

수술지원로봇 최근 동향



발체인 _ 박성환 _ 한국기계연구원 기계시스템안전연구본부 _ swpark@kimm.re.kr

1. 서언

2008년 정밀공학회지에 저침습(低侵襲) 수술에 있어 수술지원로봇에 관한 해설 기사를 기고하였다¹⁾. 본고에서는 전고의 내용을 근거로 하여 최근 보급 중에 있는 저침습외과·화상유도치료 등을 적용분야로 하는 수술지원로봇(Surgical Robotics)의 응용현황, 기술과제, 연구성과를 임상응용하기 위하여 참고가 되는 최근의 동향에 대하여 해설한다. 지면이 제한되어 있기 때문에 상세한 내용에 대해서는 참고문헌을 참조하기 바란다.

2. 수술지원로봇 응용 현황

수술지원로봇으로서 실용화되어진 것으로는 Computer Motion사의 내시경매니퓰레이터(Manipulator) Aesop²⁾, 내시경하 수술용 매니퓰레이터인 같은 회사의 Zeus³⁾ 및 Intuitive Surgical 사의 da Vinci Surgical System⁴⁾, 정형외과수술용의 Curexo Technology Corporation 사의 Robodoc⁵⁾ 등을 들 수 있다. 우리나라에 있어서는 Robodoc의 임상연구가 오오사카대학을 중심으로 이루어져 Nishihara, Sugano 등이 Robodoc을 사용한 75 예의 수술결과 평가보고가 있고, 정도가 높은 수술이 가능하였다고 보고되고 있다⁶⁾. 또한 新에

너지·산업기술융합개발기구의 프로젝트를 통하여 개발되어진 뇌신경외과수술지원용 매니퓰레이터 Neurobot의 히트 임상예의 응용이 2003년에 信州大學의 Goto, Hongo 등에 의해 보고되고 있다⁷⁾. 또한 필자가 소속된 연구그룹에서 개발된 내시경 매니퓰레이터는 2002년에 약사승인을 득하고 있으며, 100 예 이상의 임상응용이 이루지고 있다. 임상연구에 의해 기존의 수술과 동등의 수술이 본 매니퓰레이터를 사용하여 가능하다는 것이 알려지고 있다^{8) 9)}.

이러한 임상응용가능 단계까지 실용화되어진 수술지원로봇으로 가장 널리 응용되고 있는 시스템은, Intuitive Surgical 사의 da Vinci Surgical System으로서, 2011년 3월말까지 전 세계에 1450대 이상의 시스템이 가동되고 있는 것으로 알려져 있다. 우리나라에 있어서도 2009년 11월에 일반소화기외과, 흉부외과(심장외과 제외), 비뇨기과, 부인과를 대상으로 하는 진료기기로 승인되었으며, 2012년에는 da Vinci Surgical System을 사용한 전립선악성종양수술이, 신규기술과 형태로 평가되어 보험수재(保險收載)로 되었으며 현재 우리나라에 있어서도 35 이상의 병원에 본 시스템이 도입되고 있다.

이와 같이 우리나라에 있어서의 수술지원로봇 연구는,

임상응용에 관한 경험이 이제부터 축적되고 있음을 예상하는 것을 시작으로, Needs의 명확화, 현 시스템에서의 과제 등을 명확히 할 수 있을 것으로 예상되며, 보다 실용에 가까운 시스템 연구개발이 이어질 것으로 기대된다.

3. 수술지원로봇 연구에 관한 최근 화제

현재의 수술지원로봇에 관한 임상외과의들의 견해를 정리한 문서가, SAGE-MIRA Robotic Surgery Consensus Group (SAGE: The Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons, MIRA: The Minimally Invasive)에 의해 나타나고 있다¹⁰⁾. 현재 임상에 보급되어진 da Vinci Surgical System의 사용경험에 기초하여 2008년 단계에서의 견해를 정리한 것이다. 이 문서에는 수술로봇 적용에 관한 리스크도 열거되어 있다. 이러한 점은 다른 많은 외과의로 부터도 지적되고 있다.

