

# 최소침습수술용 로봇의 안전성을 위한 제어 및 HMI 개발

## Development of Control and HMI for Safe Robot Assisted Minimally Invasive Surgery

정희주<sup>1</sup>, 송현종<sup>1</sup>, 박장우<sup>1</sup>, 박신석<sup>1,✉</sup>  
Hoi Ju Jung<sup>1</sup>, Hyun Jong Song<sup>1</sup>, Jang Woo Park<sup>1</sup> and Shin Suk Park<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 고려대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Univ.)

✉ Corresponding author: drsspark@korea.ac.kr, Tel: 02-3290-3373

Manuscript received: 2011.2.25 / Accepted: 2011.6.13

*Recently, robots have been used in surgical area. Robotic surgery in Minimally Invasive Surgery gives many advantages to surgeons and patients both. This study introduce a robotic assistant to improve the safety of telerobotic Minimally Invasive Surgical procedures. The master-slave system is applied to the telerobotic surgical system with the master arm, which control the system, and slave robot which operates the surgery on the patient body. By using a 3-DOF master arm, the surgeon can control the 6-DOF surgical robot under the constraint of fulcrum point. This paper explains the telerobotic surgical system and confirms the system with the precision of the robot control related to the fulcrum point to enhance the safety.*

Key Words: Minimally Invasive Surgery (최소침습수술), Teleoperation (원격수술), Robot Surgery (로봇수술), Master-Slave System (주-종속 시스템)

### 1. 서론

복강경 수술이라 불리는 최소침습수술의 개발은 기존의 넓은 부위의 개복이 필요했던 외과수술을 획기적으로 변화시켰다. 최소침습수술은 작은 절개(~30mm)를 통해 수술이 이루어지므로 환자에게 고통과 외상 및 회복기간의 감소, 합병증 발생가능성의 최소화를 가져다 주었다. 이러한 장점 때문에 최근 거의 모든 범위의 외과수술 및 대부분의 질환에 최소침습적 방법이 사용되고 있다. 하지만 최소침습수술의 장점인 작은 개복은 시술자에게 환부의 직접적인 이미지 및 감각정보들을 제공해 줄 수 없고 작은 구멍을 거쳐 수술도구가 움직이기 때문에 수술도구의 조작이 직관적이지 못하다는 점, 좁은 공간확보로 인한 수술도구의 활동범위 제한 그리고 수술 보조자와의 원활하지 못한 관계 등의 제약이 따르게 된다.<sup>1</sup>

최소침습수술에 있어 이러한 단점은 로봇 기술의 도입으로 일부 해결되었다. 제우스(Zeus)나 다빈치(daVinci)와 같은 수술 로봇은 기존의 산업현장에서 사용되었던 로봇의 장점(빠르고 반복적인 작업 가능, 높은 정확성, 다양한 크기의 작업공간 확보 가능, 장기간 작업 가능, 컴퓨터로 제어할 경우 다양한 전자기기와의 접목 및 원격 제어 가능)을 그대로 이어 받을 뿐 아니라, 로봇 관절의 360도 회전을 통한 시술의 편함, 시술자의 움직임을 Scale-Down시켜 미세한 수술 및 봉합을 가능하게 한다.

최근에는 로봇 기술을 비롯해 더욱 다양한 공학기술의 도입이 수술 환경에 이루어 지고 있다. 기존 복강경 수술의 형태를 탈피한 단일공(Single-port)복강경 수술, 이미 존재하는 신체의 구멍인 자연개구부를 이용한 수술(NOTES)도 연구되고 있다.<sup>2,3</sup> 또한 제한적인 삽입부위를 통한 수술도구의 정확한 삽입을 위해 원격운동중심(RCM)을 이용한

수술도구의 삽입 메커니즘의 개발 또한 연구되고 있다.<sup>4,5</sup> 하지만 이러한 수술방법들도 최소침습수술의 장점은 가지고 있지만 직관적이지 못한 수술도구의 제어, 시각정보를 비롯한 감각정보의 부재 등은 여전히 보완해야 할 점으로 남아있다.

