

# 비 동기화된 촉각과 영상 시간지연이 원격조종로봇에 미치는 영향과 성능 향상을 위한 조언

## The Effect of Asynchronous Haptic and Video Feedback on Teleoperation and a Comment for Improving the Performance

김 혁, 유 지 환\*  
(Hyuk Kim<sup>1</sup> and Jee-Hwan Ryu<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Korea University of Technology and Education

**Abstract:** In this paper, we investigate the effect of asynchronous haptic and video feedback on the performance of teleoperation. To analyze the effect, a tele-manipulation experiment is specially designed, which operator moves square objects from one place to another place by using master/slave telerobotic system. Task completion time and total number of falling of the object are used for evaluating the performance. Subjective study was conducted with 10 subjects in 16 different combinations of video and haptic feedback while participants didn't have any prior information about the amount of each delay. Initially we assume that synchronized haptic and video feedback would give best performance. However as a result, we found that the accuracy was increased when haptic and video feedback was synchronized, and the completion time was decreased when one of the feedback (either haptic or video) was decreased. Another interesting fact that we found in this experiment is that it showed even better accuracy when haptic information arrives little bit earlier than video information, than the case when those are synchronized.

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

### I. 서론

최근 원격조종로봇에 대한 관심이 다시 증대 되면서, 원격 조종로봇은 원자로 검사, 폭발물 탐지, 원격수술, 산업훈련 도구 및 장애인 재활 보조 기구 등 다양한 영역에서 활용되고 있다[1,2]. 하지만 원격조종로봇은 네트워크를 통해 사용자로부터 명령을 받아 원격지에서 움직이기 때문에 통신에 의한 시간지연이 발생한다. 이로 인해 작업능력의 저하 및 안정성 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 여러 연구들이 수행되어 왔으며, 현재까지도 중요한 연구 주제로 남아있다[3-5]. 일반적으로 원격조종로봇에서 사용자에게 제공되는 정보는 시각정보와 촉각정보이다. 일반적으로 시각정보가 촉각정보에 비해 데이터의 크기가 크고 압축이 필요하기 때문에 업데이트 속도가 느리고 시간 지연 량이 큰 것이 일반적이다.

이렇듯 시간지연이 원격조종로봇 분야에 있어 큰 숙제로 남아있는 것이 사실이지만, 단지 몇몇 연구자들에 의해서만 원격조종로봇에서 시간지연과 작업성능과의 상관관계를 연구한 결과들이 존재한다. 시각정보의 지연이 존재할 때, 지연되는 시간에 비례하여 작업능력이 현저히 저하된다는 연구가 진행된바 있으며[6], Thompson 등은 비 동기화된 촉각 및 시각정보의 전달이, 즉 되도록 빠른 촉각 정보의 전달이 시

스템을 안정화 시키는데 도움을 주므로, 오히려 원격조작의 성능을 향상시킨다는 연구결과를 보고한 바가 있다[7]. 하지만, 이 가설은 실험을 통하여 증명되지는 못하였다. Onda 등도 역시 시각정보보다 빠른 촉각 정보가 원격수술에 있어서 안정성을 증가시킬 수 있으며, 이를 위하여 촉각정보의 예측도 사용될 수 있다는 연구결과를 발표하였다[8]. 반면, Vogels는 비 동기화 된 촉각 과 시각정보의 피드백 차이를 사람이 어디까지 인지할 수 있는지에 대한 연구를 수행한 바 있으며, 사람은 45msec 정도의 아주 작은 촉각 과 시각정보의 비 동기화 까지도 인지할 수 있기 때문에 전체적인 작업 성능을 올리기 위해서는 촉각과 시각정보 피드백의 동기화가 중요하다라는 결론을 도출하고 있다[9].

본 논문은 촉각 및 시각 정보의 시간 지연 량과 동기화 시점이 조종자의 작업수행능력에 미치는 영향을 분석하고자 시도하였다. 특히, 시간지연이 전체적으로 작은 경우보다는 대륙간 인터넷 또는 위성통신을 활용한 원격제어와 같이 시간지연의 양이 500msec 전후로 전체적으로 크며 두 시간지연의 차이가 300msec 이상으로 크게 나타나는 경우에 대한 해석을 시도하였다.

