내시경 로봇의 기술동향

Technological Trend of Endoscopic Robots

김민영, 조형석*

(Min Young Kim¹ and Hyungsuck Cho^{2,*})

¹School of Electronics Engineering, Kyungpook National University

²Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

Abstract: Since the beginning of the 21st century, emergence of innovative technologies in robotic and telepresence surgery has revolutionized minimally access surgery and continually has advanced them till recent years. One of such surgeries is endoscopic surgery, in which endoscope and endoscopic instruments are inserted into the body through small incision or natural openings, surgical operations being carried out by a laparoscopic procedure. Due to a vast amount of developments in this technology, this review article describes only a technological state-of-the arts and trend of endoscopic robots, being further limited to the aspects of key components, their functional requirements and operational procedure in surgery. In particular, it first describes technological limitations in developments of key components and then focuses on the description of the performance required for their functions, which include position control, tracking, navigation, and manipulation of the flexible endoscope body and its end effector as well, and so on. In spite of these rapid developments in functional components, endoscopic surgical robots should be much smaller, less expensive, easier to operate, and should seamlessly integrate emerging technologies for their intelligent vision and dexterous hands not only from the points of the view of surgical, ergonomic but also from safety. We believe that in these respects a medical robotic technology related to endoscopic surgery continues to be revolutionized in the near future, sufficient enough to replace almost all kinds of current endoscopic surgery. This issue remains to be addressed elsewhere in some other review articles.

Keywords: laparoscope, endoscopic robot, endoscopic instruments, robot surgery, intelligent vision

I. 서론

1992년 인공 고관절(artificial hip replacement) 수술에서 로봇이 외과적 기계로 처음 사용된 이후[1-3], 의료용 로봇수술은 지속적인 발전을 거듭해오고 있다. 수술장에서 고전적 개복수술을 혁신적으로 대체한 복강경 수술을 위한 다양한 소형 수술 기구들 및 복강경의 발달과 함께, 로봇에 적용 가능한 수술 도구와 내시경을 장착한 다수의 팔을 가진 수술용 로봇[4-7]을 만드는 것이 가능해 졌다. 그에 따라 외과자들은 어떤 시점에라도 여러 가지 기구를 사용하는 것이 가능하며 나아가 수술실 보조도 그만큼 덜 필요하게 되었다[8-13,81]. 최소절개, 높은 정밀도, 조기 회복의 장점이 로봇 수술의 주요한 장점으로 부각되었으며, 이와 더불어 내시경 수술이 의료계에 전면적으로 대두되게 되었다.

내시경은 의료목적으로 신체의 내부를 살펴보기 위한 기구를 가리키며, 내시경 기술의 발달 및 로봇 기술의 발달은 NOTES (Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery) [14-16] 및 마이크로 로봇[17-21]을 포함하는 유연한 내시경 로봇의 개발을 가능하게 하였다. 특히, 1966년 광섬유의 등장으로, 내시경의 기술 개발[22]은 가속화 되었으며, 섬유의 굴절에도 빛을 전달하는 특성을 이용하여, 인체 내에서 자유자재로 굴곡 가능한 내시경으로 발전하게끔 하였고, 이러한 혁신적인

기술 형태는 기존의 강체형 광학내시경 시장[23]을 급속히 대체시키는 효과를 주었다. 초소형 카메라(CCD)를 내시경 앞쪽에 장착함으로써 직접 영상을 모니터에 전달하는 전자 내시경을 가능하게 하였다. 이는 영상이 깨끗하고 반영구적인 장점을 가지고 있으나, CCD의 크기 때문에 몸 안에 들어가는 내시경 굵기를 줄이지 못해 소아용 등에선 아직 광학내시경이 사용되고 있다. 현재는 3차원의 입체영상과 배율을 높여도 자연색과 선명성을 잃지 않는 내시경에 초점을 맞추어 개발되어 오고 있고, 또한 모터에 카메라를 실어 원격조정으로 몸 안을 유영하는 내시경 또한 연구개발의 초점이 되고 있다.

최근 의료계에서는, 형광내시경을 이용하여 암 조직을 아주 초기단계에서 포착할 수 있는 기술이 개발되어, 암 조직의 초기발견에 대한 성공률이 높고, 부작용 및 시술 시 고통과 통증이 거의 없고, 반복수술이 가능하게 된 바 있다. 관의 맨 끝에 원격카메라를 부착하여 영상을 컴퓨터로 해석하는 전자내시경이나, 초음파 진단장치를 부착한 초음파내시경 등도 널리 확산되는 추세이다. 그리고, 최근 초소형 전자장비의 급속한 발전에 힘입어 세계연구자들은 현재의 일반 내시경 사용시 겪고 있는 환자의 불편을 해소시키기 위해 초소형 캡슐형 내시경[17,18,24,25]에 대한 연구방향을 제시하고 있다. 또한, 인간의 몸 속을 돌면서 병변의 징후들을 포착하여 컴퓨터 화면에 나타내는 초소형 내시경 개발이 활발히 진행되고 있는 추세이다.

본 논문에서는 수술용 로봇의 최전선에 있는 내시경 로봇의 기술적 특징과 동향을 기술하고자 한다. 현재 da Vinci 로봇으로 대표되는 복강경 원격 수술로봇에 사용되는 강체 형

* Corresponding Author

Manuscript received January 24, 2014 / accepted February 3, 2014

김민영: 경북대학교 전자공학부(minykim@knu.ac.kr)

조형석: 한국과학기술원 기계공학과 정년후교수(hscho@kaist.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 기술혁신사업(로봇산업원천기술개발사업)으로 지원된 연구임(No. 10040097).

태의 복강경과 로봇 매니플레이터를 제외한 유연한 형태의 내시경 로봇과 캡슐 내시경 로봇을 본 논문에서는 다루기로 한다. II 장에서는 내시경 로봇의 역사에 대해 소개하고, III 장에서는 내시경 로봇의 핵심 기술 요소, 그리고, IV 장에서는 수술응용을 위한 최근 시스템 사례를 살펴보고자 한다. 끝으로 V 장에서 본 논문의 결론과 함께 미래 내시경 로봇의 기술적 과제를 살펴보고자 한다.

II. 내시경 로봇의 역사

먼저 내시경 수술의 역사를 살펴보면, 개복 수술로부터 발전된 형태인 복강경 수술은 복강경의 개발과 함께 1910년 처음 학계에 보고되었다. 그 이후 100년 동안 복강경과 수술도구들은 끊임없이 발전해왔고, 1980년대 이후 다양한 복강경 수술에 적용됨으로써, 내시경 수술의 새로운 장을 열게 되었다. 이후 보다 진보된 형태로 복벽을 절개하지 않고 자연 개구부를 통하여 수술 기구를 삽입해서 장기를 수술하는 방법인 NOTES가 치료 내시경 분야에서 화두가 되고 있다[26].

이러한 내시경 수술의 역사와 기술적 동향에 발맞추어, 미세 침습수술을 보다 정밀한 로봇의 손과 보다 향상된 로봇의

그림 1. 복강경 수술과 NOTES (Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery).

Fig. 1. Laparoscopic Surgery and NOTES.

그림 2. 복강경 수술 로봇과 NOTES 로봇[4,27].

