

# 복강경 수술을 위한 지능형 작동기의 제작

송호석<sup>†</sup>·정종하\*·이정주\*\*

## Design of Dexterous Manipulator for MIS

Ho-Seok Song, Jong-Ha Chung and Jung-Ju Lee

**Key Words:** Minimal Invasive Surgery(최소침습수술), Robot Aided Surgery(로봇원용수술)

### Abstract

Minimally Invasive Surgery (MIS) is surgery of the chest, abdomen, spine and pelvis, done with the aid of a viewing scope, and specially designed instruments. Benefits of minimally invasive surgery are less pain, less need for post-surgical pain medication, less scarring and less likelihood for incisional complications. Since the late 1980's, minimally invasive surgery has gained widespread acceptance because of the such advantages. However there are significant disadvantages which have, to date, limited the applications for these promising techniques. The reasons are limited degree-of-freedom, reduced dexterity and the lack of tactile feeling. To overcome such disadvantages many researchers have endeavored to develop robotic systems. Even though some robot aided systems achieved success and commercialized, there still remain many thing to be improved. In this paper, the robotic system which can mimic whole motions of a human arm by adding additional DOF is presented. The suggested design is expected to provide surgeons with improved dexterity during minimally invasive surgery.

### 기호설명

$J$ : 자코비안 행렬(Jacobian Matrix)

$\sigma$ : 특이값(Singular Value)

### 1. 서론

최소침습수술(Minimal Invasive Surgery)이란 환부의 크기를 최소화하는 수술을 통칭하는 것으로서, 복강경 수술(Laparoscopy)은 최소침습수술의 대표적인 예이다. 복강경 수술은 배를 완전히 열고 수술하는 개복수술(Open Surgery)과 달리 배에

몇 개의 작은 절개공 (small incision) 을 내고 배에 가스를 채워 수술공간을 만든 후, 절개공을 통해 복강경 (Laparoscope) 과 수술용 작동기 (Manipulator) 를 넣어 복강경이 제공하는 영상을 보면서 수술용 작동기로 수술을 수행하게 된다. 이러한 수술을 시행하게 되면 개복수술과 달리 수술 후 통증이 적고, 장운동의 조기 회복 및 음식물의 조기 섭취가 가능하며, 입원 기간이 짧고, 정상생활로의 복귀가 빠르며, 수술창(절개 부위) 축소로 인한 미용효과가 우수하다는 장점을 가진다. 이러한 장점들로 인해 복강경 수술은 담낭절제술이나 충수절제술, 탈장 교정술, 비장 절제술 등의 많은 부분의 수술에 사용되고 있고, 그 분야를 점점 더 넓혀가고 있는 추세이다.

이러한 장점에도 불구하고 복강경 수술은 조종하기 힘든 수술용 도구와 절개공을 통하여 도구를 움직여야하는 어려움등 때문에 복잡한 작업이 필요한 수술에서는 어려움을 보여왔다[1]. 트로카르(Trocar)는 절개공을 뚫고, 수술동안 복피에 머물

<sup>†</sup> 한국과학기술원 기계공학과(KAIST) 원

E-mail : hosek@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3073 FAX : (042)869-3095