### II. 실험환경 및 과정

#### 1. 원격조종 로봇시스템

그림 1과 같이 마스터 조종장비와 슬레이브 로봇으로 원격조종 로봇시스템을 구성하고, 시각정보와 촉각정보의 전송 시간을 가변 시켜가며 실험을 수행하였다. 여기에서 말하는 촉각정보란 슬레이브에서 생성되어 조종자에게 전해지는 힘을 말하며, 시각정보란 조종자에게 보여지는 원격지의 화면 정보를 말한다. 촉각정보의 갱신율은 1kHz이며, 시각정보의

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 8. 2., 수정: 2011. 8. 23., 채택확정: 2011. 12. 20.

김혁, 유지환: 한국기술교육대학교, 기계정보공학부

(perseus0616@korea.com/jhyu@kut.ac.kr)

※ 본 논문은 지식경제부에서 지원하는 산업원천기술개발사업(원격 작업을 위한 원격조작 서비스엔진 및 힘 반영 원격조종 로봇시스템 기술개발) 및 한국기술교육대학교 교육연구진흥비지원 프로그램의 지원에 의하여 수행되었음.

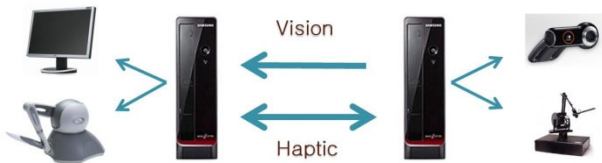


그림 1. 실험을 위한 원격조종 로봇시스템.  
Fig. 1. Teleoperation system for the experiment.



그림 2. 마스터 조정장치.  
Fig. 2. Master device.



그림 3. 슬레이브 로봇암.  
Fig. 3. Slave manipulator.

경우는 30Hz이다. 마스터에서 사용된 조정장치는 Sensable 사의 PHANTOM Omni이며(그림 2) 슬레이브에 사용된 로봇은 동일회사의 PHANTOM Premium 1.5A가 사용되었다(그림 3).

그림 1과 같이 마스터와 슬레이브 로봇에는 각각 독립된 제어기를 사용하였다. 시각정보와 촉각정보는 상호 데이터 량에 의한 전송지연 영향을 최소화시키기 위해 통신채널을 분리시켰다. 시각정보는 가로 320 \* 세로 240의 해상도에 컬러 이미지로 30 Hz의 갱신 율을 가지고 전송된다. 촉각정보는 1 kHz의 갱신 율로 전송된다. 시간지연이 있더라도 촉각과 시각의 정보 갱신 율은 변하지 않고 1 kHz와 30 Hz를 유지하도록 하였다. 이는 해당 갱신 율이 사람이 시각/촉각 정보가 끊어지지 않고 연속적으로 전해진다고 느끼기 시작하는 최소한의 갱신 율이기 때문이다.

2. 실험과제 및 성능판단 기준

실험과제는 두 개의 스티로폼으로 만들어진 규격 4 cm (W)

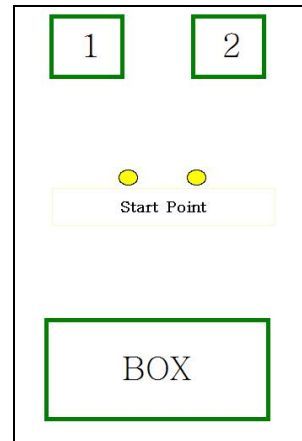


그림 4. 원격지 실험 영역.  
Fig. 4. Experimental environment.

\* 4 cm (L) \* 2 cm (H)의 2개의 물체를 그리퍼 없이 로봇의 압력으로만 이동시키는 작업을 선정하였다. 그리퍼를 사용할 경우가 실제 상황과 더 유사한 상황을 낼 수 있으나 촉각정보가 실험에 미치는 영향을 극대화하기 위해 그림 3과 같이 그리퍼 없이 로봇암으로만 물체를 이동시키는 실험을 설계하였다. 그림 4의 실험영역 그림에서 보듯이 1, 2번 위치에 놓여있는 물체를 슬레이브 로봇암으로 들어 BOX공간 안에 넣는 실험을 수행하였다.

물체를 BOX로 이동시키기 위해서는 물체를 들어서 옮기는 작업이 필요하다. 물체가 놓여진 1,2번 위치로부터 BOX까지는 바닥에서 밀어 옮길 수 없으며 이동 중 떨어뜨릴 경우 그 위치에서 들어 옮기도록 하였다.

