

포스트 코로나 시대 수술 로봇의 역할 및 발전 방향에 관한 전망

A Perspective on Surgical Robotics and Its Future Directions for the Post-COVID-19 Era

장하늘¹·송채희²·류석창[†]

Haneul Jang¹, Chaehee Song², Seok Chang Ryu[†]

Abstract: The COVID-19 pandemic has been reshaping the world by accelerating non-contact services and technologies in various domains. Hospitals as a healthcare system lie at the center of the dramatic change because of their fundamental roles: medical diagnosis and treatments. Leading experts in health, science, and technologies have predicted that robotics and artificial intelligence (AI) can drive such a hospital transformation. Accordingly, several government-led projects have been developed and started toward smarter hospitals, where robots and AI replace or support healthcare personnel, particularly in the diagnosis and non-surgical treatment procedures. This article inspects the remaining element of healthcare services, i.e., surgical treatment, focusing on evaluating whether or not currently available laparoscopic surgical robotic systems are sufficiently preparing for the era of post-COVID-19 when contactless is the new normal. Challenges and future directions towards an effective, fully non-contact surgery are identified and summarized, including remote surgery assistance, domain-expansion of robotic surgery, and seamless integration with smart operating rooms, followed by emphasis on robot training for surgical staff.

Keywords: Surgical Robotics, Fully Non-Contact Surgery, Smart Robotic Operating Rooms

1. 서 론

세계보건기구(WHO)는 지난 2020년 1월 30일, 코로나 바이러스 감염증(COVID-19)의 급격한 확산으로 전 세계 “팬데믹”을 공식 선언했다. 2019년 12월 중국 우한에서 처음 확인된 COVID-19은 전염성이 매우 높은 코로나 바이러스(SARS-CoV-2)에 의한 질병으로, 주로 비말로 전염되어 개인의 마스크 착용과 집단 모임 자체를 비롯 다양한 사회적 거리두기 방안이 권고되었다^{1,2}.

최근 연구에 의하면 비말보다 작은 에어로졸을 통한 광범위한 공기 중 확산도 가능하여 밀폐된 공간에서 집단 감염 위험이 높은 것으로 우려되며, 미국 질병예방통제센터(CDC)와 WHO도 이를 인정하고 있다³⁻⁵.

이번 팬데믹은 사스(SARS-CoV)와 메르스(MERS-CoV)바이러스에 이어 지난 20년 간 국제적으로 발생한 세 번째 코로나 바이러스 사태로, 상황이 1년 이상 장기화되면서 전세계적으로 심각한 사회경제적 악영향을 끼치고 있다. 감염 위험을 최소화하면서 일상 생활을 유지하기 위해 교육, 경제, 산업 전반에 걸쳐 비대면 서비스와 기술을 중심으로 변화가 시작되었다. 병원과 같은 의료기관은 스마트 병원으로의 진화를 가속화하는 계기가 됨에 따라 2027년까지 관련 시장의 규모는 1조 289억 달러로 가파르게 성장할 것으로 예측된다⁶. 스마트 병원은 의료정보의 수집, 관리 및 분석에 첨단기술을 적용하여 의료작업의 자동화와 최적화를 통한 진료 품질의 향상을 목표로 한다. 예를 들어 IoT 기술로 환자의 상태를 실시간 측정 및 분석하여 응급 상황에 대비하거나, 의료 인력의 움직임을 추적하고 위생을 감시하여 감염을 예방하기도 한다⁷. 팬데믹의

Received : Mar. 20. 2021; Revised : Apr. 2. 2021; Accepted : Apr. 2. 2021

※ This project was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2021R1A2C2011854) and the Brain Korea-21 Four Program

1. Graduate Student, BioRobotics Laboratory, Division of Mechanical and Biomedical Engineering & Graduate Program in Smart Factory, Ewha Womans University, Seoul, Korea (sky1017@ewhain.net)
2. Undergraduate Researcher, BioRobotics Laboratory, Division of Mechanical and Biomedical Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea (sch8769@ewhain.net)

† Assistant Professor, Corresponding author: Division of Mechanical and Biomedical Engineering & Graduate Program in Smart Factory, Ewha Womans University, Seoul, Korea (scryu@ewha.ac.kr)

영향으로, 원내 전염병의 확산 방지를 위한 음압격리치료시설 및 원격 진단의 도입도 고려하고 있다^{8,9)}.

인공지능과 로봇공학 기술은 이러한 스마트 병원으로의 진화 과정에 있어 진료 인력의 부분적 보조부터 완전한 대체까지 다양한 측면에서 비대면화를 위한 핵심 역할을 담당할 것으로 여겨진다^{10,11)}. 의료진의 의학적 판단을 보조하거나 대체하기 위해서는 인공지능 기술이 성공적으로 접목되고 있다. 반면 비대면의 핵심인 의료진의 물리적 역할을 보조하거나 대체하기 위한 유일한 수단은 로봇이다. 로봇이 진단, 청소, 소독, 의약품 및 식품 제공, 환자 이송 등에 이용될 경우 의료진의 감염 위험을 크게 낮출 수 있으므로, 전염병의 확산에 따라 그 잠재력은 더욱 명확하다^{12,13)}.