Fig. 2. Laparoscopic Surgical Robot and NOTES Robot [4,27].

눈을 이용하여 수술을 도울 수 있는 로봇 수술에 대한 관심과 노력이 커져왔다. 복강경 수술 로봇을 의료 수술현장에 성공적으로 전파한 사례로 Intuitive Surgical 사의 da Vinci 가 있으며, 이의 발전적인 형태인 NOTES 관련 수술 로봇은 관련업계의 연구개발[27-29]로 지속적인 기술 발전 중에 있다.

III. 내시경 로봇의 핵심 기술 요소

1. 기술적 난점

내시경 로봇 기술의 궁극적 목표는 다음과 같다. 첫째, 의료진이 일반 내시경을 직접 조작하여 내시경의 위치와 주시 방향을 조절하듯이, 내시경 로봇에서도 마찬가지로 로봇의 자세 및 위치를 자유자재로 의료진이 조정한다. 둘째, 내시경 로봇이 사전 의료 영상으로부터 계획된 안전 경로와 장애물 회피경로를 따라 움직이거나, 구동 기능을 갖춘 캡슐 내시경이 의료진의 원격 조정을 받아 해당 타겟 위치로 움직인다. 셋째, 특화된 내시경 로봇 수술 도구를 이용하여 해당 타겟 조직의 채취 및 검사 혹은 수술 치료를 포함하는 정해진 의료 임무를 수행하도록 하는 것이다. 이때 기존의 내시경 수술을 내시경 로봇이 풀어야 하는 문제점은 1) 플랫폼 안정성: 다양한 수술도구 및 내시경과 함께 유연성 및 고정 안정성 확보 2) Retraction: 조직을 당기고 봉합하고 클립을 가하기 위한 도구 강직성 확보, 3) Triangulation: 독립적인 시야 매니플레이션과 수술 툴간의 매니플레이션, 4) 크기: 다양한 수술도구들을 갖고 소형의 크기유지, 5) 이미지: 내시경 영상의 의도하지 않은 영상 회전 등이다[29].

그러나 아직 센서 및 구동기, 제어, 그리고 항법 기술의 한계로 이 단계까지 이르지 못한 상황이며, 현재 내시경 로봇은 의료진의 평가와 판단에 의해 전적으로 수동 조작되며, 캡슐 내시경은 장의 연동운동과 중력에 의해 자연적으로 이동하며 소화기관 내를 촬영하고 있다. 따라서 특히 캡슐 내시경은 고비용 및 정확도 부족 측면에서 위와 대장 등에는 적극 사용되지 않고 있으며, 일반 내시경으로 관찰이 어려운 소장 질환의 검사에 주로 사용되고 있다.

그림 3. 영상기반 내시경 수술로봇의 기능 블록 다이어그램.

Fig. 3. Diagram of Image-based Endoscopic Surgical Robot.

2. 기능

내시경 수술 로봇 기술의 기능적 블록 다이어그램은 아래와 같다(그림 3). 내시경 로봇 시스템은 로봇 시각과 손을 보유하고 수술을 담당하는 내시경 로봇, 사전에 획득한 의료영상, 실시간 환자 및 내시경 수술 툴을 추적하는 추적센서, 영상 기반 항법 시스템, 그리고 인간-로봇 상호작용 도구로 구성된다. 내시경 로봇 시스템은 지능적 시각과 지능적 수술 도구가 핵심 기능을 수행한다. 지능 시각 시스템은 내시경 이미징, 초음파 이미징, 공초점 이미징, 광 결맞음 단층영상 이미징(OCT: Optical Coherence Tomography)이 적용되고 있으며, 지능적 수술도구는 내시경의 말단에 적용되는 유연 매니퓰레이터와 다양한 미세 수술도구로 구현되고 있다. 내시경 로봇의 실시간 추적 결과와 사전 획득된 의료영상과의 정합을 통해, 영상 기반 항법이 수행된다[9,10,19,30].

3. 센서

내시경 수술 로봇을 위해 개발되고 있는 센서 시스템은 내시경 외부의 환자 의료 환경에 대한 정보를 획득하기 위한 이미지 센서, 광 결맞음 단층영상 센서, 공초점 센서, 초음파 센서, 접촉 센서 등과 내시경 로봇 자체의 위치를 파악하기 위한 전자기 센서 등이 있다.

내시경의 기본적 목적으로 80년대에 들어오면서 영상기술의 발전으로 내시경 내부에 CCD (Charge-Coupled Device)가 내장된 Video Endoscopy가 1987년 개발되어 현재 사용중인 내시경 시스템이 완성이 되었으며 해상도가 강화된 HD (High Definition)영상의 내시경시스템으로 전환되었다. 최근 단일모드 광섬유의 PZT 스캐너를 이용한 초소형 내시경에 대한 연구가 진행되고 있다[79].

광 결맞음 단층영상 센서는 작은 직경의 내시경에 활용이 가능하도록, 최소침습이 가능하고 깊이 방향 분해능이 뛰어난 깊이 방향 투사면의 실시간 In-vivo 이미징 툴이다[31-34]. 생성되는 단층영상은 기존 광파 측정광의 결맞음 신호로서 생체내부의 조직 배치 및 구성을 보여줄 수 있다. 최근 이미징의 고속화와 고해상도 영상을 확보하기 위해, 주파수 영역 OCT 및 Sweep Source OCT 기법의 경쟁이 이루어지고 있다.

내시경 공초점 센서는 조직의 병리진단을 위해 효과적인 이미징 툴로 활용되고 있다[35-37]. 측정 면의 실시간 In-vivo 관측이 가능하며, 세포와 조직의 광학 반사영상과 형광 영상을 획득하기 용이하다. 내시경용 센서에서는 광섬유가 편환의 역할을 수행한다.

그림 4. 내시경 광 결맞음 단층영상 센서[31,32].

Fig. 4. Endoscopic Optical Coherence Tomography Sensor [31,32].

그림 5. 내시경 공초점 센서[37].

Fig. 5. Endoscopic Confocal Sensor [37].

그림 6. 내시경 초음파 센서[38].

Fig. 6. Endoscopic Ultrasound Sensor [38].

내시경 기구의 발전에 힘입어 장기의 내강 외에도 외벽구조 등에 대한 검사법도 개발되었는데 초음파내시경(endoscopic ultrasonography)은 내시경 선단에 초음파 변환기(ultrasound transducer)를 장착하여 위장관 내에서 병변을 관찰하면서 다른 영상 검사로 어려웠던 소화관 벽과 주위 장기의 자세하고 체계적인 관찰이 가능하게 되었다. 내시경 초음파 센서는 보다 깊은 내부 장기의 구조와 혈류를 보여주는 효과적인 비광학적 이미징 툴로 활용되고 있다[38]. 내부 장기의 암 진단을 위해 사용되고 있으며, 바늘을 이용한 이상 조직의 바이옵시(Biopsy)를 위해 효과적으로 이용되고 있다.