따라서 본 연구에서는 수술도구의 움직임을 그대로 구현하도록 개선된 마스터암을 통해 직관적인 제어가 가능한 원격 수술로봇 제어 시스템을 구성하였으며, 절개부위를 벗어나지 않는 제어를 통해 최소침습수술에서의 안전성 향상과 정확한 수술을 가능하게 하였다.

## 2. 수술 로봇을 통한 최소침습수술에서의 수술도구의 움직임 해석

일반적인 3 차원 공간에서의 물체가 임의의 지점에 임의의 방향을 가지기 위해서는 6 자유도가 필요하다. 그러나 최소침습수술에서 수술도구가 시술자가 원하는 수술지점에 도달하기 위해 가질 수 있는 자유도는 제한적이다.

기본적으로 최소침습수술은 환자의 몸에 세 개의 절개를 통해 수술을 진행한다. 이 때 절개된 부위를 포트(Port)라고 한다. 수술 도구는 항상 포트를 지나 수술부위에서 수술을 진행하게 된다. 이 때 수술도구는 포트를 기준으로 지렛대와 같은 움직임을 보이므로, 절개부위를 Fulcrum Point 라고도 한다.<sup>6,7</sup>

최소침습수술에서의 수술도구는 이 Fulcrum Point 의 제약으로 인해 자유도의 제한을 갖게 된다. Translation Motion 의 경우는 Fulcrum Point 의 제약으로 인해 축 방향의 움직임(In-and-Out Motion) 을 제외한 나머지 두 방향의 움직임은 불가능하다. Rotation Motion 의 경우 Roll, Pitch, Yaw 의 세 가지 움직임이 가능하다.

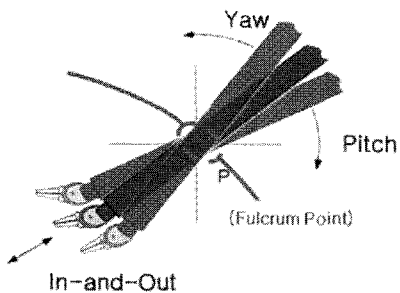


Fig. 1 Movement of surgical tools in Minimally Invasive Surgery

Fig. 1 은 수술로봇이 구현하여야 할 수술도구의 움직임을 나타내고 있다. 수술도구의 움직임은 1 가지의 Translation Motion 과 3 가지의 Rotation Motion 으로 나누어진다. 하지만 축 방향을 기준으로 회전을 나타내는 Roll Motion 의 경우 수술 도구 자체의 자유도를 사용한다면, 수술로봇은 1 방향의 Translation Motion 과 2 방향의 Rotation Motion 을 포함한 3 자유도를 구현하여야 한다.

## 3. 최소침습수술을 위한 마스터암

### 3.1 최소침습수술을 위한 마스터암 디자인

기존 최소침습수술의 경우 수술도구는 앞에서 설명한 바와 같이 Fulcrum Point 를 기준으로 지렛대와 같이 움직이기 때문에 수술도구의 복강내에서의 움직임과 외과의의 수술도구조작은 반대로 행해져 직관성이 떨어질 수 밖에 없다.

본 논문에서는 이를 개선하여 복강내에서의 움직임을 그대로 구현하도록 개선된 마스터암(Master Arm)을 수술로봇을 제어하기 위해 사용하였다. 최소침습수술을 위해 수술 로봇은 In-and-Out, Pitch, 그리고 Yaw Motion 을 구현할 수 있어야 한다. 따라서 마스터암도 In-and-Out, Pitch, 그리고 Yaw Motion 을 구현할 수 있게 디자인하였다.