한편, 비대면 의료를 위한 로봇의 역할은 수술에서 가장 두드러진다. COVID-19 팬데믹의 영향으로 의료진 감염이 우려되면서 수술을 진행하기가 어려워졌고 시급한 수술만이 선택적으로 진행됨에 따라^{14,15)} 수술 건수는 전세계적으로 대폭 감소하였다¹⁶⁾. 하지만 수술 시기가 중요하거나 위급한 환자는 감염 위험과 상관없이 수술을 반드시 진행해야 한다. 이러한 경우, 진단 또는 비수술적 치료와 달리 절개를 포함한 물리적 상호작용이 불가피하고 수술 과정에서 의료진이 환자의 지척에서 장시간동안 머물러야 하기 때문에 COVID-19를 포함한 감염의 위험이 높아질 수밖에 없다. 비록 최근 일부 병원에서 수술실 내 의료장비와 정보의 디지털 통합 관리 시스템을 구축한 스마트 수술실을 설치했으나¹⁷⁾, 이런 감염병에 대응하기에는 한계가 있다. 또한 COVID-19 발생 초기에는 위와 같은 위급한 수술에 대한 안전 지침이 제대로 마련되지 않아 환자 외 의료진 모두를 불안하게 했고, 지침이 마련된 이후에도 감염 위험을 이유로 수술이 중단되거나 연기되는 경우가 발생하면서 비대면 원격 수술을 가능케 하는 로봇 수술이 근본적인 해결책으로 주목을 받고 있다. 따라서 이제 뉴노멀 시대의 요구사항을 반영하는 로봇 수술에 대한 재평가가 필요하다.

본 논문에서는 팬데믹 상황을 고려하여 새로 정비된 수술 지침을 분석하고 이에 근거하여 현재의 로봇 수술이 가진 장단점을 재평가한다. 이를 바탕으로 현존하는 로봇 수술 증가장 일반적인 복강경 기반의 수술 로봇 시스템이 비대면 중심의 포스트 코로나 시대에 재고해야 할 문제점을 파악하고 향후 발전 방향을 제시한다.

2. 본 론

2.1 감염병 위험에 대비한 수술 지침과 로봇 수술

COVID-19 확산에 따른 의료진의 감염 위험에 대한 불안도가 높아짐에 따라 학회 및 관련 기관의 주도 하에 다양한 수술 지침이 확립되었다. 응급 수술 이외의 수술은 중단되며, 비수

술적인 치료나 관리가 효과가 있다고 판단될 경우 팬데믹의 진행 양상에 따라 우선적으로 고려할 수 있다. 수술은 환자의 상태에 따라 우선 순위가 정해져 선택적으로 진행되는데, 그 어떠한 경우에도 소독된 개인 보호 장비(Personal Protective Equipment, PPE)의 착용과 잦은 소독 및 환기(시간당 25번 이상)가 권고된다¹⁸⁾.

SARS-CoV-2 감염이 확정되었거나 의심되는 환자를 수술하는 경우, 지정된 음압 수술실에서만 이루어져야 한다. 이 수술실은 병원의 구석에 있는 것이 적절하며 HEPA (high-efficiency particulate air) 필터를 통해 환기되어야 한다. 추가적인 CO₂ 가압이 필요한 내시경 수술은 피한다. 또한, 켈로우 교육은 중단하며 최소한의 의료진으로만 진행하고 수술실 내 불필요한 이동은 금지한다. 주변의 음압 격리실이 수술실을 오염시키지 않도록 주의가 필요하다. 수술 사이에는 최소한 1시간의 청소 및 소독을 위한 시간을 둔다^{19,20)}.

수술 과정에 대한 주요 지침들은 [Table 1]으로 요약되며, 주로 복강경, 내시경, 또는 로봇을 이용한 최소침습수술 과정에서 에어로졸 및 수술연기(Surgical Smoke)의 발생과 확산을 최소화하여 수술실 내 잠재적인 감염 위험을 줄이는 것에 초점을 두고 있다. 비록 수술실 환기에 관한 지침이 있고 에어로졸 및 수술연기를 통한 감염에 대해서 여전히 많은 논의들이 이루어지고 있으나, 밀폐된 수술실에서 일시적으로 그리고 국부적으로 감염 위험이 증가하기 때문으로 사료된다. 대표적으로 CO₂ 가압시 낮은 압력 유지(10 mmHg 이하)와 수술의 모든 과정이 끝나고 모든 가스 배입구를 닫는 것을 기본 지침으로 하고 있다. 이외에도 전기 소작기 또는 초음파 절단기 사용을 절제하거나 낮은 전력을 사용하는 등, 에너지 기기의 파워 또는 트로카와 절개부의 크기와 수를 최소화하고 주의 깊게 사용할 것을 요구한다.

이러한 지침에 따르면, 공기 중 확산이 가능한 바이러스가 의심되는 경우 로봇 수술은 다른 수술에 비해 의료진과 환자 간 감염 위험을 낮출 수 있는 분명한 장점이 있다. 체내 가스 배

[Table 1] Summary of the selected recommendations for laparoscopic or robot-assisted minimally invasive surgery during the COVID-19 pandemic¹⁸⁾

	[15]	[21]	[22]	[23]	[24]	[25]
Low CO ₂ insufflation pressure	O	O	O			O
Safe evacuation of pneumoperitoneum		O		O	O	O
Less and shorter use of diathermy	O		O			
Lowest power for electrocautery		O	O			

입구 관리가 가능하므로 개복 수술에 비해서 수술연기에 직접 노출될 가능성이 매우 낮고^[26], 복강경 수술과 달리 의사가 원거리에서 수술을 진행할 수 있어 바이러스에 대한 의사의 직접적인 노출을 근본적으로 감소시킬 수 있기 때문이다. 코로나 상황에서 실질적으로 비율이 늘어난 수술 분야 역시 복강경 또는 로봇 수술에 해당되는 서혜부 탈장 수술, 복벽 탈장 수술, 결장 절제술 등인 것으로 미루어 보아^[27], 개복 수술 대비 복강경 및 로봇 수술이 상대적으로 안전하게 여겨지는 것으로 추측할 수 있다.

