

최소침습수술용 Grasper의 힘반영 원격제어

윤병성[†] · 장대진* · 박태욱** · 양현석***

Force-Reflected Teleoperation of Grasper for Minimum Invasive Surgery

Byoung Soung Yoon, Dae Jin Jang, Tae Wook Park and Hyun Seok Yang

Key Words: Teleoperation, Force Reflection, Master, Slave, Minimal Invasive Surgery(최소침습수술), FSR

Abstract : The senses that a doctor can feel is limited in MIS(Minimal Invasive Surgery) which guarantees the fast recovery of the patient and minimal incision for going in and out of instruments through the tissue of the patient. In particular, the surgical robotic teleoperation system developed recently serves with only the information of eyesight and auditory sense. Therefore force-reflection is the most demanded element of the senses in manipulating surgical instruments. In this paper, we designed the Master system and the 2 D.O.F grasper for the robotic teleoperation system(Slave) that has two force sensors on the grasper. Particularly, we focused on serve to master's handle with the contact force between tissue and the grasper of Slave.

기호설명

B_1, B_2	: 와이어 감쇠 계수
J_m	: 모터와 모터 축의 관성
J_{f1}, J_{f2}	: 각 풀리의 관성
K_1, K_2	: 와이어 강성
q, \dot{q}, \ddot{q}	: 조인트의 위치, 속도, 가속도
r_m, r_{f1}, r_{f2}	: 풀리의 반지름
T_m	: 모터의 토크
T_L	: 인가 토크

1. 서론

인간의 동작에 있어서 그 정밀도는 한계가 있다. 따라서 의사의 정밀한 동작을 요구하는 뇌수술이나 척추수술과 같은 미세수술의 경우 의사의 수술에 대한 숙련도와 같은 경험에 의존하게 된다. 그리고 기존의 일반적인 수술방법의 경우, 환부에 수술도구를 접근시키기 위하여 외부의 조직까지 절개해야 하므로 환자의 긴 회복속도나 그에 수반하는 심한 고통이 따르게 된다. 이런 단점을 보완하기 위해 현대 의학기술은 Minimal invasive surgery(MIS), 즉 최소침습수술법이라는 수술방법을 개발하게 되었다. 이 수술법은 기존의 수술("open" surgery)과 비교하여 작은 절개로 환부에 접근할 수 있고, 따라서 환자의 회복속도와 고통을 현저히 줄일 수 있다. 하지만 대개 직경 15mm의 절개부를 통하여 30cm 길이의 수술기구를 다루는데, 이 때 수술을 위한 시야의 확보와 수술도구를 다루는 데 어려움이 있다.⁽¹⁾ 이를 보완하기 위해 많은 이들이 로봇을 활용한 원격조종 시스템(Teleoperation)을 대안으로 연구하고

[†] 연세대학교 대학원 기계공학과
E-mail : moldaw@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-2824 FAX : (02)364-6769

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 연세대학교 정보저장공학과

*** 연세대학교 기계공학과

있다.⁽²⁾ ⁽⁶⁾ 이러한 시스템은 수술 시 손의 피로와 떨림을 줄일 수 있고, 기존의 수술에 비해 더 정확한 수술이 가능하며 원격지에서의 수술이 가능해진다. 또한 비 숙련의를 위한 훈련 시스템으로의 사용이 가능하다.

그러나 현재 개발된 많은 시스템들은 vision에 의존하고 있고, 따라서 feedback을 얻을 수 있는 정보는 제한되어 오동작을 유발할 수 있다. 따라서 원격 조작에 있어 시술자가 정확히 인지할 수 있는 force feedback(또는 force reflection 힘 반영)이 절실히 요구된다.^{(3), (4), (5)}

따라서 본 논문에서는 실제 수술용 로봇에 적용이 가능한 endoscopic forceps(Slave)와 이에 대응하는 Master system을 구현하였다. 그리고 Master & Slave system을 구현하기 위하여 Master를 통한 위치명령에 대하여 Slave에 PD 제어를 사용하여 위치추종을 정확하게 하고, 조직을 위치제어 되고 있는 Forceps로 집었을 때 조직과 Forceps 사이에 작용하는 힘을 힘센서를 이용 측정하여 정확한 힘 반영을 구현하는 데 목적이 있다.