3.1 수술지원로봇 실현형태

현재 master-slave 방식의 외과수술지원로봇만이 수술지원로봇 형태가 아니며 다양한 형태를 고려해 볼 수 있다. 이 점에 관해서는 문헌¹⁾에서 나타낸 바와 같다. Seo, Koizumi 등에 의한 화상유도에 의한 집속초음파시스템의 제어¹¹⁾, Onogi 등에 의한 화상유도에 의한 척추천자(穿刺)¹²⁾, Kobayashi 등에 의한 유방(乳房)의 라디오파소작(燒灼)치료를 위한 천자(穿刺) 등을 지원하는 수술지원로봇¹³⁾등이 그 예가 된다. 더욱이 현재의 수술지원로봇은 손의 필터링, 동작의 스케일링이라 불리는 처리가 있는 것으로, 기본적으로는 외과의 손동작을 재현하는 기능만을 갖고 있다. 손기술의 자동화라 말하는 관점으로부터의 개발도 중요하다. 정형적인 손기술에 대해서는 자동화를 실현하고, 외과의에 의한 세밀한 제어를 적절히 합치는 것이 가능한 시스템이 필요하다고 생각한다.

3.2 지능화한 수술기기와의 통합

현재의 수술로봇시스템에서는, 그 주됨이 다자유도 움직임 구현으로, 잡기, 자르기, 떼기 등의 조작을 행하는 기계시스템이 실현되어 있으나, 외과수술에 사용되어지는 수술기기는 기계적 조작 이외에도 전기메스, 레이저메스 등의 에너지 디바이스라 불리는 각종 수술기기가 널리 활용되고 있다. 최근의 기기에서는 에너지 투여에 따른 조직의 변화를, 예를 들어 전기통전시 응고에 동반되는 조직의 전기 임피던스 변화를 계측하면서 지혈이 적절히 실시되는 만큼의 혈관을 절단한다든지, 조직을 절개하는 기기가 개발되어져 있어, 내시경하 수술의 정확성·안전성 향상에 크게 공헌하고 있다. 이와 같은 에너지 디바이스를 수술용 매니퓰레이터에 탑재하여 보다 적절한 조작을 내시경하에서 실현 가능하게끔 하는 것은 의미가 있는 것이라 생각되어 진다. 그림 1에서는 내시경하 수술에 널리 사용되어지고 있는 초음파응고메스를 소형화하여, 손잡이형의 수술용 겸자(鉗子)에 가까운 형상의 능동굴곡(屈曲) 2자유도, 회전 1자유도(수동이지만 회전각 계측 기능을 갖는 장비)를 구비하여 시스템화 한 것을 보이고 있다.

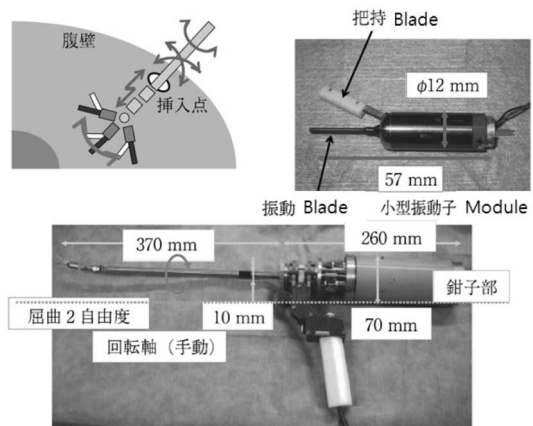


그림 1 굴곡(屈曲) 2 자유도-회전 3 자유도를 갖는 초음파응고절개 메스

초음파구동 메스는 선단부의 블레이드를 55 kHz로 초음파진동하면서, 종 방향으로 약 90 μm 블레이드 축 방향 진동을 발생시켜, 블레이드와 진동자간에 있는 협소한 조직을, 초음파진동에 의해 가열 및 완화 조건 하에 가열응고에 의해 출혈을 방지하면서, 떼어내는 것이 가능한 디바이스이다. 보통의 디바이스는 겸자(鉗子) 직선모양의 구조체 전체가 진동자가 되는 것이기에 굴곡하는 것은 불가능하다. 여기서 Ogura 등은 소형의 진동자를 선단에 설치하여¹⁴⁾ 수동에 의한 회전동작과 2 자유도 굴곡을 한꺼번에 제어할 수 있도록 하여, 보통의 수동 굴곡겸자(鉗子) 만으로는 실현 불가능한, 조작대상에 굴곡부를 향한 상태에서 축방향 회전을 가능하게 하면서 진동 블레이드를 외과과의 시야 손 앞 측에 두고, 시야 바깥의 초음파 에너지 투여에 의해 예기치 않은 조직손상을 방지하면서 조작이 가능하게 되었다¹⁵⁾.

동일한 형태로 수술지원로봇과 자동문합기(自動吻合器) 등의 최신의 수술기기를 수술지원 로봇에 탑재하는 것은 주요한 과제가 되고 있다.