2.2 복강경 기반 수술 로봇의 장단점에 대한 재평가

2.2.1 수술 로봇의 종류

로봇 수술은 로봇 기술이 적용된 도구 또는 시스템을 수술의 일부 또는 전 과정에 적용하는 수술로, 수술 로봇은 이러한 도구 또는 시스템을 지칭하며 사용자 또는 로봇의 제어 개입 정도에 따라 1) 원격제어(Tele-operated) 수술 로봇, 2) 공동제어(Shared-control) 수술 로봇, 3) 자율제어(Autonomous) 수술 로봇으로 구분한다^[28].

원격제어 수술 로봇의 경우, 사용자가 마스터 장치를 이용하여 슬레이브 로봇의 운동을 제어한다. 공동제어 수술 로봇의 경우에는 로봇의 운동뿐만 아니라 추가적인 제어에 개입할 수 있다. 예를 들면 사용자의 운동 입력에 반하여 위험지역을 회피하는 등의 추가적인 제어 개입을 할 수 있는 것이다. 이에 따라 사용자가 직접 손에 들고 사용할 수 있는 로봇 수술 도구는 기능에 따라 공동제어 수술 로봇으로 분류될 수 있다. 자율제어 수술 로봇은 의료영상 등을 통해 제공된 정보를 바탕으로 로봇이 주어진 작업을 자율적으로 수행하는데, 무릎 관절 수술에 사용되는 큐렉소의 로보닥(Robodoc®)이 대표적이다. 현재는 사용 범위가 제한되어 있는데, 이는 의사가 개입하지 않는 것으로 인한 안전성 우려 또는 기술적 한계 때문이다.

본 논문에서는, 가장 널리 사용되고 있는 일반적인 수술 로봇인 인튜이티브 서지컬사의 다빈치(da Vinci®) 로봇을 이용한 복강경 기반 로봇 수술을 중점적으로 다룬다. 다빈치 로봇은 원격제어를 기반으로 일부 공동제어가 더해진 수술 로봇으로 볼 수 있다.

2.2.2 감염병 대응을 위한 수술 로봇의 장점

팬데믹의 영향으로 수술 로봇 시장은 2027년까지 148억 달러로 성장할 것으로 예측되며^[29], 이는 크게 수술 로봇이 가진 두 가지 종류의 장점에 기인한다. 하나는 일반적으로 로봇 기술이 갖는 정확성(accuracy)과 정밀성(precision)에 기반한 장점이고, 다른 하나는 로봇 수술을 통해서만 가능한 비대면 원격제어이다.

로봇 기술로 인한 정확성과 정밀성은 의사의 손 떨림을 보정해주고 다양하고 미세한 움직임을 통해 좁은 공간에서도 보다 정교하고 안정적인 수술을 가능케 한다^[3]. 그 결과로 절개 및 불필요한 조직 손상을 최소화하여 환자의 회복 기간을 단축한다. 또한, 현재 시행되는 대면 수술에서는 작은 절개를 통해 이루어지는 수술에서 피할 수 없는 반침점 효과(fulcrum effect)가 직관적인 조작을 방해하는데, 로봇 기술은 이를 능동적으로 제거하여 기기를 움직이고 시각화하는 것을 도와주므로 의사가 오랜 수술 시간 동안 불편한 자세를 취할 필요가 없고 의료인력의 육체적 피로도를 낮춘다. 이러한 도움은 수술 경험이 적은 의사들도 일정 수준 이상의 결과를 낼 수 있도록 도와준다. 감염병이 확산되는 상황에서는 환자의 빠른 회복 및 퇴원이 병원 내부 입원 환자의 수와 관리 인력과의 대면을 감소시킨다. 이는 충분한 병석 확보와 원내 감염 위험을 낮추는 데 일조하면서 의료 시스템의 붕괴를 막고 안정적 운영에 기여한다.

한편 원격제어는 수술 로봇 사용자인 의사가 상대적으로 편하게 작업할 수 있다는 것 외에는 시스템이 복잡해짐에 따라 설치 및 운영 비용도 증가하기 때문에, 팬데믹 이전, ‘로봇 수술은 고비용 대비 효과가 적거나 차이가 없다^[30,31]’는 비판의 원인이었다. 그러나 비대면화가 요구되는 포스트 코로나 시대에는 로봇 수술만이 갖는 결정적인 장점이 되었고 앞서 정리한 수술 지침이 이를 증명한다.

2.2.3 현재 복강경 수술 로봇의 단점과 한계점

수술 로봇이 가진 장점에 기반한 로봇 수술 시장의 획기적인 성장 전망에도 불구하고, 현재의 복강경 기반 수술 로봇에는 시간과 비용에서 효율이 낮다는 단점이 있다. 포스트 코로나 시대에는 1) 아직까지 완전한 비대면 수술이 아니기에 의료진의 감염 위험이 상존하고, 2) 적용 범위가 주로 복강경 수술에 제한되어 전체 수술에서 차지하는 비율이 낮다는 한계점이 있다.