2. 시스템의 설계

2.1 설계목표

Teleoperation을 이용하여 위치 정보와 힘정보를 주고받는 Master-Slave 로봇을 설계하기 위해서는 정확한 위치 정보의 입력을 Master에 의해 Slave로 정확히 전달·제어되어야 하며, Slave가 외부 환경에서 얻을 수 있는 감각정보를 Master에 정확히 전달하여야 하고 시술자에게 감각정보를 인지할 수 있도록 하여야 한다. 이를 위하여 다음과 같은 요소들이 고려되어야 한다.

2.1.1 전달장치

전달장치 선정 시 Master-Slave 로봇의 성능을 높일 수 있도록 Backlash, 전달장치의 크기, 역구동성, 마찰, 제작의 용이성, 전달효율 등이 고려되어야 한다. 기어 감속기의 경우 Backlash의 문제점이 있어 정밀한 위치 정보를 요하는 로봇에는 적합하지 않다. 벨트의 경우 미끄러짐(Slip)이 생기는 단점이 있고 체인의 경우에는 질량이 크고 연속적인 동력 전달의 어려움이 있다. 와이어의 경우 전장력(Pretension)을 줄 경우 충분한 강성을 줄 수 있고 마찰과 Backlash를 제거할 수 있

Table 1 Pulley size affects cable strength

Ratio A	Strength efficiency (%)
40	95
30	93
20	91
15	89
8	83
4	75
1	50

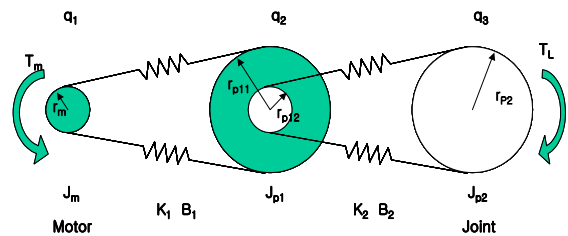


Fig. 1 Model of wire drive transmission

다는 장점이 있다. 따라서 본 논문에서는 와이어를 이용한 동력 전달장치를 사용하였다.

와이어 전달장치에서는 풀리의 직경의 비가 감속기의 기능을 한다. 본 논문에서 사용되는 Master & Slave 로봇의 감속비는 4:1로 하였다. 이것은 모터 축에서 엔코더를 통해 위치 정보를 얻어내는데 출력축의 작동 영역이 매우 작기 때문에 모터 축과 출력 축에 감속비를 두어 많은 위치 정보와 높은 토크를 얻어내고자 한 것이다.

풀리의 직경을 결정하기 위해서는 와이어 직경의 선정이 중요하다. Table 1에서 보는 바와 같이 시스템에서 가장 작은 축 풀리를 와이어 굵기의 20배를 사용한다면 91%의 강도를 유지할 수 있다. 여기서 A는 풀리의 직경과 와이어의 직경의 비율이다. 따라서 본 논문에서는 직경 0.5mm의 코팅 와이어를 사용하였고, Grasper가 약 15mm 정도의 절개부를 통하여 인체의 내부로 삽입되고 작동 영역 또한 제한되기 때문에 크기에 제약을 고려하여 설계 상에 허용할 수 있는 가장 작은 최적 크기의 풀리 직경을 10mm로 설정하였다.

본 논문에서 사용한 와이어 전달장치는 구동력을 전달하는데 있어 Fig. 1과 같이 2단 감속 구조를 가진다. 이에 대한 동역학 식은 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$J_m \ddot{q}_1 + 2K_1 r_m (r_m q_1 - r_{\mu 1} q_2) + 2B_1 r_m (\dot{r}_m \dot{q}_1 - r_{\mu 1} \dot{q}_2) = T_m \quad (1)$$

$$J_{\mu 1} \ddot{q}_2 + 2K_2 r_{\mu 2} (r_{\mu 2} q_2 - r_{\mu 1} q_3) + 2B_2 r_{\mu 2} (\dot{r}_{\mu 2} \dot{q}_2 - r_{\mu 1} \dot{q}_3) = (T_m - J_M \ddot{q}_1) \frac{r_{\mu 1}}{r_m} \quad (2)$$

$$J_{L2} \ddot{q}_3 = \left\{ (T_m - J_M \ddot{q}_1) \frac{r_{\mu 1}}{r_m} - J_{\mu 1} \ddot{q}_2 \right\} \frac{r_{L2}}{r_{\mu 2}} - T_L \quad (3)$$

상태 변수와 입력을 식(4)와 같이 정하고 상태 방정식으로 나타내면 식(5)와 같다.