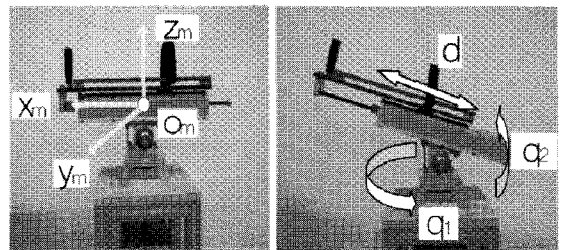


Fig. 2 Master Arm

Fig. 2 는 수술 로봇 제어를 위해 제작된 마스터암과 기준 좌표계 및 그 움직임을 보여주고 있다.  $O_m$  을 원점으로 정의된  $O_m - x_m y_m z_m$  좌표계를 기준으로 수술 도구가 Fulcrum Point 를 기준으로 환자의 몸 속에서 움직이는 움직임을 그대로 구현할 수 있어 마스터암의 움직임과 동일한 움직임으로 수술 도구를 제어하기 때문에 이를 통해 직관적인 조작성이 가능하다. 마스터암의 각 조인트에는 엔코더를 부착하여 각각의 위치정보를 알 수 있게 하였으며 중력의 보상을 위해 댐퍼를 부착하였다.

### 3.2 마스터암의 기구학적 해석

수술 로봇의 제어를 위해 먼저 마스터암의 기구학적 해석이 필요하다. 마스터암이 가지는 3 자유도를 In-and-out Motion 은 Prismatic Joint 로, Pitch Motion 과 Yaw Motion 은 Revolute Joint 로 각각 나타낼 수 있다.

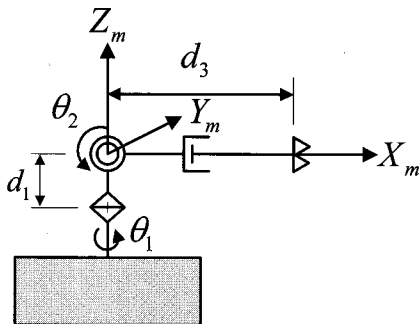


Fig. 3 Kinematic model of master arm

Fig. 3 은 마스터암의 기구학 모델을 나타낸 것이다. 마스터암의 Yaw Motion 은 Joint 1 의  $\theta_1$  으로, Pitch Motion 은 Joint 2 의  $\theta_2$  로, In-and-Out Motion 은 Joint 3 의  $d_3$  으로 설정하였다. Fig. 3 에서 나타내듯이 Joint 1 과 Joint 2 는  $d_1$  의 거리 차를 두고 위치한다. 하지만  $d_1$  의 거리 차는 단순한  $z_m$  방향의 평행이동을 의미하며  $d_1$  이 Kinematic 의 해석에 영향을 미치지 않는다. 따라서 기준 좌표계를 Link 1 과 Link 2 가 교차하는 지점 Fig. 2 에서의  $O_m$  에 위치하여  $d_1=0$  로 설정하였다.

Table 1 D-H parameters of master arm

Link Number	Link Length (mm)	Link Twist (rad)	Joint Offset (mm)	Joint Angle (rad)
1	0	$\pi/2$	$d_1 (=0)$	$\theta_1^*$
2	0	$\pi/2$	0	$\pi/2 + \theta_2^*$
3	0	0	$d_3^*$	0

\* : variables

Table 1 은 Denavit-Hartenberg 의 표현법에 따른 각 Link 및 Joint 의 파라미터 값을 나타내고 있다. 각 파라미터 값을 이용하여 마스터암의 Forward Kinematics 를 통해 식 (1)과 같이 End-Point 의 위치( $\mathbf{t}$ )를 다음과 같이 해석할 수 있다.

$${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (d_1 = 0)$$

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} d_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \\ d_3 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \\ d_3 \sin \theta_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

### 3.3 최소침습수술을 위한 수술 로봇의 제어

최소침습수술에서 수술도구는 수술 로봇에 부착되어 Fulcrum Point 를 기준으로 In-and-Out, Pitch, 그리고 Yaw Motion 을 하게 된다. 따라서 수술 로봇은 수술 도구가 Fulcrum Point 를 벗어나지 않으면서 수술 도구의 끝 단이 시술자가 원하는 지점에 도달하도록 제어되어야 한다.