다빈치 로봇으로 행해지는 복강경 로봇 수술은 의사가 마스터 콘솔에 앉아서 원거리의 로봇 팔을 조작하는 비대면 수술이다. 그러나 환자 옆에서 의사의 지시에 따라 수시로 로봇 팔에 장착된 도구를 교체하고 수술 부산물을 처리하며 상처를 봉합하는 보조 인력은 수술 시간 내내 에어로졸 또는 수술 연기에 의한 감염 위험에 노출되어 있다. 현재 포스트 코로나 수술 지침의 대부분이 이러한 보조 인력의 감염 위험과 직접적으로 연관된 것으로 미루어 보면 해결이 시급한 부분임을 알 수 있다. 또한 로봇 수술은 보조 인력과의 원활한 협업을 통해서 단점으로 지적된 수술 시간을 줄일 수 있기 때문에^[32], 훈련된 보조 인력의 감염 및 이에 대한 불안감은 효율적인 수술을 어렵게 하여 수술 시간에도 지장을 준다.

현재 다빈치 로봇 수술이 전체 수술에서 차지하는 비율은

15% 내외로 낮은 편으로^[27], 나머지는 감염의 위험이 높은 대면 수술로 이해할 수 있다. 이처럼 제한된 적용 범위는 다빈치 로봇이 복강경 수술에 기반했다는 사실에 근본적인 원인이 있는데, 이는 수술 단가를 높게 되므로 비용 문제로 직결된다^[33]. 결국, 감염병 대응 측면에서 현재의 복강경 수술 로봇이 가진 한계점이 감염병과 로봇 수술의 고비용 및 긴 수술시간이라는 단점을 악화시키는 악순환을 초래한다.

2.3 포스트 코로나 시대 수술 로봇 시스템 발전 방향

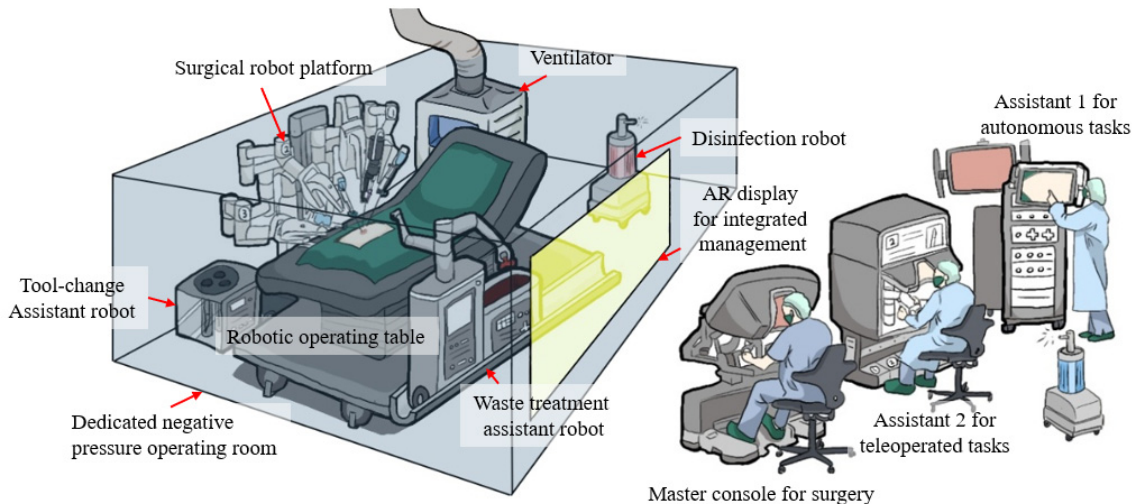
현재 복강경 수술 로봇이 제한된 수술 영역에서만 사용되며 불완전한 비대면 수술을 할 수밖에 없다는 문제는 로봇 수술이 포스트 코로나 시대 비대면화라는 새로운 기준을 충족시키기 위해 반드시 해결되어야 하는 부분이다. 이에 기반하여 향후 수술 로봇의 발전 방향을 다음과 같이 크게 세 가지로 정리한다. 감염병 대응을 위한 완전한 비대면 로봇 수술이 구현된 가상의 스마트 로봇 수술실은 [Fig. 1]로 표현하였다.

2.3.1 보조 작업의 비대면화를 통한 완전한 비대면화

현재 수술 보조 인력은 환자의 지척에서 수술 로봇 및 도구의 세팅에서부터 수술 전 과정에 걸쳐 도구를 교체하거나, 보조 도구를 이용하여 체내 조직을 조작하거나 생성된 수술 부산물을 처리한다. 로봇 팔이 올바른 위치를 향할 수 있도록

도구를 적절하게 배치 및 조정하고, 환자의 근육 및 조직의 손상과 압박을 최소화하기 위해 환자가 수술에 최적화된 위치에 있을 수 있도록 수시로 점검한다. 수술 이후 트로카를 제거하고 가스 배출구를 봉합하는 것도 담당한다^[34]. 대면이 불가피한 이러한 작업 중 보조 인력이 에어로졸이나 수술 연기로 인해 감염될 위험이 상당하다. 그럼에도 불구하고 아직 보조 인력을 위해서는 로봇 기술이 적용되지 않고 있으며 이는 로봇 수술의 완전한 비대면화에 있어 현존하는 가장 큰 걸림돌이라고 할 수 있다.

