 얻었다.

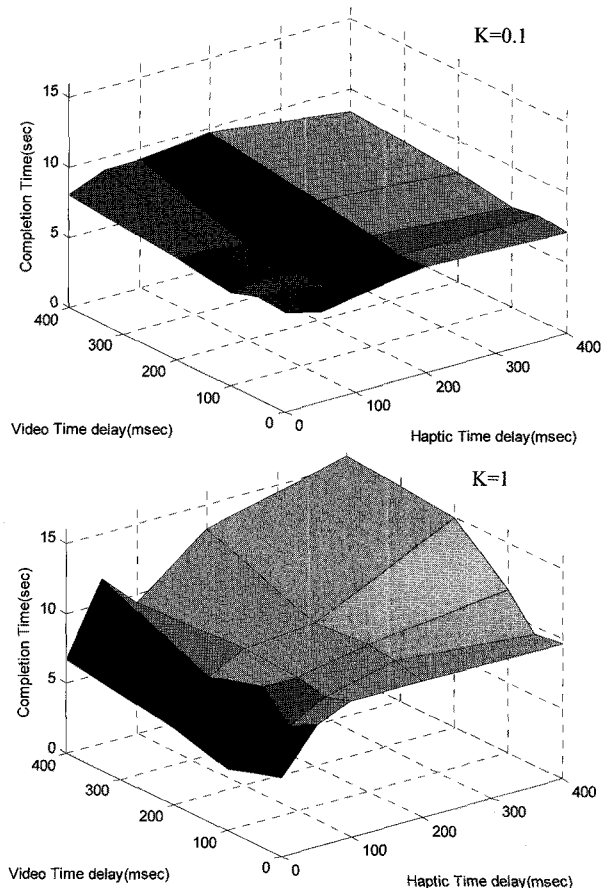


그림 10. 촉각과 시각정보 시간지연에 따른 과제수행완료 시간의 전체 그래프.

Fig. 10. Overall graph for task completion time with respect to haptic and video time-delay.

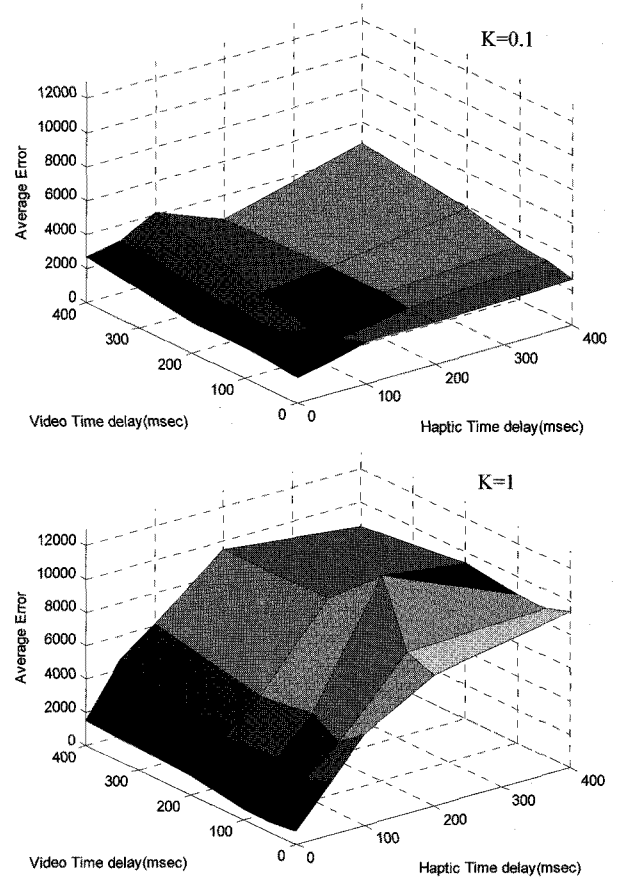


그림 11. 시간지연에 따른 평균오류의 전체 그래프.

Fig. 11. Overall graph for average error with respect to haptic and video time-delay.