### 3.4 수술 로봇의 기구학적 해석

수술 로봇은 기존의 산업용 로봇인 SAMSUNG FARA AT2 를 사용하였다. AT2 는 6 자유도 수직다관절 로봇으로 Joint 의 각 축은 Revolute Joint 로 이루어져 있으며, 수술 로봇이 구현하여야 할 자유도를 구현할 수 있다.



Fig. 4 Slave robot

### 3.5 마스터-슬레이브 시스템을 이용한 로봇 수술 시스템

본 시스템은 최소침습수술에 있어 보다 직관적으로 제어를 하기 위하여 개발된 마스터암을 통해 제어된다. 이때, 시술자에 의해 제어되어 동작의 주체가 되는 마스터암을 마스터(Master), 이에 종속되어 제어되는 수술 로봇을 슬레이브(Slave)라고 하며 이를 마스터-슬레이브 시스템(Master-Slave System)이라 한다. 마스터-슬레이브 방식은 로봇을

이용한 수술에도 널리 사용되고 있으며 실제로 다빈치나 제우스와 같은 최소침습용 수술에서도 적용되고 있다.

마스터 암으로 수술 로봇을 제어하기 위해서는 두 공간을 일치시켜 각각의 기준좌표계로부터 동일한 움직임과 방향을 갖게 하도록 제어하는 맵핑(Mapping)과정이 필요하다. 맵핑과정에 있어 두 점을 일치시켜야 하는데 마스터암에서 기준좌표계의 원점과 수술 로봇에서의 Fulcrum Point 를 항상 일치시켜야 하며, 동시에 마스터암의 끝 단의 위치와 수술 로봇에 부착된 수술 도구의 끝 단의 위치를 일치시켜 제어되도록 하여야 한다.

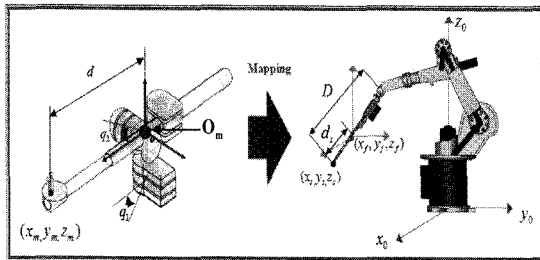


Fig. 5 Mapping relation between each coordinate system of master arm and slave robot

마스터암과 수술 로봇을 맵핑하기 위해서 Fig. 5 와 같이 마스터암의 원점(O<sub>m</sub>)을 기준으로 기준좌표계를 설정한다. 원점에서부터 끝 단까지의 거리 d 와 Pitch Motion 의  $q_2$ , Yaw Motion 의  $q_1$  의 변수를 통해 마스터암의 Forward Kinematics 를 이용하여 마스터암의 끝 단의 좌표를 알 수 있다.

수술 로봇에서는 Fulcrum Point 를 원점으로 하는 좌표계를 설정한다. 이 때 Fulcrum Point 는 실제 수술에서 Port 에 해당되는 위치로 맵핑과정에서 마스터암의 원점(O<sub>m</sub>)과 맵핑된다. 마스터암의 원점에서부터 끝 단의 위치는 수술 로봇의 Fulcrum Point 에서부터 수술 도구의 끝 단의 위치와 맵핑된다.

최소침습수술의 경우 여러 부위의 수술이 가능하기 때문에 수술의 종류와 수술 부위의 위치, 환자의 신체 크기에 따라 작업공간(Work Space)의 크기가 달라지게 된다. 이를 위해 마스터암의 원점에서 끝 단의 위치에 스케일 상수를 도입하여 실제 수술 로봇의 제어에 있어 Fulcrum Point 에서 수술 도구의 끝 단의 위치까지의 거리를 작게, 혹은 크게 맵핑할 수 있다.

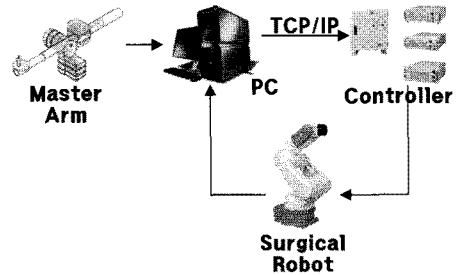


Fig. 6 Control the slave robot(surgical robot) by master arm

Fig. 6 에 나타나듯이 마스터암과 PC, controller 와 Surgical Robot 을 이용하여 본 논문에서 제안한 시스템을 구성하였다.