본 논문에서는 성능 평가의 기준으로 작업 수행시간 및 작업 정밀도 두 가지를 정의하고 정량적으로 측정 비교하였다. 작업 수행 시간은 두 개의 물체를 모두 정해진 박스 안으로 옮기는 데 걸리는 시간으로 정의하였으며, 작업 정밀도는 물체를 옮기는 동안 물체의 전체 낙하횟수로 정의하였다.

3. 실험내용

위 절에서 설명한 실험과제를 바탕으로 피실험자 10명을 대상으로 실험을 수행하였다. 10명의 피실험자는 모두 햅틱 및 원격조종에 대한 경험이 있는 20~30세 사이의 시각 및 촉각능력에 이상이 없는 기계 및 전기전자를 전공하는 학부/대학원 학생들로서, 실험 전에 편차를 최소화 하기 위하여 3~4회에 걸친 적응 훈련을 받고 실험에 임하였다.

실험계획을 위해 사전실험이 수행되었으며, 원격조종 실험 환경에 숙달된 1인을 대상으로 촉각과 시각정보의 지연시간이 동기화 된 상태로 0 msec부터 1200 msec까지 150 msec의 시간지연 간격으로 증가시키며 실험을 실시하였다. 이 결과 1050 msec부터 수행시간과 물체 낙하횟수가 급격히 증가하는 현상을 관찰할 수 있었으며, 피실험자의 피로도, 실험 환경 등을 고려하여 실험영역은 0 msec부터 900 msec까지 300 msec 지연시간의 간격을 가지도록 실험을 설계하였다.

사전 실험을 바탕으로, 실험과제로서 촉각정보의 지연시간이 0 msec에서부터 900 msec까지 300 msec 단위로 증가하는 각 4가지 경우와 시각정보의 지연시간이 0 msec에서부터 900 msec까지 300 msec 단위로 증가하는 4가지 경우가 조합되어

총 16가지 경우에 대한 실험이 선정되었다. 촉각과 시각정보의 지연시간은 임의적으로 적용되었으며 피실험자는 지연시간을 알지 못하는 상태에서 실험에 임하였다.

### III. 실험결과

#### 1. 시각 정보의 시간지연만 변화시킨 경우

그림 5는 촉각정보를 고정시킨 상태에서 시각정보의 지연시간을 0 msec 부터 900 msec까지 300 msec 간격으로 증가시켰을 때 작업수행 시간을 나타낸 그래프이다. 촉각정보의 시간지연에 상관없이 모든 경우 시각정보의 지연시간이 늘어날수록 작업수행시간이 길어지고 있음을 확인할 수 있다.

그림 6은 물체의 낙하횟수를 나타내고 있다. 모든 경우 촉각정보와 시각정보의 시간지연이 동기화 되는 부분(붉은색 동그라미)에서 낙하 횟수가 제일 적음을 확인할 수 있다. 특히, 촉각 지연시간이 600 msec와 900 msec인 경우, 시각정보의 지연시간이 0 msec, 300 msec 인 경우보다 600 msec 그리고 900 msec로 각각 동기화 되는 부분에서 낙하 횟수가 가장 적게 나타나고 있다.

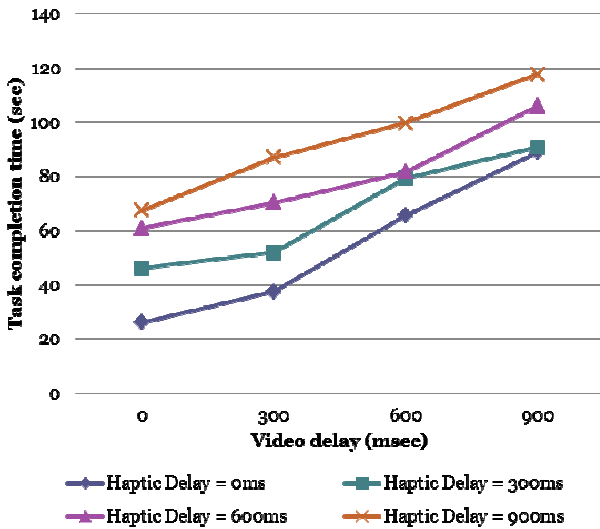


그림 5. 촉각정보의 지연시간이 일정할 때 작업완료시간.  
Fig. 5. Task completion time when haptic delay is fixed.