표 2. 촉각과 시각정보의 시간지연 영역별 평균성능.

Table 2. Average of the performance at each regions of the haptic and video delay.

성능기준	Completion time (sec)		Average Error	
	0.1	1	0.1	1
촉각지연 > 시각지연	7.27	10.10	2700	7810
시각지연 > 촉각지연	8.03	8.35	2469	3482

평균오류에서의 최대값은 4768.450(mm/s) 12361.580(mm/s) 최소값은 1505.171(mm/s) 595.092(mm/s)로 얻어졌다. 과제수행 완료시간과 마찬가지로 k가 1인 경우, 평균오류의 변화 폭이 더 크다는 것을 확인할 수 있으며, 촉각 정보의 시간지연의 효과가 없는 경우 정밀한 작업을 수행할 수 있다고 말할 수 있다.

본 논문의 초반부에 제기되었던 가설을 검증하기 위하여 두 가지 시간지연이 일치할 경우를 더 살펴보면, 과제수행 완료 시간의 경우, k=0.1일 때, 전체평균 7.510(sec) 보다 0.67% 높은 7.561(sec), k=1일 때, 전체평균 9.465(sec) 보다 3.26% 높은 9.773(sec)의 결과를 얻을 수 있다. 표 2의 내용과 종합하여 볼 때, 시간지연이 일치되어 시각정보와 촉각 정보가 종합되어서 조종자에게 전달될 때, 조종성능을 향상시킬 수 있을 것이라는 가정에 대하여 결론을 내릴 수 있다. 시간지연의 일치는 비교적 작은 시간지연인 50ms의 시간지연이 있을 경우에도 과제수행완료 시간을 기준으로 볼 때, 성능의 개선을 돕지 못하였다.

평균오류의 경우에는, k=0.1일 때, 전체평균 2573.840(mm/s) 보다 1.7% 낮은 2529.990(mm/s), k=1일 때, 전체평균 5582.130(mm/s)보다 4.6% 낮은 5324.970(mm/s)의 결과를 얻을 수 있다. k가 0.1인 경우에 두 시간지연의 일치가 성능을 개선하는데 도움이 주었으며, 앞의 결과와 관련하여 평균오류를 줄여 정밀한 작업을 수행할 수 있었으나, 과제수행완료의 시간이 증가하게 되었다. 그러나 k가 1인 경우, 즉 촉각 정보와 시각 정보가 동시에 적용되는 시스템의 경우에, 비록 두 시간지연이 일치할 경우 평균오류의 값이 작아졌지만, 3000(mm/s) 이상의 평균오류는 조종하기에 적합하지 않다고 판단되므로 성능개선에 도움을 준다고 말할 수 없다. 본 실험에서는 촉각 정보를 제공하는 동안 발생할 수 있는 불안정성에 대해서는 별도의 제어를 사용하지 않았기 때문에 시간지연에 따른 불안정성이 조종 성능을 떨어뜨릴 가능성이 있을 수 있다. 하지만 실험에 동일한 실험조건을 유지한다는 조건 아래, 촉각 정보와 시각 정보의 시간지연의 일치와 불일치에 따른 성능의 비교를 주된 목적으로 실험을 수행하였음을 밝혀둔다.

## V. 결론 및 향후 과제

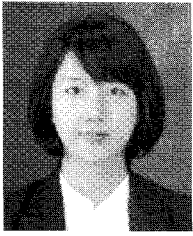
본 논문에서는 촉각 정보와 시각 정보를 동시에 사용하는 일반적인 원격조종 시스템에서 촉각 정보와 시각 정보의 상대적인 시간지연 차이에 따라 원격조종 시스템의 성능에 어떠한 영향을 미칠 수 있는가를 실험을 통해 관측하