#### 4. 실험결과

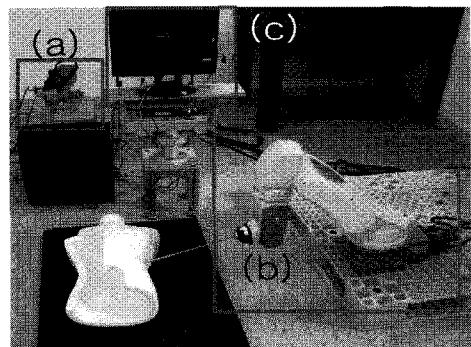


Fig. 7 Telerobotics surgical system

Fig. 7 은 본 논문에서 제안한 시스템의 실제 구성 모습이다. Fig. 7 에서 (a)는 마스터암을, (b)는 수술 로봇을, 그리고 (c)는 수술 상황을 보여주는 화면이다.

실험은 마스터암의 움직임에 따른 수술 로봇의 추종성과 이 때의 Fulcrum Point 의 변화를 확인하였다. 마스터암의 움직임은 각각 In-and-Out Motion, Yaw Motion, 그리고 Pitch Motion 이며, 이 때의 마스터암의 끝 단의 좌표와 수술 로봇에 부착된 수술 도구의 끝 단의 좌표를 비교하였다.

Fig. 8 은 마스터암을 각각 전후, 좌우, 상하로 움직였을 때의 마스터암의 끝 단과 수술 로봇에 부착된 수술 도구의 끝 단의 움직임을 나타낸 것이다. 푸른색 선은 마스터암의 끝 단의 위치를, 붉은색 선은 수술 도구의 위치를 나타내고 있다.

Fulcrum Point 의 위치 변화를 알아보기 위해

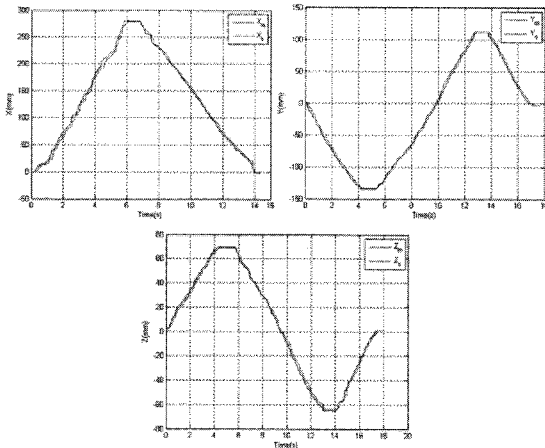


Fig. 8 x, y, and z position of end point of master arm and slave robot

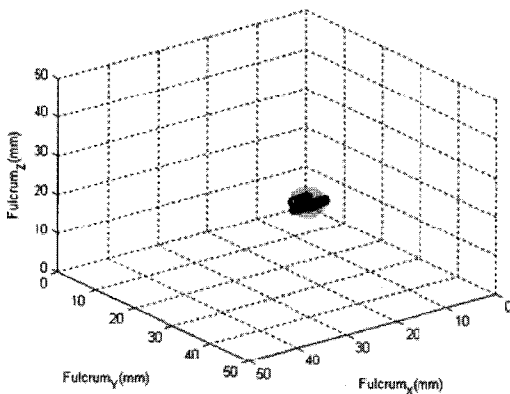


Fig. 9 x, y, and z position of fulcrum point

In-and-Out Motion 으로 실험을 수행해 보았으며 Fig. 9 는 그 결과이다.