[Fig. 1]에서 볼 수 있듯이, 자율제어나 원격/공동제어 수술 보조 로봇을 이용하면 보조 작업의 비대면화가 가능하다. 주로 환자의 체내에서 작업해야 하는 과정(체내 조직 조작 및 수술 부산물 제거 등)은 수술 보조 인력이 수술실 밖에서 원격/공동제어 수술 보조 로봇을 사용하여 해결할 수 있고, 그 외의 과정(로봇 팔의 수술 도구 교체, 체외 수술 부산물의 안전한 처리 등)은 자율제어 로봇을 적용할 수 있다. 수술대에 모바일 로봇 기술을 적용하면 로봇과 환자의 상대적인 위치 및 자세를 정밀하게 조정할 수 있다. 수술 직후 삽입된 기구를 제거하고 절개를 봉합하는 것도 로봇이 담당한다면 인력의 감염 부담이 줄어든다. 서비스 로봇이 수술실 내부의 소독을 담당하면 수술 중 예상치 못한 위급 상황 등의 경우 의료진이 감염 우려 없이 출입할 수 있을 것이다. 상기된 기술을 현실화한다면 수술실이 완전히 비대면화됨에 따라 감염 위험을 최소화할 수 있다.



[Fig. 1] Schematics of a smart robotic operating room for fully non-contact surgery in infectious diseases: Both surgeons and surgical assistants operate the system remotely, outside a dedicated, negative pressure operating room, through robotic technology. Assistive tasks will be performed autonomously or through teleoperation, depending on the required safety level and technical limitations. Such tasks include tool-change, surgical waste treatment, and coordination between the patient, robot arm, instrument, and surgical port. Surgical instruments for the platform are not limited to conventional laparoscopic procedures but extended to the others that have not been considered for robotic surgery. Disinfection robots will enable immediate intervention by surgical staff in emergencies. An interactive augmented-reality display and integrated management system will help a lead surgeon to manage all instruments, medical information, and tasks (both surgical and assistive) for achieving higher efficiency of fully non-contact robotic surgery

2.3.2 도구의 다양화를 통한 로봇 수술 영역의 확대

다빈치 로봇 시스템은 복수의 로봇 팔로 구성된 플랫폼에 체내로 삽입되어 직접 수술 작업을 하는 도구를 장착하는 방식이다. 수술의 특성에 맞춰 도구를 교체하며, 필요한 경우 복수의 도구를 동시에 사용한다. 현재 많이 이루어지는 주요 수술 중 로봇 기술이 적용되지 않는 수술이 많은데, 그러한 분야에 특화된 도구를 개발한다면 범용 로봇 플랫폼에 장착하여 활용할 수 있다. 로봇 플랫폼이 이미 많이 공급되어 있는 현황을 고려하면 새로운 도구의 개발로 수술 로봇의 적용 영역을 단기간에 획기적으로 확대하는 것도 가능하다. 이는 포스트 코로나 시대에 병원 내 비대면 수술의 일반화로 한 발 더 다가서는 데 도움이 될 것이다.

[Table 2]에 따르면 현재 유럽에서 가장 많이 시행되는 수술은 백내장 수술, 제왕절개 수술, 관상동맥 혈관확장술 순이다. 카테터를 이용하는 관상동맥 혈관확장술의 경우, 현재 상용화된 로봇 카테터에^[35] 비대면화된 수술 보조 작업을 추가하면 완전한 비대면 수술이 가능할 것이다. 하지만 백내장 수술과 제왕절개 수술의 경우, 아직 비대면 수술이 가능한 상용화된 로봇 시스템이 없다. 안구를 대상으로 한 독자적인 수술 로봇 시스템과 산모의 빠른 회복을 위한 수술 로봇이 별도로 개발 중이지만, 범용 로봇 플랫폼에 장착하여 각 수술을 적절하게 수행할 수 있는 로봇 도구의 개발이 미흡하기 때문이다. 백내장 수술은 미세한 힘을 측정하고 정교한 작업이 가능하도록 지능화 및 소형화된 도구가, 제왕절개 수술은 복벽과 자궁벽을 절개하면서 동시에 태아를 섬세하고 안전하게 다룰 수 있는 도구가 필요하다. 예를 들면 소프트 로봇 기술이 제왕절개용 도구 개발에 활용될 수 있을 것이다. 수술실에서 일어날 수 있는 여러 문제 상황에 의료진이 한층 더 직관적으로 민첩하게 대응할 수 있게 돕기 위해서는 이러한 각각의 수술 도구의 특성에 적합한 의사-로봇 인터페이스의 개발도 병행되어야 한다.

[Table 2] Surgical operations and procedures performed in hospitals-top 5, 2018 (per 100,000 inhabitants)^[36]

Operations	Number of cases (country)	Total	Mean	Standard deviation
Cataract surgery	32	28618.3	894.32	357.35
Caesarean section	34	9722.6	294.62	135.36
Transluminal coronary angioplasty	31	6668.5	222.28	74.14
Cholecystectomy	33	5854.2	177.4	55.62
Laparoscopic cholecystectomy	32	4996	156.13	52.41

2.3.3 스마트 수술실과의 통합 운영을 통한 효율화

수술을 완전히 비대면화하기 위해 수술 보조 인력까지 로봇을 사용하면 집도의가 수술 과정을 전반적으로 관리하는 것이 한층 더 중요해진다. 완전한 비대면 수술을 구현하는 로봇 시스템 기존의 스마트 수술실에 결합하여 “스마트 로봇 수술실”로 발전시키면 수술 과정을 관리하는 것이 용이해지면서 의료진의 편의를 돕고 수술 결과와 효율성을 제고할 수 있다. “스마트 로봇 수술실”에 도입할 디지털 통합 관리 시스템은 수술실 내 의료 장비와 정보뿐만 아니라 각 인력이 수행하는 수술 관련 작업까지 총괄하여 편리하게 관리할 수 있도록 한다. 이러한 수단을 통해 로봇 수술 시스템의 효율성을 제고하면 꾸준히 지적되어 온 단점인 비용과 시간의 문제를 해결할 수 있을 것이다.

