수술용 로봇 햅틱 시스템 구성을 위한 저관성 마스터 장치 핸들부 개발

Development of Low-inertia Master device for Haptic system configuration of surgical robot

강 병 호¹, 윤 성 민¹, 이 민 철[†], 김 지 언²

Byeong-Ho Kang¹, Sung-Min Yoon¹, Min Cheol Lee[†], Chi-Yen Kim²

Abstract When using commercialized robot assisted laparoscopic, surgeon has met some problems to depend only on image of the surgical field. To solve it, there were various researches. The previous study showed that it is possible to estimate the operation force on the commercialized instrument inside patient without sensors. To apply the estimated force to a haptic master console for the laparoscopy surgical robot system, the light haptic master console should be designed. This paper suggests the design of lighter master console handle to reduce a weight of the console whose structure can match with the joint and DOF of an instrument. A cable-conduit mechanism is designed to make light structure to perform a delicate manipulation. The cable-conduit mechanism removes the weight and inertia of link caused by haptic actuator and encoder which is separated from handle link of a manipulator.

Keywords: laparoscopy surgical robot, haptic master console, cable-conduit mechanism

1. 서 론

복강경 수술은 트로카(trocar)의 작은 구멍을 통해 인스트루먼트(instrument)를 체내에 삽입하여 이를 체외에서 조작하여 수술하는 기법이다. 따라서, 전통적 개복수술에 비해 최소침습에 따른 빠른 회복과 낮은 감염 위험성으로 각광을 받고 있다.

또한 초기에는 의사가 인스트루먼트를 직접 조작하

여 수술을 집도하였으나 로봇기술의 접목으로 복강경 수술용 로봇이 개발되어 기존의 복강경 수술을 대체해 나가고 있다. 복강경 수술용 로봇을 이용한 수술의 경우 의사는 환자와 떨어진 마스터 콘솔에서 편안한 자세로 핸들을 조작하여 수술을 집도하므로, 장시간 수술 시 피로도를 낮출 수 있다. 특히 로봇의 정밀한 제어를 통해 손 떨림 등의 문제점을 해결할 수 있는 장점이 있다^[3].

하지만 복강경 수술용 로봇을 이용한 수술의 경우 기존의 복강경 수술처럼 인스트루먼트를 직접 조작함에 따른 감촉을 느낄 수 없어 단지 화상정보에만 의존하여 수술을 수행해야 하는 어려움이 있다. 따라서 의사의 화상정보에 의존한 수술환경 적응과 조직파괴 및 봉합 시술 시 강도 조절 등에 대한 높은 숙련도가 요구되고 수술 시 조직 및 장기 파손과 같은 위험성이 항상 내재되어 있다^[4,5].

이러한 문제점을 해결하기 위해 복강경 수술 로봇에 파지 또는 봉합과 같은 수술 시 나타나는 여러 동

Received : May 3, 2012; Reviewed : May 24, 2012; Accepted : Nov. 6, 2012

※ This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (2012-0004668)

※ This research was financially supported by the Ministry of Education, Science Technology (MEST) and National Research Foundation of Korea(NRF) through the Human Resource Training Project for Regional Innovation

[†] Corresponding author: School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-Gu, Busan, Korea (mclee @pusan.ac.kr)

¹ Graduated of Mechanical Engineering, Pusan National University (kbh8548@nate.com), (tatice@gmail.com)

² Division of Mechanical Engineering Technology, Yeungnam College of Science & Technology (chiykim@ync.ac.kr)

작에 따른 반력 등을 감지할 수 있는 햅틱(haptic)기능을 부여하여 이미지 정보와 더불어 현실감 있는 수술 환경 정보를 전달함으로써 안전성을 보장할 수 있는 방법이 강구되었다⁶⁻⁹⁾.