\* 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 원

\*\* 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과

러 있으면서, 복강경과 수술용 작동기의 출입구가 되는 기구이다. 트로카는 복강경과 작동기의 피봇(Pivot)역할을 하게 되는데, 이로 인해서 절개공 안과 밖의 좌표가 대칭이 된다. 따라서 복강경과 작동기를 동작하는 사람은 자신이 움직이고자 하는 방향의 상하좌우를 반대로 움직여야 한다. 이로 인하여, 숙려된 의사와 숙련된 보조의가 필요하게 된다. 또한 복강경의 영상이 입체감을 느끼기 어렵다는 단점도 가지고 있다. 그러나 그중 가장 심각한 제한 요인은 수술용 툴의 자유도의 감소이다. 현재 사용되고 있는 수술용 도구들은 입구가 되는 트로카를 통해서 트로카 방향으로 이동하는 1자유도의 움직임과 트로카를 중심으로 하는 3자유도의 회전만을 할 수 있기 때문에 최대 4자유도의 움직임 만을 가지게 된다. 결과적으로 집도의가 수술용 도구를 원하는 위치로 이동시킬 수는 있지만 도구의 접근 방향은 제어할 수 없게 된다. 단순한 작업을 위해서는 이러한 4자유도의 움직임 만으로 충분하지만 수술 부위의 봉합이나 수술사의 매듭을 짓는 등의 복잡한 작업에는 많은 어려움이 있게 된다. 또한 지렛대의 받침 역할을 하고 있는 트로카의 움직임과 제한된 작업공간도 수술을 어렵게 만드는 하나의 요인으로 작용하고 있다. 이러한 단점으로 인하여 원격조종을 통한 수술용 로봇의 필요성이 꾸준히 제기되어왔다.

그 중 복강경의 문제를 해결하고자 한 것으로 AESOP<sup>®</sup>(Computer Motion, Inc.)과 Endoassist<sup>®</sup>(Armstrong Healthcare, Inc.) 이 있다. 이 로봇들을 사용함으로써, 복구 안과 밖의 좌표의 엇갈림(mismatching)을 없애고, 보조의 없이 떨림이 없는

안정된 영상을 얻게 되었으나, 크기가 거대하고 명령을 내리는데 많은 불편함을 가짐으로, 새로운 문제점들을 야기하게 되었다. 또한 작동기의 자유도 부족을 해결하기 위해 최근 개발된 것으로 Da Vinci<sup>®</sup>(Intuitive Surgical, inc.) System과 Zeus<sup>™</sup>(Computer Motion, Inc.) System이 있다. 이들은 모두 FDA의 승인을 얻은제품으로 Zeus는 5자유도의 움직임이, Da Vinci는 6자유도의 움직임이 가능하다. 그 중 Da Vinci는 손목의 움직임을 모사한 Endowrist<sup>®</sup>를 사용함으로써, 대부분의 경우 Zeus보다 우수한 결과를 나타낸다[2].

그러나, 6자유도의 움직임이 가능하다고 해도, 아직 개복수술에 비해서는 자유도가 부족하다. 일반적으로 사람팔은 손가락의 움직임을 제외하면 7자유도의 움직임을 갖는다. 손목에서 회전의 2자유도(pitching & yawing), 팔꿈치에서 회전의 2자유도(twisting & pitching), 어깨에서의 각축을 중심으로의 회전 3자유도를 갖게 된다. 여기에 몸을 숙이거나 비틀 때에 팔이 앞뒤(In and Out)로 움직이는 것과 같은 효과를 내므로, 팔의 전체적인 앞뒤 직선운동(In and Out Translation)을 고려하면, 팔의 움직임을 8자유도로 모델링 할 수 있다. 한 연구에서는 만약 현재의 복강경 수술에서 개복수술과 같이 사람팔의 움직임을 정확히 모사할 수 있다면, 수술 시간은 약 15%정도 단축될 것이라는 연구결과를 발표한 적이 있다 [3]. 따라서, 본 연구에서는 기존의 6자유도의 움직임에 팔꿈치의 움직임을 모사하는 2자유도를 추가, 사람팔의 움직임에 최대한 가깝게 움직이는 8자유도의 수술용 작동기를 제작하여 자유도의 부족문제와 함께, 작업공간(Workspace)의 부족 문제를 해결하고자 한다.