또 하나의 지능화 방향으로서 시술 중 계측기능의 부가를 들 수 있다. 현재 널리 임상응용에 사용되고 있는 da Vinci Surgical System에는 촉각이 없는 것이 문제점으로 나타나고 있다. 그렇지만 촉각(haptic sensation)에는 여러 가지의 의미가 있으므로 공학자가 임상적 요구를 분석할 때에는 주의를 요한다. 실제 로봇 수술에 숙련된 의사간에는 시각에 의해 얻어지는 조직의 미묘한 변형 등의 정보로부터 촉각을 느낀다고 한다. 감각대행이 생기고 있음을 나타낸다. 또한 촉각을 필요로 하는 이유로 거론되는 것이, 과도한 기계적 부하에 의하여 조직이 좌멸(挫滅)됨을 막는 것 등이 있으나, 이것은 반드시 힘의 피드백으로만 해결되는 것이 아니다. 예를 들어 겸자(鉗子) 선단부에 붙은 조직산소포화도 계측 디바이스에 의해 국소산소포화도를 계측하는 것에 의해 과도한 조직압박을 계측가능하다는 것이 Fischer, Taylor 등에 의해 보고되고 있다¹⁶⁾.

촉각은 다의(多義)적이라, 순수한 힘의 피드백이라는 개념에 근거하지 않는 영역도 취급된다는 사실을 반드시 인식을 하여야 한다.

3.3 소형화

저침습 수술의 향후 방향성으로, 소화관(消化管) 등 생체가 본래 가지고 있는 체강경유(體腔經由)에 한 개의 연성내시경을 삽입하여 시술분야의 관찰과 함께 굴곡소형겸자(鉗子)에 의한 외과적 처치를 행하는 NOTES (Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery) 및 종래 복수의 port를 사용하여 행하던 복강경하수술을 단일의 port로부터 내시경 및 복수의 겸자를 삽입하여 수술을 실시하는 single port surgery로 발전되고 있고, 수술지원로봇도 그림 2에서 나타난 바와 같이 수술부위에 복잡한 경로를 통하여 접속하여 수술조작을 행하는 시스템이 필요로 한다. 또한 구조의 소형화가 일층 요구되어지고, 대상별로 다른 방향으로 접근이 가능한 것이 조작상 매우 중요해 지고 있음으로 인해 필연적으로 소형화와 함께 다자유도 구조를 실현하지 않으면 안되기 때문에 많은 연구개발과제가 존재한다. 또한 상황에 따라 변화하는 master arm과 slave arm의 좌표변환관계를 실시간으로 추정 보정하는 수법의 실장(實裝)도 필요로 한다. 또한 카테테르(Catheter) 치료에의 전개도 금후의 과제라고 생각한다¹⁷⁾.

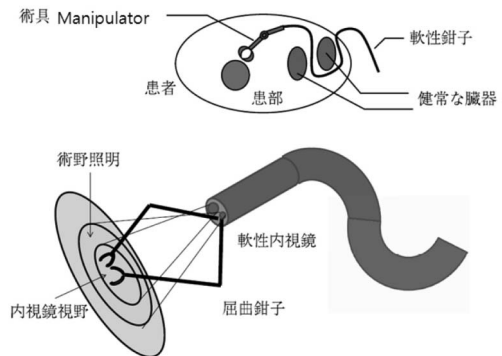


그림 2 연성내시경을 기초로 한 저침습 수술지원 시스템의 개념도

3.4 수술 Navigation과의 융합

금후의 수술지원로봇은 문헌¹⁾에 나타난 바와 같이 수술 네비게이션 시스템으로 통합되어 사용되어지는 것을 생각해 볼 수 있다. 또한 수술 전 화상(畫像) 뿐만 아니라, 최근 시간분해능의 향상이 현저한, 3차원 초음파의료용화상을 수술 중에 사용하고, 초음파에코 화상 가이드화에 의해 치료를 행하는, 심장내치료에의 전개가 시도되고 있다⁸⁾.

한편, 통상의 수술 네비게이션에서는 환자 및 수술 기구의 위치 트래킹을 위해 값비싼 광학식 혹은 전자 기식 3차원 위치 트래킹 시스템을 이용하고 있다. 절대적인 위치의 제작성을 보증한다는 관점에서는 중요한 구성요소이긴 하지만 시스템의 고비용화가 피할 수 없고, 이는 수술 네비게이션 시스템의 도입을 방해하는 하나의 요인이다. 이 점은 수술지원로봇 시스템과 수술 네비게이션 시스템의 융합에 있어서도 고려하여야 할 과제이다.