하지만 인스트루먼트는 일정횟수 사용 후 폐기해야 하는 소모성 부품임으로 햅틱 기능을 위한 센서 융합 시 경제성 문제와 체내의 전자기 장치 사용에 따른 안전성 문제와 같은 부수적인 문제점들이 발생할 수 있어 햅틱 기능의 상용화는 아직 미흡한 상황이다. 하지만 센서를 사용하지 않고 햅틱 신호를 추정할 수 있는 기술이 연구되고 있어 차츰 상용 시스템의 햅틱 기능 구현 가능성이 높아지고 있다¹⁰⁾. 또한 햅틱 기능이 구현되기 위해서는 현재 복강경 수술용 로봇의 마스터 장치 핸들도 개선이 되어야 한다. Fig. 1의 우측은 현재 상용화된 복강경 수술용 로봇인 da Vinci에서 사용되는 마스터 핸들이고 좌측은 인스트루먼트 팁(tip)을 나타낸다. 실제 인스트루먼트 말단부위의 자유도는 3+1인 반면 말단부위 조작에 사용되는 마스터 핸들의 경우 4+1자유도로 조작의 유연성 확보를 위해 여유자유도가 부여되어 있다^{11,12)}. 따라서, 인스트루먼트의 자유도에 따라 햅틱 기능 구현 시 인스트루먼트와 마스터 핸들 사이의 자유도 차이를 고려 해야 하는 문제점이 발생한다. 또한, 마스터 핸들은 핸들 조작에 따른 움직임을 측정하기 위해 엔코더가 장착이 되어야 할 뿐만 아니라 햅틱 기능 구현 시 힘 발생을 위한 액츄에이터(actuator)가 장착 되어야 한다. 때문에 핸들의 관성하중 증가가 불가피 하다. 관성하중 증가는 햅틱 기능 구현 시 힘을 느낄 수 있는 임계력을 높아지게 하는 문제점을 야기시킨다. 따라서 수술과 같이 작고 섬세한 햅틱 힘이 요구되어야 하는 시스템에서는 현재의 마스터 콘솔에 장치된 핸들부와 같은 구조는 햅틱

기능 구현이 어렵다.

이에 햅틱 구현을 위한 마스터부 핸들의 경량화 구조 및 여유자유도 문제를 해결할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 기초 연구로서 현재 상용화 되어진 수술용 로봇에 햅틱 기능 구현에 적합한 저관성 마스터 핸들을 설계하고자 한다. 저관성 마스터 핸들을 구현하는 메커니즘으로 cable-conduit 구조를 적용하여 각 관절의 움직임을 측정하는 엔코더와 햅틱 힘을 발생시키는 액츄에이터를 마스터 핸들 내부에서 분리시키는 방법을 제안한다

본 논문 2장에서는 cable-conduit 구조를 적용한 저관성 마스터 핸들의 구조를 설명하고 3장에서는 cable-conduit 메커니즘에 대한 모델과 특성에 대한 실험평가를 수행한다. 4장에서는 제작된 마스터 핸들을 이용한 움직임 측정의 실험적 평가를 수행하며 마지막으로 5장에서 연구의 결과를 정리하여 결론을 기술한다.

2. 마스터 핸들 설계

2.1 구동부

서론에서 언급하였듯이 현재 상용화된 수술용 로봇인 다빈치 시스템은 의사의 편안함과 동작 피로도를 줄이기 위해 여유자유도를 가진 핸들부를 채택하고 있다. 하지만 햅틱 구현의 관점에서는 여유자유도에 대해서는 제어의 어려움과 동시에 관성하중의 증가라는 문제점을 유발하게 된다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 기존 4+1자유도 대신 인스트루먼트 말단장치와 동일한 3+1 자유도로 1:1 매칭되는 구조를 설계하였다.

Fig. 2는 중동부에 해당되는 마스터 핸들의 설계 개념도를 나타낸다. 형상의 이해를 돕기 위해 삼각법의 투상법과 입체 도형을 같이 배치하였다. 이 설계의 주

Fig. 1. Instrument tip and master handle structure of Intuitive Surgical, Inc. - da Vinci Surgical System

Fig. 2. Design concept of master handle

안점으로는 마스터의 경량화를 위해 프레임 두께를 줄였고, 손잡이를 손으로 쥐었을 때, 상용화 되어있는 다빈치의 경우 finger grip 형이지만, 이를 손바닥 전체로 쥌 수 있는 power grip 형태로 구현하였다. 인간공학 연구에 관한 문헌^[15]에서는 finger grip 형이 power grip 형보다 5배 이상의 피로도를 느낀다고 기술하고 있다. 이에 본 설계에서는 power grip 형태를 채택하였다. 이는 현재 상용화되어 있는 햅틱 디바이스인 force dimension의 sigma 7의 경우도 마찬가지이다^[19]. 그리고 핸들의 작업공간(workspace)과 사람의 작동 영역을 기반으로 핸들의 크기를 결정하였다. Fig. 3은 일반적인 손 운동의 범위와 그 크기를 나타내며 이의 데이터를 근거로 설계 치수를 결정하였다^[13].

