creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

da Vinci Research Kit (dVRK)의 헤드 마운티드 디스플레이 적용과 성능 평가 방법

Application of head-mounted display to da Vinci Research Kit (dVRK) with its performance evaluation method

2021년 8월

서울대학교 대학원

협동과정 바이오엔지니어링전공

문 경 빈

da Vinci Research Kit (dVRK)의 헤드 마운티드 디스플레이 적용과 성능 평가 방법

지도 교수 Sungwan Kim

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2021년 6월

서울대학교 대학원
협동과정 바이오엔지니어링전공
문 경 빈

문경빈의 공학석사 학위논문을 인준함
2021년 6월

위 원 장 이 정 찬

부위원장 Sungwan Kim

위 원 공 현 중

초 록

로봇 수술은 발전된 최소 침습 수술 (Minimally invasive surgery, MIS)로서 기존의 내시경 수술과 비교하여 수술 예후를 비롯하여 집도의와 환자 측면 모두에서 다양한 이점을 지닌다. 하지만, 현재 가장 널리 사용되는 Intuitive surgical 사 (Sunnyvale, CA, USA)의 da Vinci® 수술 로봇 시스템은 3D 영상을 제공하는 디스플레이인 Stereo viewer로 인해 집도의가 수술 중 불편한 자세를 유지해야 하므로 단기적으로는 불편감으로 인해 수술 과정 및 결과에 악영향을 미칠 수 있으며 장기적으로서는 집도의에게 근골격계 질환을 유발할 가능성이 있다. 이후 Open-console 형태의 단일 디스플레이를 채택한 타 수술 로봇이 시장에 출시되어 불편한 자세에서 오는 문제가 해결될 것으로 기대되었으나 단일 디스플레이의 단점으로 인하여 현실과 가까운 높은 수준의 시각적 피드백을 제공할 수 없는 문제가 있었다. 따라서 본 연구에서는 수술 로봇 시스템의 인체공학적 향상을 위해 머리 부분 탑재형 디스플레이 (Head mounted display, HMD)를 Stereo viewer의 대안으로 제시하며 da Vinci® 수술 로봇 시스템에 적용하였다.

연구에서 고안한 시스템은 da Vinci® research kit (dVRK)와 4 자유도의 내시경 제어 시스템 (Endoscope control system, ECS), 그리고 HMD로 구성되며 크게 수술 로봇 조작부와 내시경 영상 송출부로 나눌 수 있다. dVRK는 1세대 da Vinci® 수술 로봇 시스템을 연구 목적으로 전용한 것으로서 Master tool manipulator (MTM)에 가해진 조작이 컴퓨터를 통해 명령으로 변환되어 Patient side manipulator (PSM)을 제어하는 Master-slave 방식이며 ECS에는 한

쌍의 카메라가 병렬로 장착되어 촬영된 영상이 Windows (Microsoft, Redmond, WA, USA) PC에서 3D 영상으로 변환하여 HMD에 송출된다. 한편, HMD는 안면부에 고정되어 시야를 차단하므로 주변 환경과 충돌하는 등의 문제가 발생할 수 있는데 이를 위해 HMD에 송출되는 영상을 HMD 전방에 설치된 카메라에서 받은 영상으로 교체하는 기능을 추가하여 사용자가 HMD를 벗지 않고 외부를 볼 수 있도록 했다. 또한, 구현된 시스템은 기존 시스템과 비교하여 그 효용성을 입증하기 위해 타당한 사용자 평가 방법이 필요할 것으로 사료된다. 따라서, 본 연구에서는 기존 시스템과 새로이 구현된 시스템 간의 비교 평가를 위해 정량·정성적 두 측면에서 Peg transfer task와 NASA-TLX (Task load index)를 사용자 평가 방법으로 제시하였다.

본 연구에서 구현한 HMD가 접목된 수술 로봇 시스템은 기존 시스템과 비교하여 인체공학적인 장점을 보일 것으로 기대된다. 또한, 제시한 정량·정성적 평가를 진행하면 3D 영상 디스플레이가 Stereo viewer에서 HMD로 대체되었을 때 미치는 성능 상의 영향을 확인할 수 있을 것이다. 이러한 결과를 토대로 이후 HMD를 활용한 수술 로봇 개선 연구의 방향을 제시할 수 있을 것이며 HMD의 용적이 Stereo viewer에 비해 매우 작으므로 전체적인 시스템의 용적이 감소하여 수술실의 공간 효율성이 증가하고 민간 및 군사 분야에서 HMD에 적용되어 효용성이 입증된 무선 컨트롤러, 3D 오버레이 등의 다양한 기술을 추가로 접목할 수 있으므로 수술 로봇의 성능 향상을 기대할 수 있을 것이다.