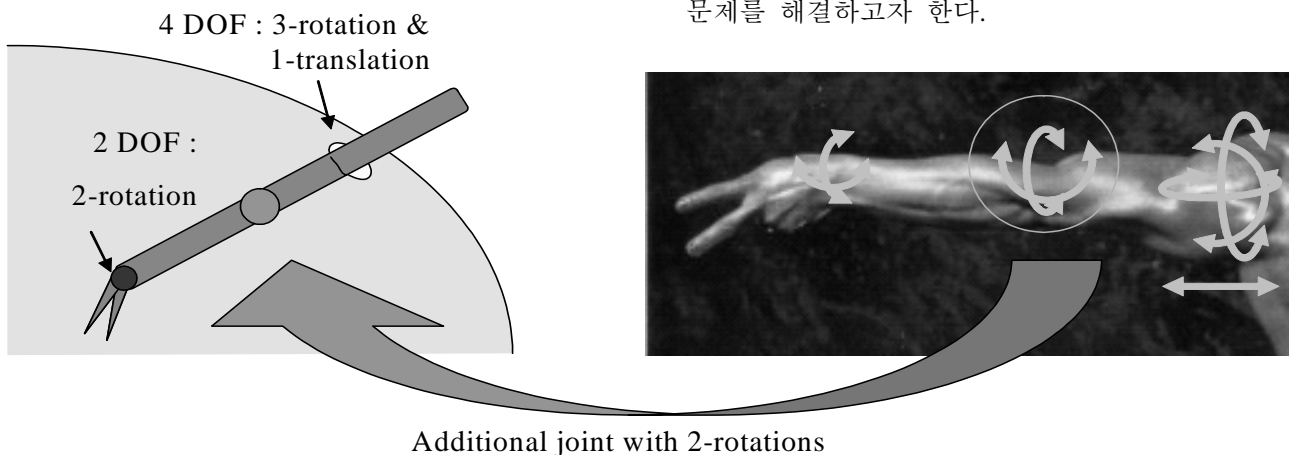


Fig. 1 Design Concept

## 2. 설계 변수

최소침습수술을 위해 설계되는 작동기에는 몇 가지 고려해야 제한 조건이 있다. 그 중 가장 중요한 요소는 크기이다. 최소침습수술은 트로카를 통해 작동기를 넣어야 하기 때문에, 작동기의 외경은 트로카의 내경보다 작아야 한다. 그 외에도 도구의 끝단에 걸리는 힘 문제나 반복성 등의 문제가 있다.[1]

**크기(size)** : 작동기의 외경은 트로카의 내경보다 작아야 한다. 현재 사용되는 트로카의 직경은 5~15 mm 로 다양하나 프로토타입인 점을 고려하여 가장 큰 크기 15 mm 에 맞추어 설계하였다.

**강도(force)** : 작동기가 동작할 때, 가장 큰 힘이 걸리는 부위는 작동기의 끝단 (end effector) 이다. 보통 가장 큰 힘이 요구되는 봉합(Suturing) 작업을 할 때 작동기의 끝단에 걸리는 힘은 약 10N으로 알려져 있다. 따라서 최소 10N의 힘을 견딜 수 있도록 설계하였다.