Fig. 4에서는 제안한 마스터 핸들 설계 구조와 Endowrist 인스트루먼트 말단장치의 조인트를 서로 대비시켜 매칭됨을 보여준다. Fig. 4에서 보듯이 인스트루먼트 팁의 조인트 구조 및 yaw와 pitch 축의 움직임

Fig. 3. Mean range of motion^[13]

Fig. 4. Comparison between designed handle and Endowrist instrument tip

형태를 그대로 매칭시켜 설계를 하였다. Roll과 pitch 축은 인스트루먼트와 같이 한 점으로 모여있다. 따라서 인스트루먼트 말단부 각 조인트에서 발생하는 햅틱 신호를 핸들의 각축에서 별도 변환 없이 적용을 할 수 있도록 설계를 한 것이 특징이다.

2.2 종동부

본 연구에서는 저관성 마스터 핸들의 관성 및 하중 경감을 위해 cable-conduit 메커니즘을 채택하였다. 마스터 콘솔의 핸들은 의사의 수술 동작을 추종하는 것이 메인 기능이다. 이를 위해 마스터 핸들에는 모든 조인트에 엔코더를 부착하여 움직임을 측정한다. 하지만 엔코더의 조인트 부착은 핸들의 관성하중을 증가시킨다. 또한 수술 실감을 위해 햅틱 기능 구현을 위한 액추에이터로 모터를 장착해야 하는데 엔코더에 비해 부가 하중은 더 커진다. 하지만 cable-conduit 구조는 핸들 조인트와 엔코더, 모터를 분리 시킬 수 있다. 이를 통해 공간상에 구애 받지 않고 자유롭게 조인트의 움직임을 엔코더로 전달하며, 역방향으로 모터의 회전력을 조인트로 전달하여 햅틱 장치의 실감 기능을 구현할 수 있는 장점이 있다.

Fig. 5는 핸들부 반대편에 cable-conduit 이 연결되는 종동부로서 pretension을 조절할 수 있으며 cable-conduit을 통해 전달되는 핸들의 움직임을 측정하기 위한 엔코더와 햅틱 액추에이터용 모터가 밀집된 구조로 구성시킨 설계도이다. 설계된 종동부는 마스터 핸들의 조인트 개수만큼 제작하여 연속으로 배치하여 최종적으로는 Fig. 6과 같이 전체 구성도를 완성한다.

Fig.6은 구동부와 종동부가 결합된 구성도를 나타내며, 종동부의 각 조인트와 구동부 풀리 사이에는 cable-conduit 구조를 통해 연결 하였다.

Fig. 5. Designed haptic control

Fig. 6. Total schematic diagram of master handle

3. Cable-conduit구조

본 논문에서는 마스터부의 핸들에 cable-conduit 메커니즘을 적용한다. cable-conduit 메커니즘에서 conduit와 cable의 상대 움직임과 conduit의 압축 시 강성 지지부가 됨을 이용하여 cable의 힘과 변위를 전달하는 방식이다. 본 장에서는 이에 대한 분석과 핸들에의 적용 가능성에 대한 오차분석을 수행한다.

3.1 Cable-conduit구조 메커니즘

Agrawal은 그의 논문에서 cable-conduit 메커니즘의 동역학에 대해 상세히 분석하였다^[14]. cable-conduit의 지배방정식에서 가장 두드러진 것은 conduit는 cable의 인장 방향으로 인장력이 발생시 이와 반대 방향으로 압축력이 작용하여 cable을 공간상에서 지지하게 된다. 따라서 cable-conduit의 모델에서 가장 두드러진 특징은 conduit와 cable 사이의 마찰 모델이며 아래 식과 같이 나타난다.

$$u''(x,t) - \frac{d\theta(x)}{R(x)} u'(x,t) \sin(\dot{u}(x,t)) = 0 \quad (1)$$

여기서 $f(x,t)$ 는 cable의 마찰력이고, μ 는 마찰 계수이며, 쿨롱마찰 모델을 적용할 때 $N(x,t)$ 는 cable과 conduit 사이의 수직 항력이다. 수직 항력 $N(x,t)$ 은 cable의 축 방향의 tension $T(x,t)$ 과 관계된다. 일반적인 cable conduit형상은 Fig. 7과 같은 라운드 형상이 되며 이에 기반하여 정리하면 식 (2)와 같이 나타난다.