였다. 원격조종 시스템을 모형화하여 성능판단의 기준을 정의하였으며, 시간지연의 크기를 여러 조합으로 구성하여 10명의 피실험자를 대상으로 50회의 실험을 수행하였다. 두 가지 시간지연이 일치하였을 경우 과제수행완료시간 측면에서는 성능의 저하를 가져왔으며, 정밀한 작업수행 성능을 나타내는 평균오류의 측면에서는 피드백 힘이 적은 경우에 한하여 2% 정도의 수치적인 성능 개선이 있었다. 그러나 피드백 힘이 적다는 것은 조종감의 약화를 의미한다는 것을 고려할 때, 조종성능의 만족할만한 성능개선이라고 볼 수는 없었다. 특이할 만한 점은, 시각 정보의 시간지연은 촉각 정보의 시간지연에 비하여 성능변화에 민감하지 않았으며, 촉각 정보의 시간지연을 시각 정보의 시간지연보다 작게 할 경우 반대의 경우보다 좋은 성능을 나타내는 상관이 있었음을 볼 수 있다. 이전의 실험에서 촉각 기구를 제작하여 촉각과 시각 채널을 갖는 가상환경 상에서 시간지연의 효과에 대한 유사한 결론을 얻은 바 있다. 여기에서 피실험자들이 촉각의 시간지연을 좀 더 민감하게 감지한 것으로 증명되었다[8]. 즉, 두 가지 채널을 동시에 사용하는 원격조종시스템에서 시각과 촉각 시간지연 크기의 일치 보다는 촉각 정보의 시간지연 크기를 줄이는 것이 조종감을 높여 정밀한 작업을 빠르게 수행하게 함을 알 수 있다.

이러한 결과를 바탕으로 원격조종에 시각과 촉각 정보를 동시에 사용하는 경우, 불가피하게 발생하는 시간지연의 문제를 파악하고 시간지연의 상대적인 크기를 임의로 조정하여 성능의 최적화를 기대할 수 있다. 또한, 촉각 지연에 의한 불안정성을 제거하기 위한 알고리즘을 적용하여 실험의 완성도를 높이는 방법이 기대된다. 사용자의 피드백 힘의 크기에 따라 성능에 미치는 영향이 비례적으로 증감하는가에 대한 검증도 필요하다.

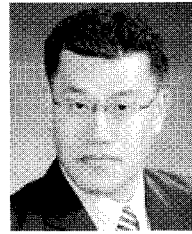
## 참고문헌

- [1] 한국과학기술정보연구원 “위협작업용 로봇 기술 동향,” Kisti, 2004, pp. 40-49.
- [2] T. B. Sheridan, “Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control,” MIT press, 1992, pp. 1-12.
- [3] Robert J. Anderson, and Mark W. Spong, “Bilateral control of teleoperators with time delay,” *IEEE Transactions on Automatic control*, vol. 34, no. 5, 1989, pp. 494-501.
- [4] J. E. Colgate and J. M. Brown, “Factors affecting the z-width of a haptic display,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1994, pp. 3205-3210.
- [5] B. Hannaford, and J.-H. Ryu, “Time-domain passivity control of haptic interface,” *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol. 18, 2002, pp. 1-10.
- [6] T. Miyasato and R. Nakatsu, “Allowable delay between images and tactile information in a haptic interface,” *Proc. of the 1997 International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, Washington, DC, USA, Sep. 1997, pp.84-89.
- [7] O. Wongwirat and S. Ohara, “Haptic media synchronization for remote surgery through simulation,” *IEEE Computer Society*, Tokai University, 2006, pp. 62-69.
- [8] I. Lee and S. M. Choi, “Discrimination of visual and haptic rendering delays in networked environments,” *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2009, pp. 25-31.



### 김예슬

2007년 인하대학교 항공우주공학과(공학사). 2009년 한국기술교육대학교 기계공학과(공학석사). 2009년~현재 한국항공우주연구원 연구원으로 재직중. 관심분야는 영상처리, Teleoperation.



### 유지환

2002년 한국과학기술원 기계공학과(공학박사). 2005년~현재 한국기술교육대학교 기계정보공학부 교수로 재직중. 관심분야는 Haptics, Teleoperation, Humanoid robotics.