주요어 : 수술 로봇, da Vinci Research Kit (dVRK), 인체공학적 시스템, 헤드 마운티드 디스플레이

학 번 : 2019-25593

목 차

제 1 장 서 론 7
제 1 절 연구의 배경 7
제 2 절 연구의 내용과 목적 12

제 2 장 본 론 18
제 1 절 시스템의 구성 18
제 2 절 사용자 평가 설계 28

제 3 장 결과 및 분석 33
제 1 절 시스템 구성 결과 23
제 2 절 사용자 평가 방법 35

제 4 장 결 론 42

참고문헌 45

Abstract 48

표 목차

[표 1] HMD 성능 비교표 18
[표 2] NASA-TLX의 6개 평가 항목 설명 32

그림 목차

[그림 1] (a) 기구 말단과 조작부의 움직임이 상이한 내시경 수술 기구, (b) 기구 말단이 손의 움직임을 모사하는 수술 로봇 10
[그림 2] (a) 한 쌍의 디스플레이가 탑재된 da Vinci 수술 로봇 시스템, (b, c) 단일 디스플레이가 탑재된 Transentrix사와 Titan medical사의 수술 로봇 시스템 11
[그림 3] 평가에 사용되는 시스템의 구성도: (a) 수술 로봇 조작부, (b) 내시경 영상 송출부 14
[그림 4] dVRK의 구성 요소: (a) stereo viewer, master tool manipulators, and patient side manipulators, (b) 8축 모터 제어 유닛, (c) foot pedal tray 16
[그림 5] Stereo viewer와 HMD의 사용 자세 비교: (a) 머리를 앞으로 숙인 고정된 자세를 유지해야함, (b) 상체의 움직임이 자유로워 편안한 자세를 취할 수 있음 17
[그림 6] 구성한 시스템의 Software flowchart 19
[그림 7] Steam VR의 구동 화면 및 HMD 내부에 구현된 가상 환경 20
[그림 8] 가상 공간에 투영되는 영상 평면: (a) 우안을 담당하는 우측 카메라에 표현되는 영상, (b) 좌안을 담당하는 좌측 카메라에 표현되는 영상 22
[그림 9] 영상 평면 수동 조정 방향 및 Unity 내부 변수 23
[그림 10] 영상 Source 전환 기능을 구현한 C# Code – 1 24
[그림 11] 영상 Source 전환 기능을 구현한 C# Code – 2, 영상 전환 예시: (a) 내시경 영상, (b) HMD 전면 카메라 영상 25
[그림 12] HMD의 센서 배치: (a) 제조사에서 권장하는 센서 배치도, (b) 평가 환경에 맞추어 배치한 센서의 위치; 좌 – Stereo viewer 상단, 우 – Foot pedal 후면 27

[그림 13] NASA-TLX 평가지 예시 31
[그림 14] Stereo viewer와 HMD에 표시되는 화면의 비교: (a) Stereo viewer, (b) HMD 34
[그림 15] 평가 과정 38
[그림 16] 평가에 사용될 시스템의 구성도: (a) 수술 로봇 조작부, (b) 내시경 영상 송출부 39
[그림 17] Peg transfer task 수행 과정: (a) 고리를 맞은편으로 옮김, (b) 맞은편 수술 기구로 고리를 넘김, (c) 고리를 원위치로 되돌림 40
[그림 18] Modified NASA-TLX 평가지 예시 41
[그림 19] Stereo viewer와 HMD의 용적 비교: (a) Stereo viewer의 높이, 길이, 그리고 깊이, (b) HMD의 높이, 길이, 그리고 깊이 44