$$|f(x,t)| \leq \mu N(x,t) = \mu T(x,t) d\theta(x) = \mu T(x,t) \frac{dx}{R(x)} \quad (2)$$

상기의 마찰력을 기반으로 지배방정식을 유도하면

식(3) 과 같이 마찰력이 *Sign* 함수 형태로 나타난다.

$$u''(x,t) - \frac{d\theta(x)}{R(x)} u'(x,t) \sin(\dot{u}(x,t)) = 0 \quad (3)$$

특히 형상 곡률인 $R(x)$ 가 분모항에 함수 형태로 나타나는 특징을 보인다. 따라서 마찰항의 영향력을 최소화 하기 위해서는 conduit의 직선화가 필요하다.

마찰항은 단순히 구동력에만 영향을 미치는 것이 아니라 *Sign* 함수에 의해 역방향으로 바뀌는 동안 backlash를 유발하게 된다. 이는 cable의 전달 지연으로 slacking 현상을 야기 시킨다.

마스터 핸들에서 slacking이 나타나면 시간 지연과 동작 오차로 나타나 방향이 바뀌는 곳에서 잘못된 계측을 야기 시킬 수 있다. 따라서 이 문제를 막기 위해, 마찰계수가 작은 cable-conduit 재료를 선택하고, cable-conduit의 곡률형상은 최대한 줄여 가능한 한 쪽 뺨은 직선 형태로 마스터 콘솔 핸들을 구성 하도록 한다.

Fig. 7 Force balance diagram^[14]

3.2 Cable-conduit의 동작 추종 실험 장치 구성

Agrawal의 또 다른 논문에서는 복강경 수술용 로봇에 cable-conduit 시스템을 슬레이브 로봇암에 적용한 사례가 있다^[16,17]. 하지만 복강경 수술용 로봇의 마스터 핸들에 적용한 선행 연구가 없고 특히 햅틱 구현성에 관해서도 연구가 없어서 본 논문에서는 Cable-conduit 구조의 변위 전달성과 힘 전달성에 관해 실험을 수행한다. 우선 본 절에서는 이를 평가 할 수 있는 실험 장치를 구성 한다.

실험 장치는 Fig. 8과 같이 한 쌍의 장치로 구성하였다. 각각의 장치에는 pretension을 측정 할 수 있는 로드셀과 cable을 연결하는 폴리(pulley), 이 폴리를 구

동 혹은 측정 할 수 있도록 엔코더와 모터를 설치하였다. 또한 cable의 pretension을 조절 가능 할 수 있게 하였고 이를 위해 cable과 conduit 경계를 짓는 conduit plate를 설치하였다.

3.3 Cable-conduit 의 회전 전달 특성 평가

구동부와 종동부의 추종 성능과 위치 전달관계를 실험적으로 평가하기 위해 구동부 풀리에 설치된 모터에 반복적인 궤적동작을 주고 종동부 풀리 움직임을 엔코더로 측정 하였다. Fig. 9에 나타난 결과를 보면 단축만 동작시켰을 시 slacking 의 영향이 적음을 확인 하였다. 직경 60mm 풀리에서 동작하는 cable의 평균 오차는 0.36도로 나타났고 시간 지연 역시 50ms 로 작은 값이 나왔다. 따라서, 핸들의 모션 추종은 충분히 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 8. Evaluating system of cable-conduit

Fig. 9. Test result of motion transmission

3.4 Cable-conduit 힘 전달 측정 실험

햅틱 기능은 힘 전달 특성에 기반을 두고 있어 본 절에서는 cable-conduit의 힘 전달 특성을 평가하고자 한다. 힘 전달 측정을 위해서 Fig. 10과 같이 토크센서를 추가하여 실험장치를 구성하였다. 첫 번째 실험은 우선 모터의 토크제어 평가를 위해 입력 전류를 삼각파 형태로 주어 구동하고 이에 따른 모터의 토크를 토크센서를 통해 직접적으로 측정하였다. 두 번째 실험에서는 동일한 모터의 입력 파형을 부가하고, cable-conduit

Fig. 10. Experiment equipment to measure the force transmission to master handle

Fig. 11. Experimental result of force transmission by cable-conduit according to motor torque

으로 구성된 중동부 폴리에 토크센서를 부착하여 토크를 측정하였다.