$$\begin{matrix} X = [q_1 & q_2 & q_3 & \dot{q}_1 & \dot{q}_2 & \dot{q}_3]^T \\ u = [T_m & T_L]^T \end{matrix} \quad (4)$$

$$\dot{X} = AX + bu \quad (5)$$

여기서 와이어의 댐핑이 없다면 A와 b는 식(6)과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ K_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J_{L2}} \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

여기서 $K_{3 \times 3}$ 는 식(7)과 같다.

$$K_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} -2K_1 \frac{r_m^2}{J_m} & 2K_1 r_m \frac{r_{\mu 1}}{J_m} & 0 \\ 2K_1 r_m \frac{r_{\mu 1}}{J_{\mu 1}} & -2 \frac{(K_1 r_{\mu 1}^2 + K_2 r_{\mu 2}^2)}{J_m} & 2K_2 r_{L2} \frac{r_{\mu 2}}{J_{\mu 1}} \\ 0 & 2K_2 r_{L2} \frac{r_{\mu 2}}{J_{L2}} & -2K_2 \frac{r_{L2}^2}{J_{L2}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.1.2 작동영역

수술용 로봇에서 직접 환부와 접촉을 요하는 Slave 로봇은 매우 미세한 작업영역을 요구하기 때문에 Slave의 위치 정보를 주는 Master 로봇의 작업영역의 선정은 매우 중요한 설계변수이다. 따라서 본 논문에서는 와이어를 이용한 동력 전달장치를 사용한다. 마스터의 작업영역이 작으면 시술자의 위험과 작업 피로를 줄일 수 있고 작업영역이 크면 시술자가 작업 시 위험부담이 있는 Master와 Slave 사이의 위치 대응이 용이하고, 인

간이기 때문에 생기는 위치 오차를 줄일 수 있는 이점이 있다. 따라서 적절한 비율로 Master와 Slave 사이에 작업영역의 대응이 매우 중요하다. Master를 조작하는 시술자가 가장 편하게 시술할 수 있고 Master의 위치 정보와 Slave 로봇의 위치 정보를 정확히 Mapping하여 작업자의 명령을 좀 더 정밀하게 추종할 수 있도록 작업영역의 비율을 적절히 정해야 하며 이 때 Master의 작업한계와 Slave의 작업한계를 고려하여야 한다. 위의 사항을 충분히 고려하여 Master와 Slave의 작업영역의 비율을 2:1로 선정하였다.

2.1.3 힘반영

작업환경에서의 힘을 효과적이고 정밀하게 측정하기 위해서 가상의 스프링을 가정하여 기구학적 위치 정보를 가지고 힘을 계산하는 방법과 Grasper에 소형 센서를 장착하여 작용하는 힘을 구하는 방법이 있다. 전자의 방법은 물체를 집었을 때 입력에 일정한 힘을 주어 기구학적 위치가 변하는 정도에 따라 힘을 피드백하는 방법으로 외란에 민감한 센서에서 발생할 수 있는 노이즈를 고려하지 않아도 되고 로봇의 구조가 간단해지는 장점이 있다. 하지만, 링크사이의 조인트의 유격에 민감하여 정확한 결과를 얻기 어려우며 링크의 강성으로 인하여 측정할 수 있는 분해능이 떨어진다는 단점이 있다. 이에 반해 정확한 힘의 측정이 가능하고 미세한 힘을 측정할 수 있으며, 분해능을 향상시킬 수 있는 센서를 이용한 방법은 노이즈에 대한 대책이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 좀 더 정확한 힘을 측정하고 피드백하기 위해서 힘센서를 grasper 표면에 장착하여 힘을 측정하였고 Low pass filter를 사용하여 측정 노이즈를 제거하였다.

2.2 Master & Slave System

위에서 언급한 설계에서의 주안점을 바탕으로 하여 Master & Slave System을 제작하였다. MIS에 사용하는 실제 Endoscopic forceps를 기본 모델로 하여 설계하였다. 약 20mm의 직경의 절개부에 출입이 가능한 직경15mm의 프레임에 roll 운동을 하는 joint와 20mm의 길이를 갖는 Forceps를 장착하여 2 자유도의 운동이 가능하도록 하였다. 시술 시 인체 내부에서 동작하는 Forceps는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 최소 4자유도가 필요한데,