내시경 촉각센서는 내시경의 채널을 통하여 투입되는 로봇 툴 혹은 매니퓰레이터에 장착되는 촉각센서[39-41]의 형태, 그리고 내시경 자체의 영상을 이용한 촉각센서[42]로 연구가 진행되고 있다. 그림 7은 로봇 툴에 임베디드되는 물리적 접촉식 촉각 센서의 형태와 로봇 암 링크에 임베디드되는 광섬유 응용 무접촉식 촉각 센서의 형태를 보여준다. 촉각 센서는 내시경 자체가 가지고 있는 시각 센서와 함께 상호보완적인 의료 정보를 제공할 수 있다는 장점이 있어 폭넓게 연구 개발 되고 있다.

내시경의 자장센서는 주로 인체 내부에서 동작하는 로봇의 말단 장치(End-Effector)의 위치를 추정하기 위한 센서 시스템의 일부로 사용[43]되고 있으며, 말단 장치에 장착되는 센서와 인체 외부에서 자기장을 생성시켜주는 자기장 생성기로 구성된다. 이의 응용으로 매니퓰레이터에 균일하게 분산된 여러 개의 자장센서가 측정해내는 각 위치 신호를 이용

그림 7. 내시경 촉각 센서[41].

Fig. 7. Endoscopic Tactile Sensor [41].

하여, 내시경의 굴곡 형상을 복원하는 사례[44]도 최근 연구되고 있다.

4. 구동기

굴곡 있고 판 형상을 지닌 인체를 대상으로, 능동형 내시경의 자유로운 몸 속 운동을 만들어내기 위해서는 내시경의 능동 구동부를 구성하는 유연한 분산 매니플레이터의 설계와 큰 힘과 큰 변형을 가져올 수 있는 구동기의 선택적 응용이 중요하다. 그림 9는 구동부와 센서부, 그리고 제어부가 통합된 능동형 내시경의 제어 계통도를 나타낸다.

내시경과 카테터(Catheter)의 형상변경을 위한 구동기로는 와이어 기반의 BLDC (Brushless Direct Current) Motor, 직접구동 방식의 소형 BLDC Motor, 형상기억 합금의 특성을 이용하는 SMA (Shape Memory Alloy) 모터 등이 대표적으로 사용된다 [45]. 이러한 구동기를 이용하여, 능동형 내시경 로봇의 굴곡,

(a) Electromagnetic position sensor (NDI Inc.).

(b) Shape reconstruction using electromagnetic localization sensors.

그림 8. 자기장 위치 센싱 및 내시경 형상 복원[43,44].

Fig. 8. Electromagnetic position sensor and shape reconstruction of endoscope with multiple segments [43,44].

그림 9. 능동형 내시경의 제어 계통도.

Fig. 9. Control diagram of active endoscope.

그림 10. 자가 추진 로봇 내시경[47].

Fig. 10. Self-propelling robotic endoscope [47].

표 1. 미세 구동기의 비교[50].

Table 1. Comparison of Micro Actuators [50].

Characteristics	IPMC	PZT	BLDC motor	SMA Wire
Voltage	Low	High	Low	Low
Displacement	Large	Very Small	Large	Small
Force	Low	Large	Medium	Large
Speed	Fast	Very Fast	Fast	Slow
Compactness	Good	Good	Bad	Good
Motion type	Bending	Linear	Rotation	Linear

확장/수축 및 비틀림 메커니즘과 강성 제어 메커니즘 등을 구동하게 된다.

또 다른 형태의 내시경 로봇인 자가 추진형 로봇 내시경은 로봇기술의 접목을 위해, 매니플레이터 구동기술과 자가 추진 구동기술[46]을 대표적으로 이용하고 있다. 매니플레이터의 구동을 위해서는 형상기억 합금, 자기장, 유압 구동기 등이 사용되고 있으며[47], 캡슐 내시경의 이송을 위한 마이크로 액추에이터로는 인공 근육으로 근육의 동적 특성을 모사한 IPMC (Ionic Polymer Metal Composite) [48], PZT (Piezoelectric Transducer), BLDC Motor, SMA Spring, 자석 구동기 등이 사용된다[49-52]. PZT는 크기의 0.2%정도, 그리고 SMA Spring은 30%정도의 작은 선형 변형과 큰 힘을 유도하는 반면, IPMC는 힘은 작지만 큰 굴곡 변형을 위해 사용된다. 표 1은 일반적인 미세 구동기의 특성 비교를 나타낸 표이다 [50].

5. 항법기술 및 제어 알고리즘

영상 기반 네비게이션은 내시경 로봇의 중요한 구성 요소 중 하나이다. 수술 전에 획득한 의료영상과 수술현장에서의 로봇을 동일한 좌표계로 정렬하여, 의료 정보를 의사에게 제공함으로써, 보다 정밀하고 안전한 수술이 가능하게 된다 [51,52]. 보이지 않는 내시경 튜의 위치를 파악하기 위해, 전자기장 센서를 활용하여 항법을 수행하는 것이 널리 사용되는 방법이다[80].

그림 11. 캡슐형 내시경 로봇의 항법[54].

Fig. 11. Navigation of Capsule Endoscopic Robot [54].

그림 12. 내시경 수술의 영상 유도 항법[56].

Fig. 12. Image based Navigation for Endoscopic Eye Surgery [56].

특히, 캡슐 내시경 로봇을 위해서는 로봇의 제어를 위해, 행동기반 제어를 활용한 방식도 적용된 사례가 있다[53,54].

일반적인 내시경 로봇의 항법기술은 첫째, 안전한 수술 경로계획의 바탕 하에, 둘째 영상간의 좌표계 등록과 셋째, 영상 내 실시간 수술 툴 추적, 그리고 실시간 환자추적으로 이루어지며, 넷째, 위험경로 회피 제어 및 장애물 회피 제어로 이루어진다[51,52].

항법기술의 기본이 되는 센서는 로봇의 위치를 알아내기 위한 좌표계 측정 센서이며, 의료영상을 활용한 경로계획 및 장애물 회피, 실시간 내시경 로봇 제어가 중요한 핵심기술이라 할 수 있다[55].

이를 위해 상용 내시경내에 자기장 센서모듈을 내재하고 있는 내시경 시스템의 개발도 이루어지고 있다[56].

최근에는 환자의 호흡에 의한 내시경 말단 장치의 환자내 위치추정의 어려움 때문에, 내시경으로 관측되는 실시간 2차원 영상 기반의 상대 움직임추정 방법과 자기장 추적 센서를 융합하여, 보다 정밀한 위치 정보를 이용함으로써, 이를 사용하는 항법의 정밀도를 높이하고자 하는 위치 센서 융합 기법이 연구되고 있다[57,58].

6. 수술 툴과 Manipulation

내시경 로봇 시스템을 위한 수술 말단 장치는 기존의 내시경 수술 툴을 이용한다. 이는 수술 집도의의 익숙함에 기인하는 면과 특화되어 설계된 상용 수술 툴을 이용한다는 장점, 그리고, 의료인중의 절차와 시간상의 어려움에 기인한다[27]. 이러한 수술 말단 장치는 유연한 다 자유도로 제어되는 매니퓰레이터에 장착되어 로봇 기술로 최종 구현되는 것이 일반

그림 13. NOTES 내시경 로봇시스템용 툴 매니플레이터[27].

Fig. 13. Tool Manipulator of Endoscopic Robot System in NOTES [27].