**속도(speed)** : 사람이 손으로 동작하는 것에 오류없이 동작하기 위해서는 약 3~5 Hz 정도의 속도를 갖는 것이 적당하다.

**반복성(repeatability)** : 일반적으로 사람의 반복성에 대한 오차는 약 1 mm 정도로 알려져 있다. 여기서는 기계로 동작하는 만큼 사람의 반복성보다 뛰어난 0.25 mm의 오차를 갖도록 설계하였다.

**기민성(Dexterity)** : 연구의 목표가 기존의 6자유도에 2자유도를 추가하여 기민성을 높이는 것에 있는만큼, 기민성은 가능한한 크게 하는 것을 목표로 삼았다.

**작업공간(Workspace)** : 2자유도를 추가하여 기민성을 최대화 했으므로, 작업공간은 그에 비례하여 커질 것으로 예상된다.

**사용자에 대한 편리성** : 사람의 팔을 모사한 만큼, 기구적 유사성(Kinematic Resemblance)을 최대한 만족시켜 사용자가 처음 접하더라도 쉽게 이해하고 쓸 수 있도록 하였다.

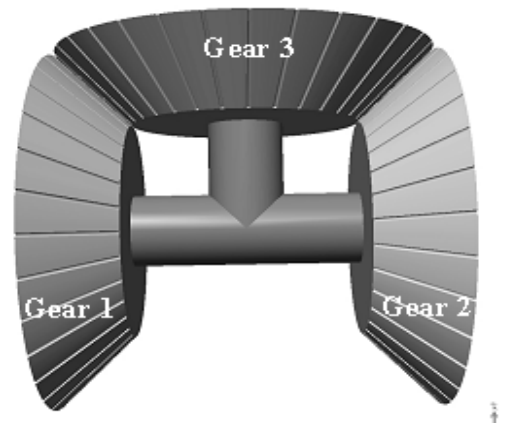
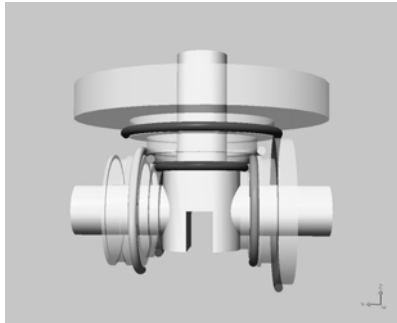


Fig. 2 Differential Drive

## 3. 세부 설계

### 3.1 팔꿈치(Elbow unit)의 모사

팔꿈치는 비틀림(Twisting)과 상하회전운동(pitching)의 2자유도 모션을 가지고 있다. 이것을 가능하게 하기 위하여, 차동 구동기(Differential Drive)의 메카니즘을 사용하였다. 차동 구동기는 수직으로 만나는 3개의 기어를 이용하여 구성되는데 2개의 기어(Gear 1,2)가 입력이 되고 하나의 기어가 출력부(Gear 3)가 된다. 입력부의 기어가 같은 방향으로 회전을 하면 출력부분은 도구의 축에 수직인 방향으로 회전하게 되며 입력부의 기어가 다른 방향으로 회전하게 되면 출력부는 도구의 축과 평행한 방향으로 회전하는 움직임을 내게 된다. 복강경 수술을 위해서는 작은 절개공을 통해 작동기가 들어가야 하므로 기어들의 크기가 매우 작아져야 한다. 따라서, 차동 구동기를 기어들로 만들 때에는 무리가 따르므로 폴리와 와이어 시스템을 사용하여 기어로 이루어진 것과 같은 기능을 하는 차동 구동기를 설계할 수 있다[4]. 기어로 만들어진 차동 구동기와 마찬가지로 두 입력폴리가 같은 방향으로 회전하게 되면 출력부는 축에 수직인 방향으로, 다른 방향으로 회전하게 되면 축과 평행한 방향으로 돌게 된다. 이 때, 와이어는 인장(Tension)을 받을 때만 힘을 지탱하므로, 양쪽 방향으로의 회전을 위해 각각 2 개씩, 총 4 개의 와이어를 필요로 한다.



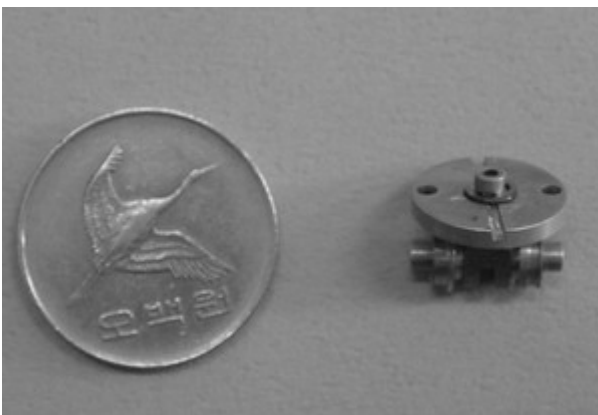
**Fig. 3** Differential drive with pulleys