Fig. 11은 실험 결과를 보여주고 있다. 입력 전류 파형은 삼각파로 입력을 하였지만, 모터의 내부 정지 마찰 때문에 일정 시간 이후와 일정 크기 이상의 전류가 인가되어야지 움직이기 시작하였으며, 또한 전류가 떨어지고 있어도 마찰에 의해 일정 시간 유지를 하다가 급속히 떨어지는 파형으로 나타남이 확인 되었다. 비록 모터의 점성과 마찰에 의해 입력 파형이 전류의 파형과 상이하게 나타났지만, cable-conduit으로 전달된 힘은 모터에 주어진 구동전류와 유사하게 나타남이 확인 되었다. 또한, 시간 지연은 앞 절 3.3장의 변위 전달 지연과 동일하게 최대 50ms 정도로 나타났다. 따라서 마찰의 영향으로 약간의 시간 지연은 있으나 cable-conduit 메커니즘으로도 햅틱 구현이 가능함을 실험적으로 확인 되었다.

4. 마스터 핸들 동작의 측정 실험

4.1 실험 구성

본 절에서는 제안한 설계들을 실제 제작 하였다. Fig. 12는 실제 제작한 마스터 핸들부 이다. 핸들부는 상용화된 복강경 수술용 로봇 인스트루먼트의 4축을 기반으로 Roll, Pitch, Yaw 그리고 Finger의 움직임을 나타낼 수 있는 구조로 설계하였으며, 제안된 설계에 따라 제작 하였다.

제작된 재질은 가볍게 하기 위해 알루미늄을 사용하였으며, 무게는 핸들 전체를 지지하는 부분을 뺀 움직임이 있는 부분만 측정 하였다. 제작된 마스터 핸들은 무게와 관성력을 줄이기 위해 회전 각도 센서인 엔코더와 모터를 마스터 핸들에서 분리해 cable-conduit에 의해 힘이 전달 되도록 Fig. 12(b)와 같이 중동부를

(a) Handle part

(b) Haptic control box part

Fig. 12 Realized system figure

따로 설계 배치하였다.

Table 1은 제작된 마스터 핸들 구동부의 사양과 상용화 되어 있는 제품들을 작업영역(workspace)과 무게를 비교해서 나타낸다. 제작된 마스터 핸들부가 타사 제품에 비해서 햅틱 구현을 위한 엔코더 및 구동 모터 부를 분리함으로 무게 및 관성이 타사제품들과 비교해 많이 줄어 들었음이 확인 되었다.

Table 2는 제작된 마스터 핸들 구동부와 중동부를 연결하는 cable 과 conduit의 사양을 나타낸다^[18].

Table 2와 같이 cable의 재질은 stainless steel 이며, nylon 으로 코팅된(coated) 것을 사용 하였다. 두께는 코팅 된 상태에서 0.87mm 이다. Break strength 는 40.8kg 이다. 그리고 conduit은 시중에 팔고 있는 자전거용 기어 걸선을 사용 하였다. Conduit의 구조는 가장 안쪽 내부가 직경이 2mm로 된 tube로 되어있고, 중간에는 conduit이 강성을 가지기 위해 stainless steel 이 tube를 둘러 싸고 있다. 그 외부에는 코팅된 형태로 외부 두께는 5mm의 직경을 가진다.

Table 1. Haptic handle spec comparison^[19]

Model	Work space	Weight(kg)
PHANTOM Desktop	160Wx120Hx120D mm	3.6
PHANTOM Omni	160Wx120Hx70D mm	1.8
Sigma. 7	235x140x200 deg	2.5
Proposed Handle	200x180 x 250 deg	0.9

Table 2. Specification of proposed handle system

	Cable	Conduit
Material	Stainless steel(nylon coated)	Stainless steel
Thickness	0.87 (mm)	Outcasing 5(mm)

4.2 마스터 핸들 움직임 측정 실험

Fig. 13은 마스터 핸들의 추종 성능을 측정 하는 실험 장치를 나타낸다.

실험 방법은 마스터의 3축을 각각 control box인 중동부에 cable-conduit 구조를 적용하여 서로 연결 시킨다. 그리고, 마스터의 동작을 받기 위해 엔코더를 3축의MMC 보드에 연결하였다. 핸들의 입력은 모션이기 때문에 본 연구에서는 로봇을 활용하여 동작 모션을 생성시켰다. 사용된 로봇은 Intelitek 사의 SCOBROT ER-9 인 수평 관절 로봇이다. 로봇의 오차 정도는 $\pm 0.005\text{mm}$ 로 정밀하다.