그림 14. 수술 툴 매니플레이터의 제어 계통도 사례[59].

Fig. 14. Control Schematic Diagram of Surgical Tool Manipulator [59].

적이 접근방법이다.

내시경 로봇 시스템을 위한 수술 매니플레이터는 수술 말단 장치와 함께 의료진의 손을 대신하는 로봇 수술도구로서 직접 수술에 사용되므로, 특히 연구가 많이 진행되고 있는 부분이다. 그림 14는 수술 툴 매니플레이터의 제어 계통도의 사례[59]를 보여주고 있다. 먼저, 인터페이스를 통해 의료진에 의해 로봇에 내려지는 구동 명령이 제어 컴퓨터로 입력되고, 제어루프의 폐환 신호인 구동기 센서 정보가 입력되어, 두 신호의 비교를 통해 만들어지는 컴퓨터 제어 출력이 수술 툴 매니플레이터의 구동기로 입력되어 수술 툴을 최종 구동시킨다. 매니플레이터로는 슬라이더형 링크 타입[60], 와이어형 링크 타입[61], 직접 모터구동 타입[62]등이 연구되어오고 있으며, 내시경 로봇의 방향 회전의 토크를 증대시키기 위해 웜기어와 모터가 임베디드되는 연구가 진행되고 있다[63].

그림 15. 로봇 모듈 내재형 NOTES용 내시경 로봇[63].

Fig. 15. Robot-module embedded endoscopic robot for NOTES [63].

표 2. 내시경 로봇과 인간 인터페이스의 방법 분류[26].

Table 2. Classification results of endoscope robots and human machine interface [26].

System	Human intervention
a) A460CRS Plus	Remote hand switch
b) AESOPTM	Voice recognition, remote hand switch, foot pedal
c) LARS	Tool mounted switch
d) EndoAssist™ (Endosista)	Head control
e) Staubli Rx60	Voice recognition
f) ERM	Voice recognition
g) LapMan Tool mounted	Tool mounted switch
h) RES	Head control, equipment tracking, hand/foot switches
i) Naviof™	Tool mounted switch, head pose
j) PASEO	Face gesture
k) HISAR	Tool mounted switch
l) ViKY(LER)	voice recognition, foot control
m) 5-DOFs Laparoscopic Assistant Robot (KaLAR)	Voice, equipment tracking
n) FIPS endoarm	Tool mounted switch, voice recognition
o) I magTrac	Tool mounted switch, voice recognition
p) Wide-Angle View Endoscope	Remote hand switch
q) Dual-View Endoscopic System	Remote hand switch
r) Automatic Traking and Zooming System	Automatic tracking
s) COVER	Face gesture
t) P-arm	Joystick, automatic operation, touch screen, voice recognition
u) FreeHand	Head pose
v) Robolens	Voice recognition
w) Swarup Robotic Arm (SWARM)	Remote controller
x) MST Laparoscope Manipulator	Equipment tracking
y) ROBOX	Voice recognition, mouse, foot pedal, Equipment tracking
z) FELIX	Voice recognition
aa) Paramis	Voice recognition

자가 추진형 내시경을 위한 매니플레이터의 연구사례에서는 마이크로 모터와 웜기어에 의해 모듈형으로 구동되는 소형 매니플레이터가 연구된바 있다[64].

7. Human Intervention

수술 의료진과 내시경 로봇 사이의 인간-로봇 상호 작용은 수술에 가장 방해줄 주지 않고 손쉬운 접근 방법으로 발전하고 있다. 이를 위해 음성인식[65], 얼굴인식, 다리움직임, 머리 움직임 등이 유용하게 이용되고 있다[26]. 표 2는 내시경 로봇에 사용되고 있는 인간-로봇 인터페이스 방법을 요약 정리한 것이다.

8. 통합 시스템 운용

NOTES를 위한 내시경 기반 로봇시스템의 설계 및 구현에 대한 연구진행결과가 현재 연구의 중요 쟁점이 되고 있다

(a) Endoscopic robot manipulator and surgical instruments.

(b) Conceptual diagram of endoscopic robot.

(c) Remote operation.

그림 16. NOTES 내시경 로봇 시스템[27].

Fig. 16. Endoscopic Robot System for NOTES [27].

그림 17. Computer-Aided Surgery를 위한 좌표계 연관도[66].

Fig. 17. Coordinate Systems in a typical CAS setting [66].

[27]. 기존 NOTES 시스템에 대해, 수술 툴의 다양한 기능성과 강인성에 대한 요구가 꾸준히 증대되어 왔으며, 이러한 요구사항은 원격 햅틱 인터페이스를 가지는 내시경 기반 로봇 툴 시스템의 구현을 촉진시키고 있다.

통합시스템은 da Vinci 시스템과 마찬가지로 원격 시술의 형태[27]가 주를 이루고 있다. 특이한 것은 보이지 않는 인체 내부에서 동작하고 위치를 추정하기가 어렵기 때문에, 영상 기반 항법 시스템과 밀접한 관계를 가지도록 발전 되어 오고 있다. 그림 17에서는 영상 기반 Computer-Aided Surgery 에서의 좌표계 개념도[66]를 도시하고 있다.

원활한 수술을 수행하기 위해, 각 좌표계간의 실시간 정렬이 연구의 중요방향이 되고 있으며 3차원 표면 정합, 점진적 해부학적 특징점 상호 보정 방법 등 다양한 방법이 연구되고 있다.

IV. 수술 응용을 위한 최근 시스템 사례

표 3에는 NOTES 용으로 개발되고 있는 플랫폼의 최근 개발 현황을 정리하였다. 상용화된 내시경 플랫폼은 수동형의 로봇 메커니즘을 가지고 있지만, 능동형의 로봇 시스템을 활용한 내시경 로봇 플랫폼의 연구가 활발히 수행되고 있는 중에 있으므로, 가까운 미래에 원격제어가 가능한 내시경 로봇 플랫폼이 출현할 수 있을 것이다.

표 3. NOTES 플랫폼.

Table 3. NOTES Platforms.

NOTES Platforms	
제품 개발	개발 내용
Miniature Robot (University of Nebraska Medical Center, 2008) [67]	<ul style="list-style-type: none"> 이동형 내시경을 절개 부위를 통해 흉강이나 복강 내로 진입시켜 수술 로봇: 6DOF Magnetic force를 사용하여 몸 안 이동 Stereo Camera
Viacath Robot System (Purdue Univ.) [27]	<ul style="list-style-type: none"> 수술 도구 길이: 120 cm, 지름: 7.2 mm 9 DOF (8 + Grip) 구동 영역: 50 x 50 x 100mm 마스터/슬레이브 원격수술
MASTER (National University of Singapore) [68]	<ul style="list-style-type: none"> 마스터/슬레이브 로봇 원격수술 워크스테이션 2 channel 내시경+ 두 개의 슬레이브 매니퓰레이터 9 DOF
Endo-Samurai® (Olympus) [69]	<ul style="list-style-type: none"> 지름: 15.3mm 광학 기구부와 3개의 working channel을 가지고 있음 Laparoscopy 유사 구조
Direct Drive Endoscopic System prototype (DDES, Boston Scientific) [69]	<ul style="list-style-type: none"> Flexible insertion tube (18x20mm diameter), 두 개의 4mm working channel, 6mm visualization channel로 구성 안정적인 rail platform의 사용으로 사용자에게 안정성 5 자유도의 기구부 말단의 움직임

Endosurgical Operating System® (EOS®, USGI Medical, 2008) [70]	<ul style="list-style-type: none"> 유연한 직경 18mm 기구부 와 두개의 6mm visualization channel 및 두개의 4mm working channels로 구성 Endoscopic 시스템과 laparoscopic 시스템간 쉬운 변환 가능 Shape Lock
MAGS (University of Texas, 2007) [71]	<ul style="list-style-type: none"> Magnetic anchoring and guidance system 기존 Laparoscopic surgery와 Magnetic Anchoring Robot 의 결합 로봇: 카메라와 수술툴 제어 외부자석과 내부자석플랫폼

표 4. 의료 수술 로봇 연구기관의 내시경 로봇 연구동향.