[Fig. 1]에서 보듯이, 수술 과정에서 필요한 모든 정보는 수술이 이루어지는 원격 수술실의 화면에 표시되어 이를 의사와 보조 인력, 필요에 따라 외부의 의료진까지 동시에 공유할 수 있게 함으로써 비대면이면서 효율적으로 진행될 수 있도록 지원한다. 이 스마트 화면은 터치 또는 음성으로 제어될 수 있고 5G 통신과 증강현실 기술을 적용하거나 작업에 몰입할 경우 HMD (Head-mounted display)를 사용할 수도 있다.

다양한 영역으로 완전한 비대면 로봇 수술이 확대되고 스마트 로봇 수술실이 효율적으로 사용되기 위해서는 수술을 집도하는 의사뿐만 아니라 수술 보조 인력들의 충분한 로봇 교육이 뒷받침되어야 한다. 기존에 필요한 해부학, 생리학, 병리학 등에 기반한 환자의 의학적 상태, 또는 복강경 및 로봇을 사용한 최소침습수술에 대한 이해와 더불어 특히 원격제어를 사용하는 경우에는 로봇의 작동 원리 및 기능에 대한 이해도 필수적이다. 보조 작업을 위한 로봇과 다양한 영역에 필요한 수술 로봇 도구의 개발과 함께, 로봇 공학자들과 의료 인력 간의 긴밀한 협업을 통해서 효과적인 훈련 프로그램이 개발된다면 수술 성과를 제고할 수 있을 것이다.

3. 결 론

전례 없는 COVID-19 팬데믹은 세계적으로 많은 파장을 일으키고 있고, 이에 사회의 다양한 분야가 비대면 서비스와 기술을 중심으로 재편되고 있다. COVID-19 환자를 치료함과 동시에 감염에 취약한 환자들이 대부분일 수밖에 없는 병원은 그 변화의 중심에 있으며 스마트 병원으로의 전환은 팬데믹을 계기로 가속화되고 있다. 인공지능과 로봇 기술을 통해 진단과 환자 관리의 자동화 및 작업의 효율화는 진행 중이나 물리적 상호 작용이 불가피한 현재의 수술적 치료는 비대면이라는 뉴노멀 시대의 요구 사항을 충족시키기 어렵다. 감염 위험으로부터 상대적으로 자유로운 로봇 수술이 그 해결책으로 주목을 받고 있으나, 현재의 수술 로봇 시스템으로는 여전히 포스트 코로나 시대를