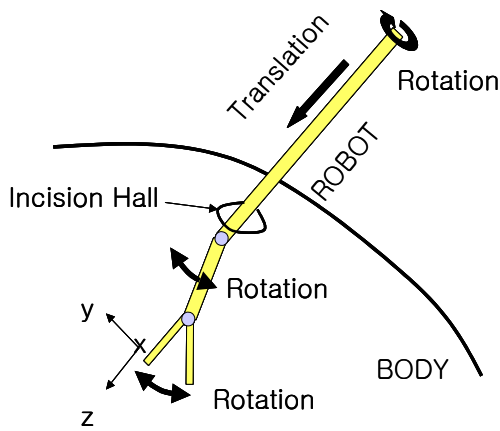


Fig. 2 4 D.O.F of surgical tools in MIS

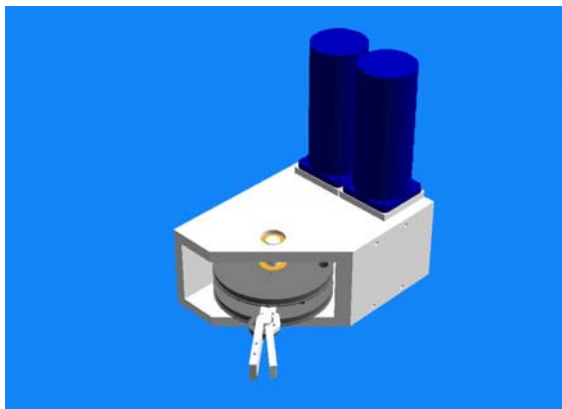


Fig. 3 Master System(Isometric view)

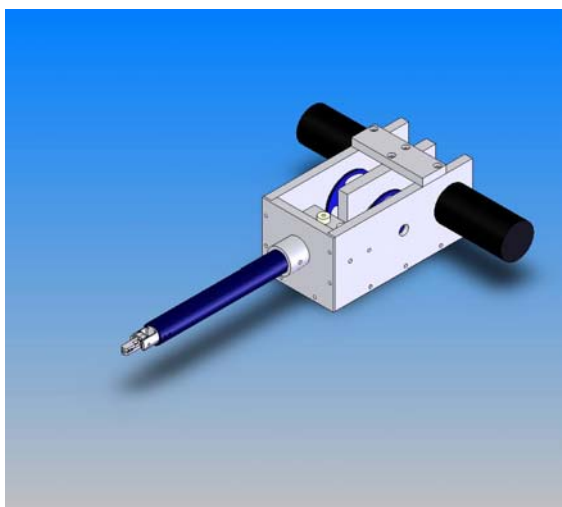


Fig. 4 Slave System(Isometric view)

본 로봇에서 2 자유도를 사용한 이유는 차후 grasper에 z축 방향으로의 roll 운동과 병진 운동

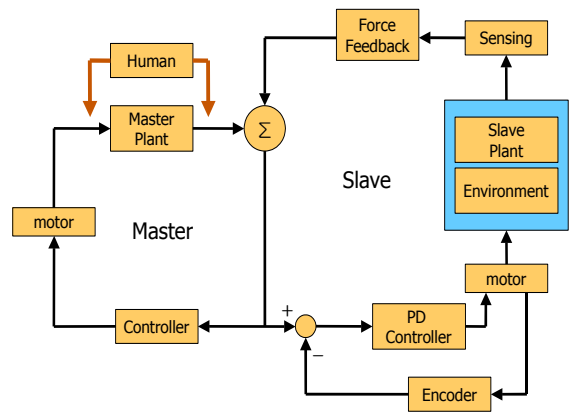


Fig. 5 Force feedback (teleoperation) control scheme

을 관장하는 구동부는 설계한 Slave의 구동부 전체를 움직일 수 있는 장치를 추가하면 쉽게 4자유도의 동작 구현이 가능해지기 때문이다. 따라서 인체 내부에서 이루어지는 Grasper의 동작만을 구현하기 위하여 2자유도만을 사용하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 설계한 Master와 Slave 로봇의 전체 형상이다.

3.제어기의 설계

본 논문에서 사용한 제어기의 구성은 그림 Fig.5와 같다. Slave가 Master의 위치 정보를 추종하도록 하기 위해 비례 미분 제어기를 사용하였다. 제어기를 통한 신호는 모터를 통하여 Slave를 구동하며 Grasper가 대상물에 접촉했을 때 작용하는 힘을 Feedback하고 Slave의 위치 정보와 조합하여 Master의 제어기에 신호를 전달하게 된다. 그리고 Master는 입력된 힘의 정보를 바탕으로 대응하는 토크를 발생시켜 조작자에게 힘을 전달하게 된다.