Table 4. Endoscopic Robot Researches of World Class Research Institutes on Medical Surgical Robot.

Advanced Endoscopic Robot Researches	
연구 개발	개발 동향
Bio-robotics Institute [72] (이탈리아)	<ul style="list-style-type: none"> - Image-guided Active Capsule Endoscopy Navigation - Stiffness Controllable Flexible and Learnable Manipulator for Surgical Operations - Minimally Invasive Laser Robotics Assisted Diagnosis and Surgery - Focused Ultrasound Therapy Using Robotic Approaches
Vanderbilt University (미국)	<ul style="list-style-type: none"> - Endoscopic Capsule Robots [73] - Magnetic Surgical Robots [73] - Intelligent Flexible Robots for Safe Manipulation of Anatomy [74]
John's Hopkins University [75] (미국)	<ul style="list-style-type: none"> - Fiber Optical Coherence Tomography Microsurgical Instruments for Computer and Robot-Assisted Retinal Surgery - High Dexterity Robotic Manipulators inserted through a single entry port - Intraoperative Image-Guided Transoral Robotic Surgery - 3D Ultrasound-Guided Retrieval of Foreign Bodies using a Dexterous Surgical Robot - Vision-Based Navigation of Endoscopic Robot in Image-Guided Interventions [76]
Tokyo University [77] (일본)	<ul style="list-style-type: none"> - Nonmagnetic rigid-flexible outer sheath with Pneumatic Locking mechanism - Multi-Slider Linkage Mechanism for Endoscopic Forceps Manipulator - Endoscope system with plasma flushing for off-pump cardiac surgery - 3-D endoscope using a single CCD camera and pneumatic vibration mechanism
Kushu University (일본)	<ul style="list-style-type: none"> - 3-D endoscopic tele-surgery robot system [78]

개발되는 능동형 내시경 로봇 플랫폼은 모두 III 장 2절에 설명된 인간-로봇 상호작용 기능으로 원격 제어형을 선택하고 있으며, 고해상도 영상획득기능, 다양한 수술 툴, 다자유도 로봇 매니퓰레이터의 기능을 기본적으로 보유하고 있다. 관측 진단 및 시술을 위한 수술 매니퓰레이터와 수술 툴은 각기 다른 모양과 기법을 선택하고 있다. 첫째 *Miniature Robot*은 외부에 장착되는 자석의 힘을 이용하여 로봇을 장기 내부에서 고정시키고 수술 및 진단 관측을 수행한다. 둘째 *Viacath robot system*과 *Master system*은 원격 내시경 기반의 굴곡형 로봇을 이용하여 수술 및 관측을 수행한다.

현재는 IT기술의 발전을 기반으로, 사용되는 요소 기술의 향상 개발과 함께, 사전 획득된 의료영상을 항법에 활용하는 영상 기반 항법을 위한 기능들이 추가 연구되고 있는 동향이다.

의료용 수술 로봇을 개발하고 있는 전세계의 핵심그룹에서는 표 4에 정리된 연구내용들이 근래 연구되고 있으며, 이들의 연구 내용은 III 장에서 언급된 내시경 로봇의 상세기능인 항법, 로봇 제어, 수술 툴 및 로봇 매니퓰레이터, 좌표 추적 센서, 이미징 센서, 구동기, 인간로봇 상호작용의 기능 등과 직접적으로 관련된다.

V. 결론 및 미래 기술 방향

현재 국내 내시경 기술의 원천 연구개발을 위해 HD급 3D 내시경에 대한 개발이 산학연 컨소시엄을 통해 2012년부터 개발되고 있으며, 초소형 의료용 이미지 센서, 광 MEMS 소자 기반 초소형 광학계, 스펙트럼 가변을 이용한 LED광원을 핵심기술을 개발하고 있는 단계이다. 개발이 완료되면 직경 8mm 이하의 단일 센서를 이용한 검진용 삽입관의 입체 영상 획득이 가능할 것으로 예상된다.

진단내시경의 큰 변화를 가져온 캡슐내시경의 경우, 배터리, 영상획득, 중력이나 장 연동운동에 의해 자의적으로 이동할 수 없는 점들에 대한 보완이 지속적으로 연구 중이다. 추가로 영상전송 후 판독시간을 단축할 수 있는 프로그램 개발 문제가 해결된다면, 식도에서 항문까지 전장의 진단 내시경은 캡슐 내시경을 한번 삼키는 것으로 간편하게 받을 수 있을 것이다. 최근 치료내시경 분야에서 화두가 되고 있는 NOTES는 복벽을 절개하지 않고 입, 항문, 질구, 요도 등 자연 개구부를 통하여 복강내 장기를 수술하는 방법으로 입원 기간 단축, 수술 후 통증 완화, 정신적, 미용적 측면에서 보았을 때, 현재 질병의 치료 흐름이 비침습적으로 발전되는 동향과 함께, 개복 수술이나 복강경 수술을 대체할 만한 시술법이다. 첨단 시술을 위해 기존의 내시경에서 한 단계 발전된 다채널 *Multi-band* 내시경, 수술 플랫폼, 부속 기구들이 요구되는데 세계 각국의 대학, 병원, 관련회사들이 활발하게 연구와 더불어 동물실험 및 임상 연구개발을 하고 있으므로, 머지않아 프로토타입의 단계에서 상용화된 모델들이 선보일 것으로 기대되고 있다. 산학연의 컨소시엄을 활용하여 우리나라도 세계의 의료로봇 흐름에 뒤떨어지지 않고 특화 기술을 선점할 수 있도록 노력과 연구초점을 첨단 의료 내시경 로봇에 집중해야 하리라 본다.

매니퓰레이터 메커니즘의 정교화와 소형화, 이동 및 변형의 용이성, 센서 정보 융합, 고기능 센서, 고기능 구동기, 구동제어 정도, 신개념 항법, 인간-로봇 상호작용, 안정성 등의

측면에서 로봇 기술의 발전이 IT기술의 융합과 함께 더욱 고도화 및 가속화 되고 있으므로, 검진 단계에서의 인체 내부 검사와 의료 수술 현장에서의 내시경 로봇의 점진적 확대가 기대되는 바이다.