효과적으로 대응하기에 한계가 있고, 이는 로봇 수술의 비효율적인 면과도 연관이 있다. 이에 따라 본 논문에서는 수술 보조 작업에 로봇을 도입함으로써 로봇 수술의 완전한 비대면화를 도모하고, 그동안 로봇 수술이 적용되지 않았던 분야에 적합한 다양한 수술 도구 및 의사-로봇 인터페이스를 개발하여 비대면 로봇 수술의 영역을 확대할 것을 제안한다. 또한, 이러한 시스템을 사용하는 로봇 수술 과정을 통합적이고 체계적으로 관리할 수 있게 하는 스마트 로봇 수술실을 만들고 효과적인 의료 인력 훈련 프로그램 개발을 병행한다면, 포스트 코로나 시대 상업적 성공과 스마트 병원으로의 진화에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] D. Almaghaslah, G. Kandasamy, M. Almanasef, R. Vasudevan, and S. Chandramohan, "Review on the coronavirus disease (COVID-19) pandemic: its outbreak and current status," *International Journal of Clinical Practice*, vol. 74, no. 11, 2020, DOI: 10.1111/ijcp.13637.
- [2] V. C.-C. Cheng, S.-C. Wong, V. W.-M. Chuang, S. Y.-C. So, J. H.-K. Chen, S. Sridhar, K. K.-W. To, J. F.-W. Chan, I. F.-N. Hung, P.-L. Ho, and K.-Y. Yuen, "The role of community-wide wearing of face mask for control of coronavirus disease 2019 (COVID-19) epidemic due to SARS-CoV-2," *Journal of Infection*, vol. 81, no. 1, pp. 107-114, 2020, DOI: 10.1016/j.jinf.2020.04.024.
- [3] J. W. Tang, W. P. Bahnfleth, P. M. Bluyssen, G. Buonanno, J. L. Jimenez, J. Kurnitski, Y. Li, S. Miller, C. Sekhar, L. Morwska, L. C. Marr, A. K. Melikov, W. W. Nazaroff, P. V. Nielsen, R. Tellier, P. Wargoocki, and S. J. Dancer, "Dismantling myths on the airborne transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus-2 (SARS-CoV-2)," *The Journal of Hospital Infection*, vol. 10, pp. 89-96, 2021, DOI: 10.1016/j.jhin.2020.12.022.
- [4] S. E. Hwang, J. H. Chang, B. Oh, and J. Heo, "Possible aerosol transmission of covid-19 associated with an outbreak in an apartment in seoul, south korea, 2020," *International Journal of Infectious Diseases*, vol. 104, pp. 73-76, 2021, DOI: 10.1016/j.ijid.2020.12.035.
- [5] EDITORIAL, "Coronavirus is in the air-there's too much focus on surfaces," *Nature*, vol. 590, no. 7, 2021, DOI: 10.1038/d41586-021-00277-8.
- [6] Global Smart Hospital Market Size By Component, My Application, By Geographic Scope And Forecast, Report ID: 22461, 2019, [Online], <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/smart-hospital-market/>.
- [7] M. Tavakoli, J. Carriere, and A. Torabi, "Robotics, smart wearable technologies, and autonomous intelligent systems for healthcare during the covid-19 pandemic: An analysis of the state of the art and future vision," *Advanced Intelligent Systems*, vol. 2, no. 7, 2020, DOI: 10.1002/aisy.202000071.
- [8] X. Chen, J. Tian, G. Li, and G. Li, "Initiation of a new infection control system for the COVID-19 outbreak," *The Lancet. Infectious Diseases*, vol. 20, no. 4, pp. 397, 2020, DOI: 10.1016/S1473-3099(20)30110-9.
- [9] C. M. Contreras, G. A. Metzger, J. D. Beane, P. H. Dedhia, A. Ejaz, and T. M. Pawlik, "Telemedicine: patient-provider clinical engagement during the covid-19 pandemic and beyond," *Journal of Gastrointestinal Surgery*, vol. 24, pp. 1692-1697, 2020, DOI: 10.1007/s11605-020-04623-5.
- [10] A. Zemmar, A. M. Lozano, and B. J. Nelson, "The rise of robots in surgical environments during COVID-19," *Nature Machine Intelligence*, vol. 2, no. 1, pp. 566-572, 2020, DOI: 10.1038/s42256-020-00238-2.
- [11] S. Bhaskar, S. Bradley, S. Sakhamuri, S. Moguilner, V. K. Chattu, S. Pandya, S. Schroeder, D. Ray, and M. Banach, "Designing futuristic telemedicine using artificial intelligence and robotics in the COVID-19 era," *Frontiers in Public Health*, vol. 8, 2020, DOI: 10.3389/fpubh.2020.556789.
- [12] Z. H. Khan, A. Siddique, and C. W. Lee, "Robotics utilization for healthcare digitization in global covid-19 management," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 11, 2020, DOI: 10.3390/ijerph17113819.
- [13] G.-Z. Yang, B. J. Nelson, R. R. Murphy, H. Choset, H. Christensen, S. H. Collins, P. Dario, K. Goldberg, K. Ikuta, N. Jacobstein, D. Kragic, R. H. Taylor, and M. McNutt, "Combating covid-19—the role of robotics in managing public health and infectious diseases," *Science Robotics*, vol. 5, no. 40, 2020, DOI: 10.1126/scirobotics.abb5589.
- [14] D. Nepogodiev, "Elective surgery cancellations due to the COVID-19 pandemic: global predictive modelling to inform surgical recovery plans," *British Journal of Surgery*, vol. 107, no. 11, 2020, DOI: 10.1002/bjs.11746.
- [15] SAGES and EAES recommendations regarding surgical response to COVID-19 crisis, [Online], <https://www.sages.org/recommendations-surgical-response-covid-19/>, Accessed: April 14, 2020.
- [16] M. Reichert, M. Sartelli, M. A. Weigand, C. Doppstadt, M. Hecker, A. Reinisch-Liese, F. Bender, I. Askevold, W. Padberg, F. Coccolini, F. Catena, A. Hecker, and The WSES COVID-19 emergency surgery survey collaboration group, "Impact of the SARS-CoV-2 pandemic on emergency surgery services—a multi-national survey among WSES members," *World J Emergency Surgery*, vol. 15, no. 1, 2020, DOI: 10.1186/s13017-020-00341-0.
- [17] J. Okamoto, K. Masamune, H. Iseki, and Y. Muragaki, "Development concepts of a Smart Cyber Operating Theater (SCOT) using ORiN technology," *Biomedical Engineering / Biomedizinische*, vol. 63, no. 1, pp. 31-37, 2018, DOI: 10.1515/bmt-2017-0006.
- [18] L. Moletta, E. S. Pierobon, G. Capovilla, M. Costantini, R. Salvador, S. Merigliano, and M. Valmasoni, "International guidelines and recommendations for surgery during covid-19 pandemic: a systematic review," *International Journal of Surgery*, vol. 79, 2020, DOI: 10.1016/j.ijssu.2020.05.061.
- [19] V. Ficarra, G. Novara, A. Abrate, R. Bartoletti, A. Crestani, C. De Nunzio, G. Giannarini, A. Gregori, G. Liguori, V. Mirone, N. Pavan, R. M. Scarpa, A. Simonato, C. Trombetta, A. Tubaro, F. Porpiglia, and Research Urology Network (RUN), "Urology practice during the COVID-19 pandemic," *Minerva Urologica e Nefrologica = The Italian Journal of Urology and Nephrology*, vol. 72, no. 3, 2020, DOI: 10.23736/S0393-2249.20.03846-1.