실험에서는 로봇 end-effect arm의 Roll, Pitch, Yaw

Fig. 13. Experimental test of master handle

방향의 회전 모션을 생성시켰다. Roll 궤적은 20도 돌렸다가 0.15초를 쉬고, 다시 원점으로 와서 -20도로 돌아와 0.15초를 쉬고 다시 원점으로 돌아오는 것을 반복하였다. 그리고 Pitch운동은 원점에서 +15도로 돌렸다가 0.2초를 쉬고, 다시 -30도를 내려가서 0.2초를 쉬는 사인파형태 궤적이며 마지막으로 Yaw는 Pitch의 운동과 유사하나, 원점에서 0.2초를 각각 쉬면서 반복

(a) Roll movement

(b) Pitch movement

(c) Yaw movement

Fig. 14. Test result of each joint movement

하였다.

Fig. 14는 로봇의 궤적과 측정된 결과 및 오차를 나타낸 실험 결과이다. Roll의 경우 오차가 0.5도 이내로 작은 값이 나왔지만, Pitch와 Yaw에서는 큰 오차가 발생하였다. 이는 Fig. 15에서 보는 바와 같이 로봇의 gripper가 end-effect에서 일정 거리만큼 떨어져 부착되어 로봇의 Pitch 및 Yaw 축과 핸들의 Pitch 및 Yaw 축이 서로 일치되지 못해서 나타난 오차로 판단된다.

Fig. 15. Misaligned figure of axis between robot and handle

5. 결론

본 연구는 복강경 수술용 로봇의 마스터 콘솔에 수술 작업 시 발생하는 반력을 느낄 수 있는 햅틱 기능을 부여 하기 위해 저 관성 마스터 핸들을 개발 하였다. 특히 마스터 핸들의 무게와 관성력을 줄이기 위해 cable-conduit 구조를 적용 하였다.

단축에 대한 cable-conduit 메커니즘의 모션 전달 성능과 힘전달 성능을 실험적으로 평가해 보았다. 햅틱 마스터 핸들을 구성하기에 충분히 작은 오차 값으로 추종됨이 확인 되었고 50ms 의 시간 지연이 확인되었지만 cable-conduit 메커니즘의 힘의 전달이 가능함이 확인 되었다. 또한 마스터 핸들의 4축 조인트로 확장하여 실험장치를 구성하여 입력에 대한 추종성능을 평가하여 보았다. 비록 성능 실험에 있어서 Pitch와 Yaw 운동의 경우에는 로봇의 구동 좌표계와 조인트가 불일치 하여 오차가 나타났지만, 동일한 축 상에서 움직였던 Roll 조인트의 경우 단축 실험과 유사하게 작은 오차가 나타남이 확인되었다. 따라서 제한한 cable-conduit을 적용한 경량화 된 수술용 햅틱 마스터 핸들을 이용하여 모션전달 추종 및 힘전달의 구현이 가능함을 입증하였다. 향후 추가적인 연구를 통해 핸들 디자인과 강성을 보강하고, 정밀도를 향상 시키며, slave의 인스

트루먼트와 연동하여 햅틱 구현을 수행할 계획이다.