REFERENCES

- [1] Inspiring the Human Care – CUREXO. Available: <http://www.curexo.com/>
- [2] R. H. Taylor, L. Joskowicz, B. Williamson, A. Gu'eziec, A. Kalvin, P. Kazanzides, R. V. Vorhis, J. Yao, R. Kumar, A. Bzostek1, A. Sahay, M. B'orner, and A. Lahmer, "Computer-integrated revision total hip replacement surgery: concept and preliminary results," *Medical Image Analysis*, vol. 3, no. 3, pp. 301-319, 1999.
- [3] W. L. Bargar, A. Bauer, and M. Bömer, "Primary and revision total hip replacement using the robodoc system," *Clinical Orthopaedics & Related Research*, vol. 354, pp. 82-91, 1998.
- [4] Intuitive Surgical, Inc. – da Vinci Surgical System. Available: <http://www.intuitivesurgical.com/>
- [5] G. Hubens, H. Coveliers, L. Balliu, M. Ruppert, and W. Vaneerdeweg, "A performance study comparing manual and robotically assisted laparoscopic surgery using the da Vinci system," *Surgical Endoscopy*, vol. 17, pp. 1595-1599, 2003.
- [6] G. Haber, M. A. White, R. Autorino, P. F. Escobar, M. D. Kroh, S. Chalikhonda, R. Khanna, S. Forest, B. Yang, F. Altunrende, R. J. Stein, and J. H. Kaouk, "Novel robotic da vinci instruments for laparoendoscopic single-site surgery," *Urology*, vol. 76, no. 6, pp. 1279-1282, 2010.
- [7] T. E. Ahlering, D. Skarecky, D. Lee, and R. V. Clayman, "Successful transfer of open surgical skills to a laparoscopic environment using a robotic interface: initial experience with laparoscopic radical prostatectomy," *Urology*, vol. 170, no. 5, pp. 1738-1741, 2003.
- [8] K. H. Rha, "The present and future of robotic surgery," *Journal of Korean Medical Association (in Korean)*, vol. 51, no. 1, pp. 67-73, 2008.
- [9] K. Masamune and J. Hong, "Advanced imaging and robotics technologies for medical applications," *International Journal of Optomechatronics*, vol. 5, pp. 299-321, 2011.
- [10] R. H. Taylor and D. Stoianovici, "Medical robotics in computer-integrated surgery," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 19, no. 5, pp. 765-781, 2003.
- [11] T. Dohi, "Computer aided surgery and micro machine," *Proceedings of the 6-th International Symposium on Micro Machine and Human Science*, pp. 21-24, 1995.
- [12] A. R. Gunkel, M. Vogele, A. Martin, R. J. Bale, W. F. Thumfart, and W. Freysinger, "Computer-aided surgery in the petrous bone," *Laryngoscope*, vol. 109, no. 11, pp. 1793-1799, 1995.
- [13] R. Seemann and A. Wagner, "Basic research and 12 years of clinical experience in computer-assisted navigation technology: A review," *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, vol. 34, no. 1, pp. 1-8, 2005.
- [14] I. Halim and A. Tavakkolizadeh, "NOTES: The next surgical revolution," *International Journal of Surgery*, vol. 6, no. 4, pp. 273-276, 2008.
- [15] D. Canes, et al., "Transumbilical single-port surgery: evolution and current status," *European Urology*, vol. 54, pp. 1020-1030,

- 2008.
- [16] M. M. Tiwari, J. F. Reynoso, A. C. Lehman, A. W. Tsang, S. M. Farritor, and D. Oleynikov, "In vivo miniature robots for natural orifice surgery: State of the art and future perspectives," *World Journal of Gastrointestinal Surgery*, vol. 2, no. 6, pp. 217-223, 2010.
- [17] K. Kim, K. H. Won, and H. Choi, "Technical characteristics and trends of capsule endoscope," *Journal of Korea Information and Communications Society (in Korean)*, vol. 37, no. 4, pp. 329-337, 2012.
- [18] K. Kim and T. Kim, "Recent advances in medical image processing and diagnosis technology for capsule endoscope systems," *Journal of Korea Information and Communications Society (in Korean)*, vol. 38, no. 9, pp. 802-812, 2013.
- [19] K. Wang, G. Yan, P. Jiang, and D. Ye, "A wireless robotic endoscope for gastrointestinal," *IEEE Trans. Robotics*, vol. 24, no. 1, pp. 206-210, 2008.
- [20] A. Moglia, A. Menciassi, M. O. Schurr, and P. Dario, "Wireless capsule endoscopy: from diagnostic devices to multipurpose robotic systems," *Biomed Microdevices*, vol. 9, pp. 235-243, 2007.
- [21] S. Yim and M. Sitti, "Design and rolling locomotion of a magnetically actuated soft capsule endoscope," *IEEE Trans. Robotics*, vol. 28, no. 1, pp. 183-194, 2012.
- [22] M. Tomikawa, T. Akahoshi, N. Kinjo, H. Uehara, N. Hashimoto, Y. Nagao, M. Kamori, R. Kumashiro, Y. Maehara, and M. Hashizume, "Rigid and flexible endoscopic rendezvous in spatium peritonealis may be an effective tactic for laparoscopic megasplenectomy: significant implications for pure natural orifice transluminal endoscopic surgery," *Surgical Endoscopy*, vol. 26, pp. 3573-3579, 2012.
- [23] A. Pemeczyk and G. Fries, "Endoscope-assisted Brain Surgery: Part 1-Evolution, Basic Concept, and Current Technique," *Neurosurgery*, vol. 42, no. 2, pp. 219-224, 1998.
- [24] G. Iddan, G. Meron, A. Glukhovsky, and P. Swain, "Wireless capsule endoscopy," *Nature*, vol. 405, no. 6785, pp. 417-418, 2000.
- [25] G. Gay, M. Delvaux, and J.-F. Rey, "The role of video capsule endoscopy in the diagnosis of digestive diseases: a review of current possibilities," *Endoscopy*, vol. 36, no. 10, pp. 913-920, 2004.
- [26] R. Autorino, J. A. Cadeddu, M. M. Desai, M. Gettman, I. S. Gill, L. R. Kavoussi, E. Lima, F. Montorsi, L. Richstone, J. U. Stolzenburg, and J. H. Kaouk, "Laparoendoscopic single-site and natural orifice transluminal endoscopic surgery in urology: a critical analysis of the literature," *European Urology*, vol. 59, pp. 26-45, 2011.
- [27] D. J. Abbott, C. Becke, R. I. Rothstein, and W. J. Peine, "Design of an endoluminal NOTES robotic system," *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 410-416, 2007.
- [28] M. E. Rentschler, J. Dumpert, S. R. Platt, S. M. Farritor, and D. Oleynikov, "Natural orifice surgery with an endoluminal mobile robot," *Surgical Endoscopy*, vol. 21, pp. 1212-1215, 2007.
- [29] X. Wang and M. Q.-H. Meng, "Robotics for natural orifice transluminal endoscopic surgery: a review," *Journal of Robotics*, vol. 2012, Article ID 512616, 2012.
- [30] L. M. Su, B. P. Vagvolgyi, R. Agarwal, C. E. Reiley, R. H. Taylor, and G. D. Hager, "Augmented reality during robot-assisted laparoscopic partial nephrectomy: Toward real-time 3D-CT to stereoscopic video registration," *Urology*, vol. 73, no. 4, pp. 896-900, 2009.
- [31] A. R. Tumlinson, J. K. Barton, B. Povazay, H. Sattman, A. Unterhuber, R. A. Leitgeb, and W. Drexler, "Endoscope-tip interferometer for ultrahigh resolution frequency domain optical coherence tomography in mouse colon," *Optics Express*, vol. 14, no. 5, pp. 1878-1887, 2006.
- [32] L. P. Hariri, Z. Qiu, A. R. Tumlinson, D. G. Besselsen, E. W. Gernere, N. A. Ignatenko, B. Povazay, B. Hermann, H. Sattmann, J. McNally, A. Unterhuber, W. Drexler, and J. K. Barton, "Serial endoscopy in azoxymethane treated mice using ultra-high resolution optical coherence tomography," *Cancer Biology & Therapy*, vol. 6, no. 11, pp. 1753-1762, 2007.
- [33] G. J. Tearney, S. A. Boppart, B. E. Bouma, M. E. Brezinski, N. J. Weissman, J. F. Southern, and J. G. Fujimoto, "Scanning single-mode fiber optic catheter-endoscope for optical coherence tomography," *Optics Letters*, vol. 21, no. 7, pp. 543, 1996.
- [34] G. J. Tearney, M. E. Brezinski, B. E. Bouma, S. A. Boppart, C. Pitris, J. F. Southern, and J. G. Fujimoto, "In vivo endoscopic optical biopsy with optical coherence tomography," *Science*, vol. 276, no. 5321, pp. 2037-2039, 1997.
- [35] H. Bertani, R. Conigliaro, and F. Pigo, "New techniques in endoscopy: confocal laser endomicroscopy," in *New Techniques in Gastrointestinal Endoscopy*, Prof. Oliviu Pascu (Ed.), InTech, 2011.
- [36] B. Abrat and A. Masters, "Endoscopic confocal microscopy moves into the clinic," *Biophotonics International*, Nov. 2006.
- [37] W. Piyawattanametha and T. D. Wang, "MEMS-based dual axes confocal microendoscopy," *IEEE J. Selected Topics on Quantum Electronics*, vol. 16, no. 4, pp. 804-814, Jul. 2010.
- [38] T. E. Yusuf, G. C. Harewood, J. E. Clain, and M. J. Levy, "International survey of knowledge of indications for EUS," *Gastrointestinal Endoscopy*, vol. 63, no. 1, pp. 107-111, Jan. 2006.
- [39] J. Dargahi, M. Parameswaran, and S. Payandeh, "A micromachined piezoelectric tactile sensor for an endoscopic grasper—theory, fabrication and experiments," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 329-335, 2000.
- [40] J. Dargahi and S. Najarian, "Advances in tactile sensors design/manufacturing and its impact on robotics applications – a review," *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 32, no. 3, pp. 268-281, 2005.
- [41] P. Puangmali, K. Althoefer, L. D. Seneviratne, D. Murphy, and P. Dasgupta, "State-of-the-art in force and tactile sensing for minimally invasive surgery," *IEEE Sensors Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 371-381, Apr. 2008.
- [42] K. Takashima, K. Yoshinaka, T. Okazaki, and K. Ikeuchi, "An endoscopic tactile sensor for low invasive surgery," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 119, pp. 372-383, 2005.
- [43] Aurora Electromagnetic Measurement System - 3D Tracking for Medical Guidance | NDI. Available: <http://www.ndigital.com/medical/aurora.php>
- [44] X. Li, B. Li, S. Song, C. Hu, and M. Q.-H. Meng, "Endoscopes shape reconstruction based on electromagnetic localization and curve fitting," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and*