4.실험결과

4.1 실험 장치의 구성

앞서 설명한 로봇과 제어기를 가지고 Fig. 6과 같이 실험 장치를 구성하였다.

힘센서는 InterLink사의 FSR(Force Sensing Resistor)를 사용하였다. 이 센서는 인가된 힘에 대응하여 저항이 변하는 필름형 센서이다. 그리고 시스템을 구동하고 제어하기 위하여 Pentium

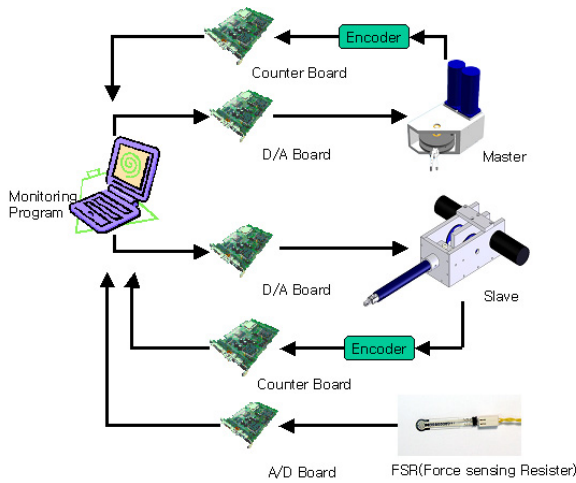


Fig. 6 Diagram of experimental equipments

PC에 D/A Board, Counter Board를 연결하였고, 센서를 읽기 위한 A/D Converter로 Darim DR 8330 보드를 사용하였다.

4.2 Grasper의 위치제어

Fig. 7은 Master에서 Forceps부분을 관장하는 핸들에 0.5Hz의 주기를 갖는 사인함수 입력을 주었을 때, 비례 미분 제어를 사용하여 Slave의 Forceps가 궤적을 추종하도록 하는 위치제어의 결과이다. 그리고 Fig. 8은 Master에서 Wrist부분을 관장하는 핸들에 0.5Hz의 주기를 갖는 사인함수 입력을 주었을 때, 비례 미분 제어를 사용하여 Slave의 Wrist가 궤적을 추종하도록 하는 위치제어의 결과이다. 두 그림에서 오차에 대한 결과를 살펴보면 Slave가 궤적을 정확히 추종하고 있음을 볼 수 있다.

4.3 힘반영을 이용한 토크전달

Fig. 9는 Master의 핸들을 임의로 구동하였을 때, 위치제어 상에 있는 Slave의 Forceps에 장착된 힘센서의 출력과 그에 대응하는 Master motor의 토크 출력 값에 대한 그래프이다.

센서의 출력 그래프에서 초기에 약 1V의 옅셋을 볼 수 있다. 이것은 센서를 구동하는데 필요한 전압에 의한 옅셋이다. 이러한 옅셋과 센서의 출력에 대응하는 힘을 고려해서 Master의 motor에 대한 입력 신호를 scaling하였다.

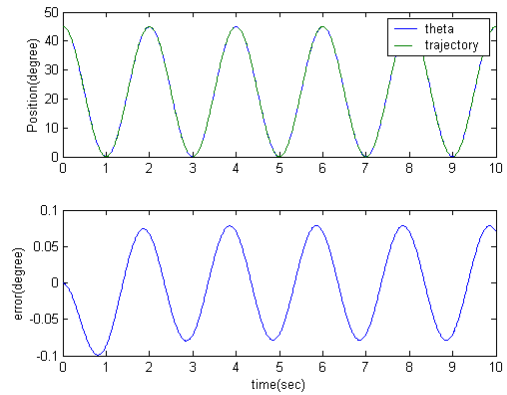


Fig. 7 Position tracking of Slave (Forceps)

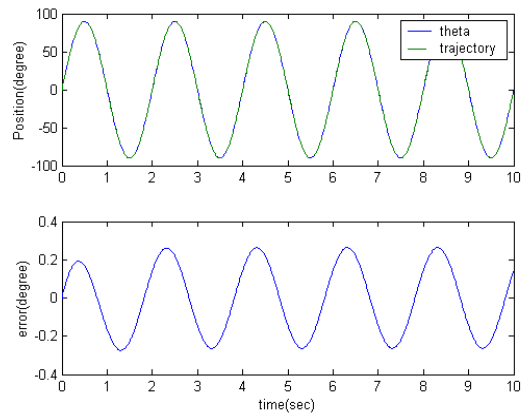


Fig. 8 Position tracking of Slave (Wrist)