참고문헌

- [1] A. Ayav, L. Bresler, L. Brunaud and P. Boissel, "Early results of one-year robotic surgery using the Da Vinci system to perform advanced laparoscopic procedures," J Gastrointest Surg, vol. 8, no. 6, pp. 720-726, Oct. 2004.
- [2] M. C. Lee, C. Y. Kim, B. Yao, W. J. Penie and Y. E. Song, "Reaction Force Estimation of Surgical Robot Instrument Using Perturbation Observer with SMCSPO Algorithm," Proceedings of AIM 2010, Montreal, Canada, pp.181-186, July, 2010
- [3] H. S. Song, J. H. Chung and J. J. Lee, "Design of Dexterous Manipulator for MIS", Proceeding of KSME summer symposium, pp.823-828, 2004.
- [4] F. Corcione, C. Esposito, D. Cuccurullo, A. Settembre, N. Miranda, F. Amato, F. Pirozzi, P. Caizzo, "Advantages and limits of robot-assisted laparoscopic surgery," Surgical Endoscopy, vol. 19, no. 1, pp.117-119, Apr. 2002.
- [5] P. Giulianotti, A. Coratti, M. Angelini, F. Sbrana, S. Cecconi, T. Balestracci and G. Caravaglios, "Robotics in General Surgery- Personal Experience in a Large Community Hospital," Archives of Surgery, No. 238, pp.777-784, 2003.
- [6] K. Vlachos, E. Papadopoulos, and D. N. Mitropoulos, "Design and Implementation of a haptic Device for Training in Urological Operations," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.19, pp. 801-809, 2003
- [7] S. Payandeh and T. Li, "Towards new designs of haptic devices for minimally invasive surgery," International Congress Series, pp. 775-781, 2003.
- [8] V. Hayward, P. Gregorio, O. Astley, S. Greenish, and M. Doyon, "Freedom-7: A High Fidelity Seven Axis haptic Deviec with Application to Surgical Training," Experimental Robotics Vi, pp. 445-456, 1998.
- [9] A. J. Costello, H. Haxhimolla, H. Crowe, J. S. Peters, "Installation of telerobotic surgery and initial experience with telerobotic radical prostatectomy," BJU international, vol. 96, no. 1, pp. 34-38, Jul. 2005.
- [10] S. M. Yoon, M. C. Lee, C. Y. Kim and B. Y. Kang, "Evaluation of Possibility of Estimation of Reaction Force of Surgical Robot Instrument using Sliding Perturbation Observer", KROS, vol. 7, no. 1, pp. 20-28, 2012.
- [11] Steven E. Butner, and Moji Ghodoussi, "Transformaing a Surgical Robot for Human Telesurgery", IEEE Trans on Robotics and Automation, vol.19, no.5, october 2003, pp818-824
- [12] 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.
- [13] J. J. Crisco, W. M. R. Heard, R. R. Rich, D. J. Paller and S. W. Wolfe, "The mechanical Axes of the Wrist Are Oriented Obliquely to the Anatomical Axes," The Journal of Bone & Joint Surgery, vol. 93, pp.169-177, Jan. 2011.
- [14] V. Agrawal, W. J. Penine and B. Yao, "Modeling of Transmission Characteristics Across a Cable-Conduit System," IEEE Trans on Robotics, vol. 36, no. 5, pp.914-924, Oct.2010
- [15] B. Y. Chung, D. K. Lee, "Ergonics Human Factors", Minyoungsa, 2009.
- [16] Varun Agrawal, William J. Peine, Bin Yao and Seung Wook Choi, "Control of Cable Actuated Devices using Smooth Backlash Inverse", IEEE International Conference on Robotics and Automation pp.1074-1079, May 2010
- [17] Varun Agrawal, William J. Peine, Bin Yao, "Modeling of Closed Loof Cable-Conduit Transmission System", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008
- [18] <http://www.savacable.com>
- [19] <http://www.forcedimension.com/sigma7-specifications>

강 병 호

2008 진주산업대학교 전자공학
학과(공학사)
2012 부산대학원 기계공학부
(공학석사)
관심분야: 의료로봇, mobile
robot, 계측제어

김 지 언

1999 부산대학교 기계공학과
(공학사)
2001 부산대학교 지능기계공
학과(공학석사)
2008~현재 부산대학교 기계
공학부 박사과정
2011~현재 영남이공대학 기계계열 전임강사
관심분야: 의료로봇, 의료 메카트로닉스, 군집제어 등

이 민 철

1983 부산대학교 기계공학과
(공학사)
1988 쓰쿠바대학교 이공학
연구과(공학석사)
1991 쓰쿠바대학교 물리공학
연구과(공학박사)
2000년 8월~2001년 8월 노스캐롤라이나 주립대학
교(NCSU) 방문교수
2009년 8월~2010년 8월 퍼듀(Purdue)대학교 방문
교수
1991~현재 부산대학교 기계공학부 교수
관심분야: 시스템 규명, 로봇 제어, 의료로봇, 지능
형 서비스로봇, 메카트로닉스

윤 성 민

2010 부경대학교 기계공학부
(공학사)
2010 부산대학원 기계공학부
(공학석사)
2012~현재 부산대학교 기계
공학부 박사과정
관심분야: 로봇제어, 의료로봇, 의료 메카트로닉스