3.2 손목(Wrist unit)의 모사

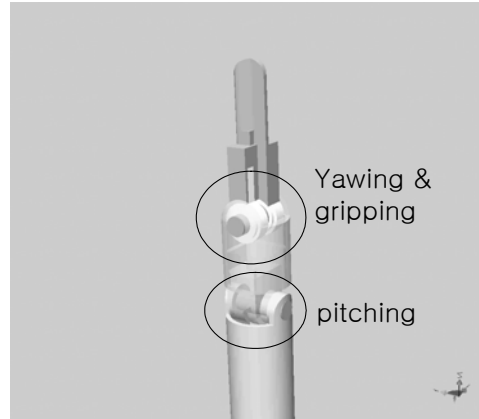
손목은 상하회전운동(Pitching)과 좌우회전운동(Yawing)의 2자유도의 움직임을 갖는다. 그것에 작동기 끝의 집게부위의 자유도까지 고려하면 총 3자유도의 모션이 필요하다. 이것을 효율적으로 구현하기 위해서 그림 5 와 같은 설계를 하였다.

아래의 축을 중심으로 하나의 회전이 가능하며, 위쪽의 두 개의 풀리로 또 하나의 회전과 집기 운동이 가능하다. 만약, 두 풀리가 같은 방향으로 회전하면 집게의 회전운동이, 서로 다른 방향으로 회전하면 집게의 여닫음 운동이 일어나게 된다.

이 때, 독립적으로 회전하는 부분은 모두 3곳이므로, 와이어를 이용하여 움직이자면, 기본적으로 6개의 와이어가 필요하게 된다. 이것은 앞에서 언급했다시피, 와이어가 인장힘을 받았을 때에만 힘을 지탱하기 때문이다. 그러나 작동기



**Fig. 4** Differential drive



**Fig. 5** Wrist unit

의 직경이 15 mm 로 제한되어 있기 때문에, 와이어를 6개 사용하기에는 공간상의 제약이 따른다. 따라서, 다음과 같은 케이블링(Cabling) 전략을 이용하여 끝단에서의 와이어를 4개로 줄일 수 있다.[5]

P1~P7은 풀리이고, M1~M4는 모터를 지칭한다. C1~C6는 케이블(Cable) 을 나타낸다. 축 A(Axis A) 와 축B(Axis B)는 손목의 움직임을 구현한 두 축이며, 캡스톤 A (Capstan A)와 캡스톤 B(Capstan B)는 집게의 풀리로 이루어진 부분을 나타낸다. 그림을 살펴보면 P5 - M4 - C4 - P4 - C4 - Capstan B - C1 - P1 - C1 - M1 - P5의 루프(Loop)가 구성되어 있다. 이 루프를 L1이라고 한다. 비슷하게 P6 - M3 - C3 - P3 - C3 - Capstan A - C2 - P2 - C2 - M2 - P6로 L2라는 루프를 구성하고 있다. 따라서 M1과 M4가 반대 방향으로 돌면 루프 L1 자체가 회전하는 것이 되어 축 A를 중심으로 캡스톤B가 움직인다. 마찬가지로 M2와 M3가 반대 방향으로 회전하면 L2가 자체 회전을 하여 축 A를 중심으로 캡스톤A가 움직인다. 또 M1과 M4가 같은 방향으로, 또 M2, M3가 그것의 반대방향으로 회전하면 축 B를 중심으로 회전 운동이 일어나게 된다.

**Table 1** Summary of moving way

M2 <-> M3	Capstan A about axis A
M1 <-> M4	Capstan B about axis A
M2&M3 <-> M1&M4	Pitching about axis B

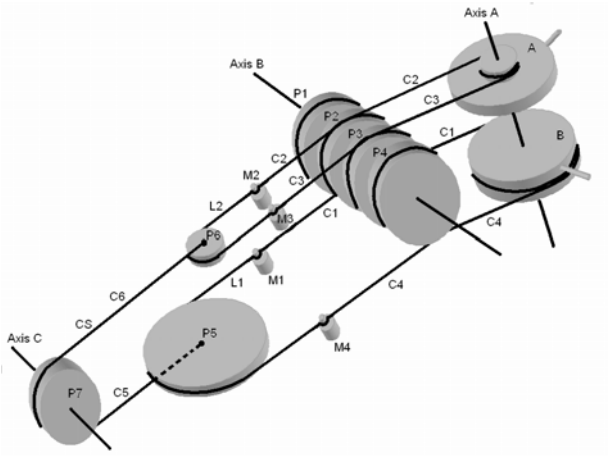


Fig. 6 Cabling scheme for reduced number of wires

#### 4. 결 론

설계된 작동기의 전체 모습은 그림 7과 같다. 설계된 작동기의 기민성(Dexterity)이 증가했는지의 여부를 확인하기 위해 조작성(Manipulability), 조건수(Condition Number), 최소 특이값(Minimum Singular Value) 의 3가지 방법으로 기민성을 측정해 보았다.