고가의 3차원 위치계측시스템을 사용하지 않고서도 고정된 내시경 화상공간 가운데, 초음파 probe 및 심외막표면 전위전극의 위치를 동화상처리에 의해 트래킹하고, 내시경 화상 중에서 초음파 단층상 및 심외막 전위 marking 데이터를 계측하는 수법이 Kim¹⁹⁾, Jung²⁰⁾ 등에 의해 보고되고 있다. 그림 3에는 내시



그림 3 내시경화상 동화상처리에 의한 수술 중 초음파화상정보 내시경 화상에의 중첩

경 화상내에서 위치자세를 계측하기 위한 화상마크를 탑재한 초음파프로브에 의해 수술부위 초음파 단층상을 계측하고, 그 결과를 내시경 화상에 중첩 표시하는 예를 보이고 있다.

4. 수술지원로봇 Translational 연구

Translational 연구는 <의료에 이르는 기초연구성과를 임상으로 실용화는 교도(橋渡)연구>이다. 수술지원로봇 연구개발에 있어서도 임상응용 가능 레벨까지 연구성과 완성도를 향상시키기 위해서는 Translation research에 위치한 연구를 실시하지 않으면 안 된다.

의료기기는 그 기반기술이 다양하고, 개발시간의 약품에 비해서는 짧고, 개발 후에도 개량이 계속되는 점 등이 그 연구개발 특징으로 지적되고 있다. 이 특징은 수술지원로봇의 경우 특히 현저하다. 신기술을 어떻게 평가할 것인가에 대해서는 평가 노하우의 축적이 없다는 것이 의료기기 승인을 포함한 의료기기의 개발부터 상품까지의 스피드를 저하시키는 요인으로 인식되어 진다. 이와 같은 과제를 해결하는 목적으로 경제산업성과 후생노동성의 공동사업인 차세대의료기기 가이드라인 사업에서 구체적인 테마를 정하여 실시하고 있다. 의료기기개발 가이드라인(개발 가이드라인)과 차세대의료기기 평가지표(평가지표)의 책정이 이루어지고 있다. 검토내용은 인터넷 상에 공개되고 있다²¹⁾ ²²⁾. 네비게이션 의료분야에 관한 수편의 가이드라인, 평가지표가 정리되어 있으며, 연구개발 효율을 높이고 임상연구·실용화에 이어지게 하기 위한 참고가 된다. 또한 개량·개선을 반복하여 개발이 행해지는 의료기기 특성을 고려하였으며, 미승인의료기기를 가지고 임상연구실시를 행하는 절차가 의료기술산업전략연구소(METIS), 일본의료기기산업연합회로부터 발행되어져 참고가 된다²³⁾.

수술지원로봇시스템의 기초연구성과를 임상연구에 적시에 적용 가능한 시스템까지 그 완성도를 높이고, 덧붙여 심사를 위한 치험(治驗)을 실시하여 의료기기

로서 제품화하기 위해서는 여러 가지의 장애가 존재한다. 대학·연구기관에 의한 연구라 할지라도 개발된 시스템의 임상연구를 실시하기 위해서는 기기의 기본적인 기능 실현과 함께, 사용 환경에 대한 리스크 평가와 그 대책을 충분히 실시하고, 필요한 신청서류를 작성하여, 연구기관의 윤리위원회 심의승인을 받는 절차를 행하지 않으면 안 된다. 이 경우 <무엇이 가능할 것인가?> <무엇이 새로운 것인가?>라는 연구의 시점과 함께, 개발된 의료기기가 <무엇이 되지 않는 것인가?>, <어떠한 리스크를 가지고 있으며, 그에 대한 대책이 세워져 있는가?>하는 또 다른 시점으로부터의 분석이 불가피하다. 그러한 프로세스의 한 예로서 전술한 내시경 매니퓰레이터의 개발 실용화과정에서의 여러 가지 취급이 문헌에 보고되어 있으며 참고가 되고 있다²³⁾.

5. 맺음말

우리나라에서도 시판되는 수술지원로봇의 의료기기 승인, 일부 적용에 대한 보험수재가 되는 것을 고려할 때, 수술지원로봇의 임상응용이 금후 진전될 것으로 기대된다. 이에 따라 저침습 외과수술분야에서 높은 기술을 가진 일본의 외과의를 의해 수술로봇 시스템에 대한 평가가 진행되고, 또한 새로운 needs의 발굴이 되어질 것으로 생각된다. 우리나라에서는 수술지원로봇의 기초연구를 목적으로 한 많은 연구자가 있으며, 우수한 공학적 연구결과가 만들어져 쌓이고 있다. 이 연구결과를 현실의 의료기기에 활용되는 사례가 우리나라에서도 많아지기를 기대한다.