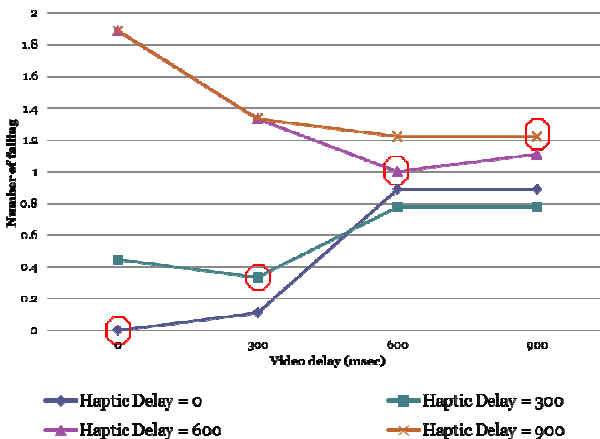


그림 6. 촉각정보의 지연시간이 일정할 때 낙하횟수비교.  
Fig. 6. Number of falling when haptic delay is fixed.

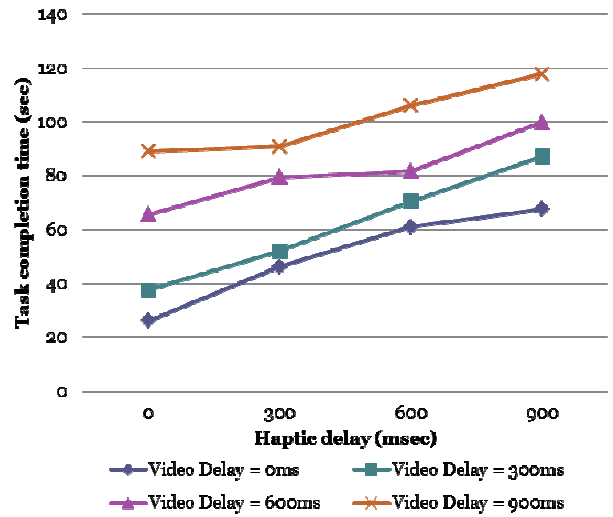


그림 7. 시각정보의 지연시간이 일정할 때 작업완료시간.  
Fig. 7. Task completion time when video delay is fixed.

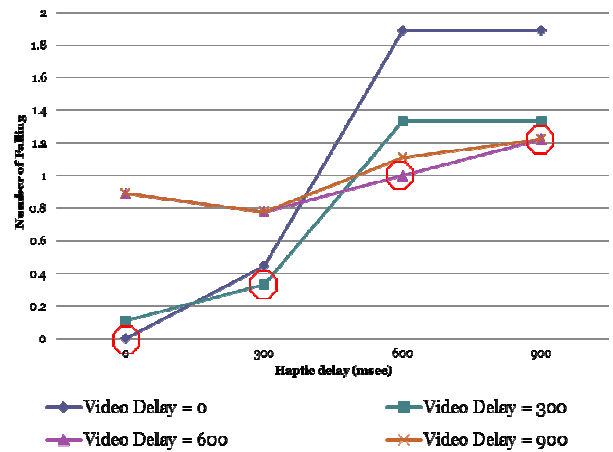


그림 8. 시각정보의 지연시간이 일정할 때 낙하횟수 비교.  
Fig. 8. Number of falling when video delay is fixed.

#### 2. 촉각 정보의 시간지연만 변화시킨 경우

그림 7은 시각정보의 지연시간이 일정한 상태에서 촉각정보의 지연시간을 증가시켰을 경우 작업 수행시간을 나타낸 그래프이다. 그림 5의 결과와 유사하게 시각정보의 지연시간에 상관없이 모든 경우 촉각정보의 지연시간이 늘어날수록 작업 수행시간이 늘어나고 있음을 확인할 수 있다.

그림 8은 이 경우 물체의 낙하횟수를 나타내고 있다. 촉각정보의 지연시간이 커질수록 낙하횟수도 증가하는 경향을 보이고는 있으나, 동기화 된 시점(붉은색 동그라미)부근의 낙하횟수는 예상되는 횟수보다 적어지는 경향을 관찰할 수 있다.