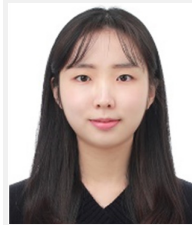
- [20] R. S. Wax and M. D. Christian. "Practical recommendations for critical care and anesthesiology teams caring for novel coronavirus (2019-nCoV) patients," *Canadian Journal of Anesthesia/Journal canadien d'anesthésie*, vol. 67, no. 4, pp. 568-576, 2020, DOI: 10.1007/s12630-020-01591-x.
- [21] Laparoscopy in the Covid-19 Environment-ALSGBI Position Statement, [Online], <https://www.alsgbi.org/2020/04/22/laparoscopy-in-the-covid-19-environment-alsgbi-position-statement/>, Accessed: April 24, 2020.
- [22] M. H. Zheng, L. Boni, and A. Fingerhut, "Minimally invasive surgery and the novel coronavirus outbreak," *Ann. Surg.*, vol. 272, no. 1, 2020, DOI: 10.1097/SLA.0000000000003924.
- [23] S. Di Saverio, F. Pata, G. Gallo, F. Carrano, A. Scorza, P. Sileri, N. Smart, A. Spinelli, and G. Pellino, "Coronavirus pandemic and Colorectal surgery : practical advice based on the Italian experience," *Colorectal Dis*, vol. 22, no. 6, 2020, DOI: 10.1111/codi.15056.
- [24] S. L. Cohen, G. Liu, M. Abrao, N. Smart, and T. Heniford, "Perspectives on surgery in the time of COVID-19: safety first," *J. Minim. Invasive Gynecol.*, vol. 27, no. 4, 2020, DOI: 10.1016/j.jmig.2020.04.003.
- [25] S. N. Morris, A. Nickles Fader, M. P. Milad, and H. J. Dionisi, "Understanding the "scope" of the problem: why laparoscopy is considered safe during the COVID-19 pandemic," *J. Minim. Invasive Gynecol.*, vol. 27, no. 4, 2020, DOI: 10.1016/j.jmig.2020.04.002.
- [26] H. Kameyama, T. Otani, T. Yamazaki, A. Iwaya, H. Uehara, R. Harada, M. Hirai, M. Komatsu, A. Kubota, T. Katada, K. Kobayashi, D. Sato, N. Yokoyama, S. Kuwabara, Y. Tanaka, and K. Sawakami, "Comparison of surgical smoke between open surgery and laparoscopic surgery for colorectal disease in the COVID-19 era," *Surg Endosc.*, 2021, DOI: 10.1007/s00464-021-08394-1.
- [27] K. H. Sheetz, J. Claffin, and J. B. Dimick, "Trends in the adoption of robotic surgery for common surgical procedures," *JAMA Network Open*, vol. 3, no. 1, 2020, DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2019.18911.
- [28] P. Boyraz, I. Dobrev, G. Fischer, and M. B. Popovic, "Robotic surgery," *Biomechatronics*, pp. 431-450, 2019, DOI: 10.1016/B978-0-12-812939-5.00015-X.
- [29] "Surgical Robots Market by Products, Application, Region, Company Analysis, & Global Forecast," *Research and Markets*, Rep ID: 5265134, February, 2021, [Online], <https://www.researchandmarkets.com/reports/5265134/surgical-robots-market-by-products-application>.
- [30] D. S. Keller, A. J. Senagore, J. K. Lawrence, B. J. Champagne, and C. P. Delaney, "Comparative effectiveness of laparoscopic versus robot-assisted colorectal resection," *Surg Endosc.*, vol. 28, no. 1, 2014, DOI: 10.1007/s00464-013-3163-5.
- [31] Y. Lotan, "Is robotic surgery cost-effective: no," *Current opinion in urology*, vol. 22, no. 1, pp. 66-69, 2012, DOI: 10.1097/MOU.0b013e32834d4d76.
- [32] E. M. van der Schans, M. A. J. Hiep, E. C. J. Consten, and I. A. M. J. Broeders, "From Da Vinci Si to Da Vinci Xi: realistic times in draping and docking the robot," *J Robot Surg.*, vol. 14, no. 6, 2020, DOI: 10.1007/s11701-020-01057-8.
- [33] I. D. Gkegkes, I. A. Mamais, and C. Iavazzo, "Robotics in general surgery: A systematic cost assessment," *J Minim Access Surg.*, vol. 13, no. 4, 2017, DOI: 10.4103/0972-9941.195565.
- [34] "Guideline Statement for the Surgical Assistant in Robotic Surgery," Association of Surgical Assistants, 2017, [Online], https://www.surgicalassistant.org/about/guidelines/files/Guidelines_Surgical_Robotics.pdf.
- [35] G. Bassil, S. M. Markowitz, C. F. Liu, G. Thomas, J. E. Ip, B. B. Lerman, and J. W. Cheung, "Robotics for catheter ablation of cardiac arrhythmias: Current technologies and practical approaches," *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*, vol.31, no. 3, pp. 739-752, 2020, DOI: 10.1111/jce.14380.
- [36] Surgical operations and procedures statistics, Eurostat, [Online], https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Surgical_operations_and_procedure_statistics&oldid=502541, Accessed: October 13, 2020.



장 하 늘

2020 이화여자대학교 휴먼기계바이오공학부 (학사)
2021~현재 이화여자대학교 휴먼기계바이오공학부(석사)

관심분야: Robotics, Haptics, Machine Learning, Instrumentation



송 채 희

2018~현재 이화여자대학교 휴먼기계바이오공학부(학사)

관심분야: Robotics, Haptics, Machine Learning, Instrumentation



류 석 창

2002 포항공과대학교 기계공학과(학사)
2007 Stanford University, Mechanical Engineering (M.S.)
2013 Stanford University, Mechanical Engineering (Ph.D.)
2013-2015 Harvard Medical School/Boston Children's Hospital (Postdoctoral Research Fellow)

2015-2019 Texas A&M University, Mechanical Engineering (Assistant Professor)

2019~현재 이화여자대학교 휴먼기계바이오공학부 조교수

관심분야: Medical Robotics, Haptics, Human-Robot Interactions, Instrumentation