참고문헌

1. 佐久間一郎: 저침습 수술과 정밀공학의 금후, 정밀공학회지, 74, 11 (2008) 1135.
2. L. Mettler, M. Ibrahim and W. Jonat: One Year of Experience Working with the Aid of a Robotic Assistant (the Voice-controlled Optic Holder AESOP) in Gynaecological Endoscopic Surgery, Human Reproduction, 13, 10 (1998) 2748.
3. H. Reichenspurner, et al.: Use of the Voice-controlled and Computer-assisted Surgical System ZEUS for Endoscopic Coronary Artery Bypass Grafting, The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery, 118, 1 (1999) 11.
4. <http://www.robotdoc.com/>
5. <http://www.intuitivesurgical.com/company/profile.html>
6. S. Nishihara, et al.: Clinical Accuracy Evaluation of Femoral Canal Preparation Using the ROBODOC System, Journal of Orthopaedic Science, 9, 5 (2004) 452.
7. T. Goto, K. Hongo, et al.: Clinical Application of Robotic Telemanipulation System in Neurosurgery, Journal of Neurosurgery, 99, 6 (2003) 1082.
8. E. Kobayashi, et al.: A New Safe Laparoscopic Manipulator System with a Five-bar Linkage Mechanism and an Optical Zoom, Computer Aided Surgery, 4, 4(1999) 182.
9. K. Tanoue, et al.: Laparoscopic Cholecystectomy Using a Newly Developed Laparoscope Manipulator for 10 Patients with Cholelithiasis, Surgical Endoscopy, 20, 5 (2006) 753.
10. D. Herron and M. Marohn: A Consensus Document on Robotic Surgery, Surgical Endoscopy, 22, 2 (2008) 313.
11. J. Seo, et al.: Visual Servoing for a US-guided Therapeutic HIFU System by Coagulated Lesion Tracking: A Phantom Study, The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 7, 2 (2011) 237.
12. S. Onogi, et al.: Development of the Needle Insertion Robot for Percutaneous Vertebroplasty, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2005, (2005) 105.
13. Y. Kobayashi, et al.: Enhanced Targeting in Breast Tissue Using a Robotic Tissue Preloading-Baese Needle Insertion System, IEEE Transactions on Robotics, 28,3 (2011) 710.

14. G. Ogura, et al.: Development of an Articulating Ultrasonically Activated Device for Laparoscopic Surgery, Surgical Endoscopy, 23, 9 (2009) 2138.
15. T. Hasuo, et al.: Development of Bending and Grasping Manipulator for Multi Degrees of Freedom Ultrasonically and Surgery 2006, Osaka, (2006) 222.
16. G. Fischer, et al.: Ischemia and Force sensing Surgical Instruments for Augmenting Available Surgeon Information, Proceedings of International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)-February 2006, (2006).
17. P. Kanagaratnam, et al.: Experience of Robotic Catheter Ablation in Humans Using a Novel Remotely Steerable Catheter Sheath, Journal of Interventional Cardiac Electrophysiology, 21, 1 (2008) 19.
18. S.B Kesner and R.D. Howe: Position Control of Motion Compensation Cardiac Catheters, IEEE Transactions on Robotics, 27, 6, (2011) 1045.
19. H. Kim, et al.: Image-based Electrode Array Tracking for Epicardial Electrophysiological Mapping in Minimally Invasive Arrhythmia Surgery, International Journal of computer Assisted Radiology and Surgery, 6, 1 (2011) 83.
20. S. Joung, et al.: Ultrasound Image Overlay on Endoscopic Image for Localizing Coronary Vessels, Int. J. CARS 6, Suppl 1 (2011) S238.
21. http://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/service/iryou_fukushi/index.html
22. <http://dmd.nihs.go.jp/jisedai/>
23. 의료기술산업전략 컨소시움 (METIS), 일본의료기기산업연합회: 미승인 의료기기를 이용한 임상연구실시절차, (제1판), (2011).
24. 小林英津子, 宮本潮, 大山國夫: 저침습 수술지원 시스템 Naviot 개발, 일본로봇학회지, 23, 3 (2005) 168.



<<일본정밀공학회지, Vol.78, No.8, 2012>>

본 기사는 한국기계연구원의 박성환 편집위원이 “일본정밀공학회지” 2012년 8월호 pp.658~661을 번역한 것으로 일본정밀공학회지의 연락처는 다음과 같다.

- 주소 : ☎ 102-0073 東京都千代田區 九段 北 1-5-9
(九段誠和Building 2F)
- 전화 : +81-3-5226-5191 / FAX : +81-3-5226-5192
- URL : <http://www.jspe.or.jp/>