Fig. 9 는 수술 로봇의 동작 중 Fulcrum Point 의 변화를 나타내고 있다. 설정된 Fulcrum Point 를 기준으로 Maximum Distance Error 가 8.12mm 이며, RMSE(Root Mean Square Error)는 2.72mm 이다. 로봇의 움직임이 Fig. 9 에서 나타나듯이 Fulcrum Point 를 기준으로 크게 벗어나지 않음을 시각적으로 확인할 수 있다. 그리고 이 Error 는 로봇 자체의 관성에 의한 변화로, 이 흔들림을 고려한다고 하더라도 Fulcrum Point 의 변화는 거의 없다고 할 수 있다.

**5. 결론**

본 논문에서는 최소침습수술을 위한 원격 로봇

수술 시스템을 개발하였다. 본 논문에서 개발한 시스템은 수술 로봇을 이용한 수술 중 수술도구가 지정된 Fulcrum Point 를 벗어나지 않도록 제어할 수 있어서 안정성을 확보하였다. 또한, 수술도구의 움직임을 그대로 구현한 마스터암을 적용한 Master-Slave 시스템으로 시술자가 수술도구를 직관적으로 원격 제어할 수 있게 하여 편리성을 제공 하였으며, 기존의 수술도구와 같은 3 자유도를 구현하였다. 이러한 수술도구의 뛰어난 직관성은 시술자의 피로를 줄이는데도 기여할 수 있으며 수술의 정확도와 안정성을 높일 수 있다. 최소침습 수술에서 용인되는 Fulcrum Point 에서 발생한 오차는 수술의 종류와 수술 부위에 따라 차이가 있지만 본 논문에서 제안한 시스템의 오차는 용인할 수 있는 정도이다.<sup>8</sup> 그리고 본 시스템에 서론에서 언급한 원격운동중심(RCM)을 이용한 수술도구의 삽입 메커니즘을 본 시스템에 적용한다면, 수술도구가 Port 에 작용하는 힘의 크기를 줄여 오차를 감소시킬 수 있으며 이를 통해 더욱 안전한 수술을 할 수 있을 것으로 기대된다.

**후 기**

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2010-0027294).

**참고문헌**

1. Howe, R. D. and Matsuoka, Y., "Robotics for Surgery," Annual Review of Biomedical Engineering, Vol. 1, pp. 211-240, 1999.
2. Swanstrom, L. L., "Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery," Endoscopy, Vol. 41, No. 1, pp. 82-85, 2009.
3. de la Fuente, S. G., DeMaria, E. J., Reynolds, J. D., Portenier, D. D. and Pryor, A. D., "New Developments in Surgery : Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery (NOTES)," American Medical Association, Vol. 142, No. 3, pp. 295-297, 2010.
4. Hata, N., Hashimoto, R., Tokuda, J. and Morikawa, S., "Needle Guiding Robot for MR-guided Microwave Thermotherapy of Liver Tumor using Motorized Remote-Center-of-Motion Constraint," IEEE

- International Conference on Robotics and Automation, pp. 1652-1656, 2005.
5. Bector, E. M., Webster, R. J. III, Mathieu, H., Okamura, A. M. and Fichtinger, G., "Virtual Remote Center of Motion Control for Needle Placement Robots," 6th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI), Vol. 9, No. 5, pp. 175-183, 2004.
  6. Locke, R. C. O. and Patel, R. V., "Optimal Remote Center-of-Motion Location for Robotics-Assisted Minimally-Invasive Surgery," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1900-1905, 2007.
  7. Coste-Manière, E., Adhami, L., Severac-Bastide, R., Lobontiu, A., Salisbury, J. K. Jr., Boissonnat, J.-D., Swarup, N., Guthart, G., Mousseaux, E. and Carpentier, A., "Optimized port placement for the totally endoscopic coronary artery bypass grafting using the Da Vinci robotic system, in Russ, D. and Singh, S. (Eds.), Lecture Notes in Control and Information Sciences, Experimental Robotics VII," Springer-Verlag, Vol. 271, pp. 199-208, 2001.
  8. Seo, K. W., Lee, D. W. and Min, B. R., "A 3-D Information Acquisition Algorithm for Close Range Endoscopy," World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, Vol. 14, No. 4, pp. 2612-2615, 2006.