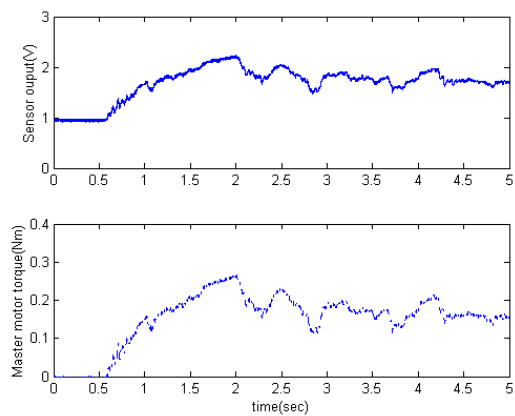


Fig. 9 Force reflecting result

5. 결론

본 논문에서는 실제 수술용 로봇에 적용이 가능한 크기와 구조를 가지는 2자유도의 endoscopic Forceps(Slave)와 이에 대응하는 Master system을 제작하였다. 그리고 Master & Slave system을 구현하기 위하여 Master를 통한 위치명령에 대하여 Slave에 PD 제어를 사용하여 위치제어를 수행하였다. 또한 위치제어 되고 있는 Forceps로 조직을 잡을 때 조직과 Forceps 사이에 작용하는 힘을 힘센서로 측정하여 Master의 모터가 측정된 힘에 대응하는 토크로 출력하도록 하여 만족할 만한 결과를 얻었다.

따라서 시술자가 환부에 대해 내시경을 통한 시각정보에만 의존하던 종래의 로봇을 이용한 MIS에 힘반영을 추가함으로써 힘에 대한 정보를 시술자에게 전달하여 시술자가 수술 부위에 대하여 좀 더 자세한 정보를 얻을 수 있도록 하였다. 또한 MIS의 수술환경이 미세하기 때문에 인간의 감각으로는 인지하기 힘든 수술 도구와 조직 사이에 작용하는 미세한 힘의 변화를 측정 scaling하여 시술자가 정확한 시술을 할 수 있도록 하였다.

참고문헌

- (1)S.K.Song, W.S.Kim, D.S.Kwon, H.S.Cho, 1997, "Analysis of Microsurgery Task for Developing Microsurgery Manipulator," Proceedings of the 12th Korea Automatic Control Conference, Vol.2, pp.1631~1634
- (2)Madhavan G., Thanikachalam S., Krukenkamp I., Saltman A., Aug.-Sept. 2002, "Robotic surgeons," Potentials, IEEE , Vol. 21 No. 3 , pp.4~7 (3)R. W. Daniel, P. R. McAree, Aug. 1998, "Fundamental limits of performance for force reflecting teleoperation," The International Journal of Robotics Research, Vol. 17, No. 8, pp.881~830
- (4)Gupta V., Reddy. N.P., Batur P., Oct.-3 Nov. 1996, "Forces in surgical tools: comparison between laparoscopic and surgical forceps," Engineering in Medicine and Biology Society, 1996. Bridging Disciplines for Biomedicine. Proceedings of the 18th Annual International Conference of the IEEE, Vol. 1, No.31, pp. 223~224
- (5)Rosen J., Hannaford B., MacFarlane M.P., Sinanan M.N., Oct. 1999, "Force controlled and teleoperated endoscopic grasper for minimally invasive surgery-experimental performance evaluation," Biomedical Engineering, IEEE Transactions on , Vol. 46 No. 10 , pp. 1212~1221
- (6)Madhani A.J., Niemeyer G., Salisbury J.K. Jr., 13-17 Oct. 1998, "The Black Falcon: a teleoperated surgical instrument for minimally invasive surgery," Intelligent Robots and Systems, 1998. Proceedings., 1998 IEEE/RSJ International Conference on , Vol. 2 , pp. 936~944
- (7)S.H.Kwon, 2002, "Force-reflected teleoperation of surgical grasper," Master's thesis, The Department of Mechanical Engineering, The Graduate School of Yonsei University
- (8)Mark W. Spong, M. Vidyasagar, 1989, "Robot Dynamics and Control," John Wiley & Sons Inc.