- Biomimetics*, pp. 819-824, 2012.
- [45] Y. Haga, T. Mineta, W. Makishi, T. Matsunaga, and M. Esashi, "Active bending catheter and electric endoscope using shape memory alloy," in *Shape Memory Alloys, Corneliu Cismasiu* (Ed.), InTech, 2010.
 - [46] A. Menciassi, J. H. Park, S. Lee, S. Gorini, P. Dario, and J. Park, "Robotic solutions and mechanisms for a semi-autonomous endoscope," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 1379-1384, 2002.
 - [47] P. Dario, M. C. Carrozza, L. Lencioni, B. Magnani, and S. D'Atanasio, "A micro robotic system for colonoscopy," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics & Automation*, pp. 1567-1572, 1997.
 - [48] M. Shahinpoor, Y. Bar-Cohen, J. O. Simpson, and J. Smith, "Ionic polymer-metal composites (IPMCs) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles-a review," *Smart Materials and Structures*, vol. 7, no. 6, R15-R30, 1998.
 - [49] B. Kim, S. Park, C. Y. Jee, and S. Yoon, "An earthworm-like locomotive mechanism for capsule endoscopes," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 2997-3002, 2005.
 - [50] B. Kim, S. Lee, J. H. Park, and J. Park, "Design and fabrication of a locomotive mechanism for capsule-type endoscopes using shape memory alloys (SMAs)," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 10, no. 1, pp. 77-86, 2005.
 - [51] C. Hayhurst, P. Byrne, P. R. Eldridge, and C. L. Mallucci, "Application of electromagnetic technology to neuronavigation: a revolution in image-guided neurosurgery," *Journal of Neurosurgery*, vol. 111, no. 6, pp. 1179-1184, Dec. 2009.
 - [52] R. Lapeer, M. S. Chen, G. Gonzalez, A. Linney, and G. Alusi, "Image-enhanced surgical navigation for endoscopic sinus surgery: evaluating calibration, registration and tracking," *Int. J. Med Robot*, vol. 4, no. 1, pp. 32-45, Mar. 2008.
 - [53] S. Zhang, Y. Guo, and A. Ritter, "Capsule robot in gastrointestinal tract: a case study for robot programming and navigation," *Selected Topics in Micro/Nano Robotics for Biomedical Application*, Y. Guo (Ed.), Springer, 2013.
 - [54] G. Ciuti, M. Visentini-Scarzanella, A. Dore, A. Menciassi, P. Dario, and G.-Z. Yang, "Intra-operative monocular 3D reconstruction for image-guided navigation in active locomotion capsule endoscopy," *Proc. of IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pp. 768-774, 2012.
 - [55] D. J. Mirota, H. Wang, R. H. Taylor, M. Ishii, G. L. Gallia, and G. D. Hager, "A system for video-based navigation for endoscopic endonasal skull base surgery," *IEEE Trans Medical Imaging*, vol. 31, no. 4, pp. 963-76, Apr. 2012.
 - [56] N. C. Atuegwu, L. Mawn, and R. Galloway, "Transorbital endoscopic image guidance," *Proc. of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 4663-4666, 2007.
 - [57] X. Luo, T. Reichl, M. Feuerstein, T. Kitasaka, and K. Mori, "Modified hybrid bronchoscope tracking based on sequential Monte Carlo sampler: dynamic phantom validation," *Proc. Asian Conference on Computer Vision*, pp. 409-421, 2010.
 - [58] T. Reichl, X. Luo, M. Menzel, H. Hautmann, K. Mori, and N. Navab, "Hybrid electromagnetic and image-based tracking of endoscopes with guaranteed smooth output," *Int. Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, vol. 8, pp. 955-965, 2013.
 - [59] H. Yamashita, A. Iimura, E. Aoki, T. Suzuki, T. Nakazawa, E. Kobayashi, M. Hashizume, I. Sakuma, and T. Dohi, "Development of endoscopic forceps manipulator using multi-slider linkage mechanisms," *Proc. of the 1st Asian Symposium on Computer Aided Surgery - Robotic and Image guided Surgery*, PO14, 2005.
 - [60] H. Yamashita, D. Kim, N. Hata, and T. Dohi, "Multi-slider linkage mechanism for endoscopic forceps manipulator," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 2577-2582, 2003.
 - [61] C. M. Seow, W. J. Chin, C. A. Nelson, A. Nakamura, S. M. Farritor, and D. Oleynikov, "Articulated manipulator with multiple instruments for natural orifice transluminal endoscopic surgery," *J. Med. Devices*, vol. 7, no. 4, 041004, 2013.
 - [62] A. Lehman, J. Dumpert, N. A. Wood, L. Redden, A. Q. Visty, S. Farritor, B. Vamell, and D. Oleynikov, "Natural orifice cholecystectomy using a miniature robot," *Surgical Endoscopy*, vol. 23, no. 2, pp. 260-266, 2009.
 - [63] J. M. Oliveira, Y. Chen, and I. W. Hunter, "Two-axis bend sensor design, kinematics and control for a continuum robotic endoscope," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 704-710, 2013.
 - [64] J. Peirs, D. Reynaerts, and H. V. Brussel, "A miniature manipulator for integration in a self-propelling endoscope," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 92, pp. 343-349, 2001.
 - [65] C. Vara-Thorbeck, V. F. Munoz, R. Toscano, J. Gomez, J. Fernandex, M. Felices, and A. Garcia-Cerezo, "A new robotic endoscope manipulator," *Surgical Endoscopy*, vol. 15, pp. 924-927, 2001.
 - [66] M. Fleute, *Shape Reconstruction for Computer Assisted Surgery based on Non-Rigid Registration of Statistical Models with Intra-Operative Point Data and X-ray Images*, Doctoral dissertation, Joseph Fourier University, 2004.
 - [67] B. C. Shah, S. L. Buettner, A. C. Lehman, S. M. Farritor, and D. Oleynikov, "Miniature in vivo robotics and novel robotic surgical platforms," *Urologic Clinics of North America*, vol. 36, no. 2, pp. 251-263, 2009.
 - [68] K.-Y. Ho, et al., "Endoscopic submucosal dissection of gastric lesions by using a Master and Slave Transluminal Endoscopic Robot (MASTER)," *Gastrointestinal Endoscopy*, vol. 72, no. 3, pp. 593-599, 2010.
 - [69] S. N. Shaikh and C. C. Thompson, "Natural orifice transluminal surgery: Flexible platform review," *World Journal of Gastrointestinal Surgery*, vol. 2, no. 6, pp. 210-216, 2010.
 - [70] D. K. Mullady, D. B. Lautz, and C. C. Thompson, "Treatment of weight regain after gastric bypass surgery when using a new endoscopic platform: initial experience and early outcomes," *Gastrointestinal Endoscopy*, vol. 70, no. 3, pp. 440-444, 2009.
 - [71] S. Park, R. A. Bergs, R. Eberhart, L. Baker, R. Fernandez, and J. A. Cadetdu, "Trocator-less instrumentation for laparoscopy," *Annals of Surgery*, vol. 245, no. 3, pp. 379-384, 2007.
 - [72] The BioRobotics Institute. Available: <http://sssa.bioroboticsinstitute.it/>
 - [73] Science and Technology of Robotics in Medicine in Vanderbilt University. Available: <https://my.vanderbilt.edu/stormlab/research/>
 - [74] Advanced Robotics and Mechanism Applications. Available: <http://arma.vuse.vanderbilt.edu/>
 - [75] Computer Integrated Interventional Systems Laboratory in JHU.