### IV. 결과분석 및 논의

그림 5, 그림 7은 촉각정보 또는 시각정보 지연시간 중 하나가 일정한 상태에서 다른 요소의 지연시간이 줄어들 경우 지연시간이 감소함에 따라 작업 수행시간 또한 줄어들고 있음을 보여준다. 이를 통해 작업수행 완료시간 단축을 위해서는 촉각정보, 시각정보 중 하나라도 단축해야 한다고 결론을 내릴 수 있다.

그림 6에서 확인하였듯이 모든 경우 시각과 촉각정보의 지연시간이 동기화 되었을 때 낙하횟수가 제일 적었다. 또한 그 경향은 촉각정보의 시간지연이 커질수록 큰 변화폭으로 나타났다. 본 실험결과를 통하여, 시각정보와 촉각정보가 동기화 되었을 때 정밀도 향상을 얻을 수 있으며, 촉각정보에 지연시간이 크게 나타나는 경우일수록 동기화를 통하여 향상되는 정밀도의 비율도 상대적으로 커진다는 결론을 얻을 수 있다.

그림 8에서는 시각정보의 지연시간이 일정할 때 촉각정보의 지연시간에 비례하여 낙하횟수가 증가함을 보여주었다. 하지만, 시각정보의 지연시간이 커질수록 촉각정보의 지연시간에 따른 낙하횟수의 변화 양은 적어지는 경향을 보여주었다. 또한, 시각정보의 지연시간이 600 msec 이상일 경우 촉각정보의 지연시간이 300 msec 일 때보다 0 msec 일 때 오히려 낙하횟수가 0.8회에서 0.9회로 증가하였다. 이를 통해 시각정보의 지연시간이 증가될수록 촉각정보가 작업 정밀도에 미치는 영향은 줄어들지만, 시각과 촉각정보의 동기화 시점 부근에서 정밀도가 가장 높을 것으로 예상된다. 또한, 한가지 더욱 흥미로운 점은 동기화 시점보다 촉각정보가 시각정보에 비하여 약간 빠른 경우 좀 더 나은 정밀도를 보이고 있다는 점이다.

그림 9는 촉각정보의 지연시간을 0 msec으로 고정 한 상태에서 시각정보의 지연시간을 증가시킨 결과와 시각정보의 지연시간을 0 msec으로 고정 한 상태에서 촉각 정보의 지연시간을 증가시킨 결과이다. 후자의 경우에 낙하횟수가 더 크게 변하고 있다. 낙하횟수는 작업의 정밀도를 반영하고 있으므로, 본 실험을 통해 작업의 정밀도는 촉각정보의 지연시간 크기에 더 영향을 받음을 알 수 있다. 또한, 영상 시간지연을 촉각지연 시간에 동기화 시켰을 때 낙하횟수가 전체적으로 줄어들음을 볼 수 있었다. 즉, 작업의 정밀도를 향상시키기 위해서는 영상정보의 데이터 양을 줄여 촉각정보와 동기화 시킴으로써 작업정밀도의 향상을 가져올 수 있다.

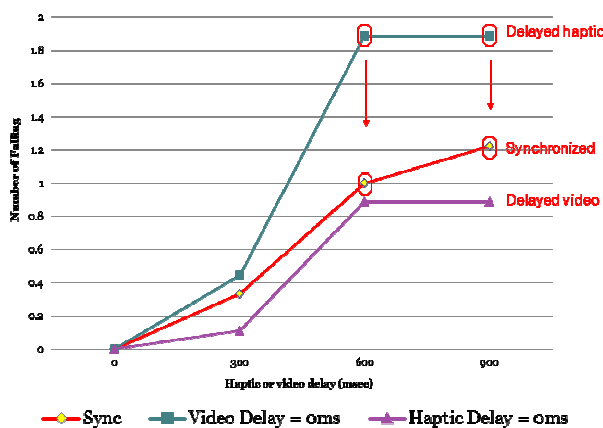


그림 9. 촉각정보가 고정된 상태에서 시각정보의 지연시간에 따른 낙하횟수, 시각정보가 고정된 상태에서 촉각정보의 지연시간에 따른 낙하횟수.

Fig. 9. Number of falling when haptic delay is fixed and video delay is changing, and when video delay is fixed and haptic delay is changing.