- 조작성 :  $\sqrt{Det(J \cdot J^T)}$
- 최소특이값 :  $\sigma_{min}$
- 조건수 :  $\sigma_{max}/\sigma_{min}$

표 2에서 보는바와 같이 팔꿈치에 해당하는 2 자유도의 움직임을 추가함으로써, 기민성이 향상되었음을 알 수 있다. 이로 인하여, 작업공간도 넓어지고, 더욱 복잡한 절차를 가지는 수술에 응용될 것을 기대해 볼 수 있다. 또한 사람팔과의 기구적 유사성을 실현함으로써, 처음 사용하는 사람도 직관적이고 쉽게 사용할 수 있어 사용을 위한 교육시간도 많이 단축될 것을 기대해 볼 수 있다.

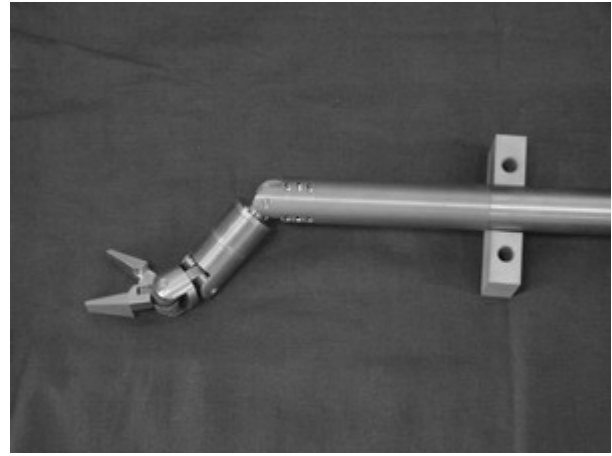


Fig. 7 Shape of manipulator for MIS

Table 2 Dexterity Measures

	without Elbow Design			Suggested Design		
	max	min	mean	max	min	mean
manipulability	0.5	6.5	1.9	1.0	7.6	3.9
Min. Sin. Value	0.08	0.61	0.36	0.14	0.72	0.44
Cond. Num.	0.026	0.10	0.076	0.034	0.10	0.079

#### 후 기

이 논문은 한국과학재단의 인간친화 복지로봇 시스템 연구센터(Human-friendly Welfare Robot System Engineering Research Center)의 후원을 받아 작성하였으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

[1] William C. Nowlin, Gary S. Guthart, Robert G. Younge, Thomas G. Cooper, Craig Gerbi, Steven J. Blumenkranz, Dean F. Hoornaert, 2003, "Grip Strength with Tactile Feedback for Robotic Surgery", *US Patent 6,594,552 B1*

[2] Gyung Tak Sung and Inderbir S. Gill, 2001, "Robotic Laparoscopic Surgery : A Comparison of the da Vinci and ZEUS Systems", *UROLOGY* Vol.58, Num.6, pp893-898.

- [3] A. J. Hodgson, R. A. Pantazopol, M. D. Visser, S. E. Salcudean and A. G. Nagy, 1997, "Assessing Potential Benefits of Enhanced Dexterity in Laparoscopic Surgery", *Proc. IEEE/EMBS*, pp 1966-1969.
- [4] J. Kenneth Salisbury, Jr., William T. 썸썸, David M. DiPietro, Brian S. Eberman, 1990, "Compact Cable Transmission with Cable Differential", *US Patent 4,903,536*
- [5] A. J. Madhani, 1998, "Design of Teleoperated Surgical Instruments for Minimally Invasive Surgery", *Doctoral Thesis*, pp121-124.