Available: <https://ciis.lcsr.jhu.edu/dokuwiki/doku.php>

- [76] D. J. Mirota, M. Ishii, and G. D. Hager, "Vision-based navigation in image-guided interventions," *Annual Review of Biomedical Engineering*, vol. 13, pp. 297-320, 2011.
- [77] Advanced Therapeutic and Rehabilitation Engineering laboratory in Tokyo University. Available: http://www.atre.t.u-tokyo.ac.jp/en/component/option,com_frontpage/Itemid,1/
- [78] Advanced Robotics and Mechanism Applications. Available: <http://arma.vuse.vanderbilt.edu/>
- [79] C. M. Lee, C. J. Engelbrecht, T. D. Soper, F. Helmchen, and E. J. Seibel, "Scanning fiber endoscopy with highly flexible, 1 mm catheterscopes for wide-field, full-color imaging," *J. Biophotonics*, vol. 3, no. 5-6, pp. 385-407, 2010.
- [80] H. Atsumi, M. Matsumae, A. Hirayama, K. Sato, H. Shigematsu, G. Inoue, J. Nishiyama, M. Yoshiyama, and J. Tominaga, "Newly developed electromagnetic tracked flexible neuroendoscope," *Neurologia Medico-chirurgica*, vol. 51, no. 8, pp. 611-616, 2011.
- [81] H. Liao, H. Ishihara, H. H. Tran, K. Masamune, I. Sakuma, and T. Dohi, "Precision-guided surgical navigation system using laser guidance and 3D autostereoscopic image overlay," *Computerized Medical Imaging and Graphics*, vol. 34, no. 1, pp. 46-54, 2010.

김민영

1996년 KAIST 기계공학과 학사. 1998년 KAIST 대학원 석사 및 2004년 KAIST 대학원 박사. 2004년~2005년 ㈜미래산업 연구소 선임연구원. 2005년~2009년 ㈜고영테크놀러지 연구소 머신비전 책임연구원 및 그룹장. 2009년~현재 경북대학교 IT대학 전자공학부 조교수. 2013년~현재 경북대학교 뇌수술 로봇시스템 연구소 부소장. 관심분야는 광메카트로닉스, 로봇 및 머신 비전, 로봇센서 및 구동 시스템, 의료 로봇 시스템.

조형석

1971년 서울대학교 공과대학(학사). 1973년 Northwestern University (석사). 1977년 University of California at Berkeley (박사). 1978년~2010년 한국과학기술원 기계공학과 교수. 2010년~현재 KAIST 정년후 교수. 2010년~2012년 대구경북과학기술원(DGIST) 로봇공학과 석좌교수. 2006년 International Journal of Optomechatronics 설립 편집장. 1996년~2001년 POSCO 석좌교수. 2000년~제어·자동화 시스템공학회 회장. 2001년 International Symposium on Optomechatronics Technology (ISOT) 학술대회 설립. 2009년 대한민국 과학기술훈장, 창조장. 관심분야는 광메카트로닉스, 로보틱스 및 자동화, 지능비전 시스템.