결론적으로 작업수행 완료시간 단축을 위해서는 촉각정보, 시각정보 둘 다 그 지연시간이 작으면 작을수록 좋다. 하지만, 정밀도가 요구되는 작업의 경우에는 촉각 및 시각의 지연시간이 동기화 또는 촉각이 조금 더 빨라야만 정밀도가 향상된 작업결과를 얻을 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

V. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 원격조종 로봇시스템에서 사용자에게 제공되는 시각, 촉각정보의 지연시간이 사용자의 작업수행에 미치는 영향을 조사하였다. 원격조종로봇시스템을 모형화하여 10명의 피실험자를 대상으로 각기 다른 16가지 시각, 촉각 지연시간 경우를 가지고 실험을 수행하였다.

촉각정보 또는 시각정보 지연시간 중 하나가 일정한 상태에서 다른 요소의 지연시간이 줄어들 경우 지연시간의 감소에 따라 작업수행시간 또한 줄어들고 있음을 확인하였다.

작업의 정밀도 평가에서는 시각정보와 촉각정보가 동기화된 경우가 일반적으로 높은 정밀도를 나타냈으며, 촉각정보에 지연시간이 있을 경우 촉각정보의 지연시간이 크면 클수록 시각정보와의 동기화에 의한 정밀도 향상이 상대적으로 크게 나타났다. 반면, 시각정보에 지연시간이 있을 경우 촉각정보의 지연시간이 작업정밀도에 미치는 영향은 뚜렷하게 나타나지는 않았다. 하지만, 이때에도 촉각정보와 시각정보의 시간차가 커질수록 정밀도는 낮아지는 경향을 보였다.

촉각정보의 데이터 량보다 시각정보의 데이터 량이 큰 것이 일반적이다. 이러한 경우 촉각정보의 지연시간을 동기화 시점 부근으로 조정함으로써 또는 반대로 시각정보의 시간지연을 촉각정보의 지연시간으로 동기화 시킴으로써 작업의 정밀도를 높일 수 있을 것이라고 예상된다. 작업의 성격에 따라 작업수행시간이 중요한 경우에는 시각정보의 지연시간을 줄여야 하고, 정밀도가 중요한 경우에는 촉각 정보와의 지연시간 차이를 줄여야 한다는 결론을 내릴 수 있었다.

향후 과제로서, 위 해석결과를 바탕으로 비디오 및 촉각 정보 피드백의 시간지연 차이가 존재함에도 불구하고 원격조종성을 유지할 수 있는 새로운 원격제어 구조 및 방법론에 대한 연구가 필요하다. 또한, 시각정보보다 정량적으로 어느 정도 빠른 촉각 지연시간이 최적의 정밀도를 도출할 수 있는지에 대한 연구도 현재 진행 중이다.

참고문헌

- [1] 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, 1989.
- [2] R. J. Anderson and M. W. Spong, "Asymptotic stability for force reflecting teleoperators with time delay," *International Journal of Robotics Research*, vol. 12, no. 2, pp. 135-149, 1992.
- [3] B. Hannaford and J. H. Ryu, "Time-domain passivity control of haptic interface," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 1, pp. 1-10, 2002.
- [4] Y. Yokokohji and T. Yoshikawa, "Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 10, no. 5, pp. 605-620, 1994.
- [5] T. B. Sheridan, "Telerobotics," *Automatica*, vol. 25, no. 4, pp.

487-507, 1989.

- [6] T. Kim, P. M. Zimmerman, M. J. Wade, and C. A. Weiss, "The effect of delayed visual feedback on telerobotic surgery," *Surgical Endoscopy*, vol. 19, no. 5, pp. 683-686, 2005.
- [7] J. M. Thompson, M. P. Ottensmeyer, and T. B. Sheridan, "Human factors in telesurgery: effects of time delay and asynchrony in video and control feedback with local manipulative assistance," *Telemedicine Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 129-137, 2004.
- [8] K. Onda, T. Osa, N. Sugita, M. Hashizume and M. Mitsuishi, "Asynchronous force and visual feedback in teleoperative laparoscopic surgical system," *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei, pp. 844-849, 2010.
- [9] I. M. L. C. Vogels "Detection of temporal delays in visual-haptic interfaces," *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society Spring*, vol. 46, no. 1, pp. 118-134, 2004.



**김 혁**

2009년 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부(공학사). 2011년 한국기술교육대학교 기계공학과(공학석사). 2011년~현재 한국내쇼날인스트루먼트 재직중. 관심분야는 Haptics, Teleoperation, Autonomous vehicle.



**유 지 환**

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