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경

20세기 초까지 대부분 수술은 수술 부위에 접근하기 위해 높은 침습 수준의 절개가 이뤄져 의도치 않은 부작용이 동반되었다. 이러한 문제를 해결하기 위한 노력은 최소 침습 수술 (Minimally invasive surgery, MIS)의 도입으로 이어졌으며 전통적인 절개 수술과 비교하여 출혈, 흉터, 수술 후 합병증 그리고 수술 후 회복 기간이 최소화되는 장점을 보여 병원 내 여러 분야에서 시행되고 있다 [1-6]. 하지만 집도의가 내시경 수술 기구를 직접 조작하는 기존의 MIS는 수술 기구의 조작부와 기구 말단의 움직임이 상이하여 직관적이지 않고 자유도가 낮아 동작 범위가 제한된다. 또한, 손 떨림과 같은 외란에 취약하다 [7] (그림 1). 이러한 단점은 수술 중 높은 집중을 요구하여 집도의에게 큰 부담이 되므로 오랜 수술 시간 동안 집도의의 피로도 누적이 심하며 결과적으로 수술을 받는 환자에게도 악영향을 끼칠 수 있다. 따라서, 이러한 문제의 해법으로 수술 로봇 시스템이 도입되었다. 수술 로봇 시스템은 집도의가 수술 기구를 직접 조작하는 것이 아니라 조작부를 조작하면 조작부에 입력된 명령에 따라 로봇 팔로 제어 신호를 전송하여 수술 기구를 간접적으로 조작하는 마스터-슬레이브 시스템 (Master-slave system)으로 적절한 신호 처리를 통해 비의도적인 동작을 배제할 수 있어 기존 MIS에서 지적된 외란의 영향에서 자유로워 안정적이다. 또한, 제어와 그 결과가 상이하지 않고 수술 기구 말단이 손의 움직임을 모사하여 직관적인 제어가 가능하며 로봇 팔의 높은 자유도를 기반으로

넓은 동작 범위를 지닌다 (그림 1). 그리고 수술 예후에서도 수술 로봇 시스템이 기존 MIS보다 양호한 결과를 보였다 [8].

한편, 수술 로봇 시스템은 집도의가 환자와 이격되어 촉각 피드백이 제한되므로 수술 기구를 적절히 조작하는데 시각적 피드백이 매우 중요하다 [9]. 촉각 피드백은 집도의가 수술을 진행함에 있어 시각적 피드백과 함께 신체 내 장기와 수술 기구의 상호작용 시, 환자에게 상해가 가해지지 않거나 최소화 할 수 있도록 정밀한 제어를 가능하게 하는데, 이러한 피드백의 부재는 수술 과정에서 환부 또는 접근 경로에 가해지는 부수적인 피해를 줄이려는 과정에 매우 큰 악영향을 미칠 수 있으므로 집도의에게 강요되는 정보의 공백을 극복할 수 있을 만큼 정확한 시각 정보를 송출할 수 있는 고해상도의 3D 디스플레이가 요구된다 [10]. 따라서, 전 세계적으로 널리 사용되는 da Vinci® 수술 로봇 시스템은 Stereo viewer를 통해 3D 영상을 지원하여 촉각 피드백의 결여로 인한 영향을 줄이고 집도의가 수술 기구를 정밀하게 제어할 수 있도록 보조한다. 하지만 Stereo viewer는 큰 용적과 가동 범위의 제한으로 인해 사용자가 고개를 숙여 얼굴을 밀착시키거나 고개를 과도하게 앞으로 내민 자세로 사용해야 한다. 집도의는 수 시간에 달하는 수술 시간 동안 이런 불편한 자세를 유지해야 하고 이것이 오랜 기간 반복되면 거북목과 같은 근골격계 질환을 유발할 수 있어 기존 연구에서 구조적인 개선의 필요성이 꾸준히 제시되어 왔다 [11-15].

위와 같은 문제에 대하여 polarization 방식의 단일 디스플레이가 적용된 수술 로봇이 제시된 바 있다 (그림 2) [16]. 해당 수술 로봇은 기존 수술 로봇 시스템과 달리 집도의가 편하게 앉은 자세에서 집도의의 정면에 디스플레이가 위치하여 집도의가 정자세로 앉아 사용할 수 있는 구조이다. 그러나 polarization, anaglyph 그리고 shutter 방식 등, 단일

디스플레이를 사용하는 3D 디스플레이는 한 쌍의 디스플레이로 3D 영상을 구현하는 방식과 비교하여 상대적으로 해상도와 주사율이 낮고 각 방식에 따라 flickering, ghosting, 그리고 crosstalk 현상이 두드러지게 일어나거나 색 재현성이 떨어지고 제한된 시야각으로 인해 사용자가 자세를 바꾸면 3D 영상이 정상적으로 표현되지 않는 문제점이 있어 로봇 수술에서 환자의 안전에 직접적인 영향을 미치는 시각적 피드백의 품질이 저하되고 수술 시간 동안 집도의의 자유로운 움직임에 제약을 줄 수 있는 단점을 지니고 있다 [17-19].

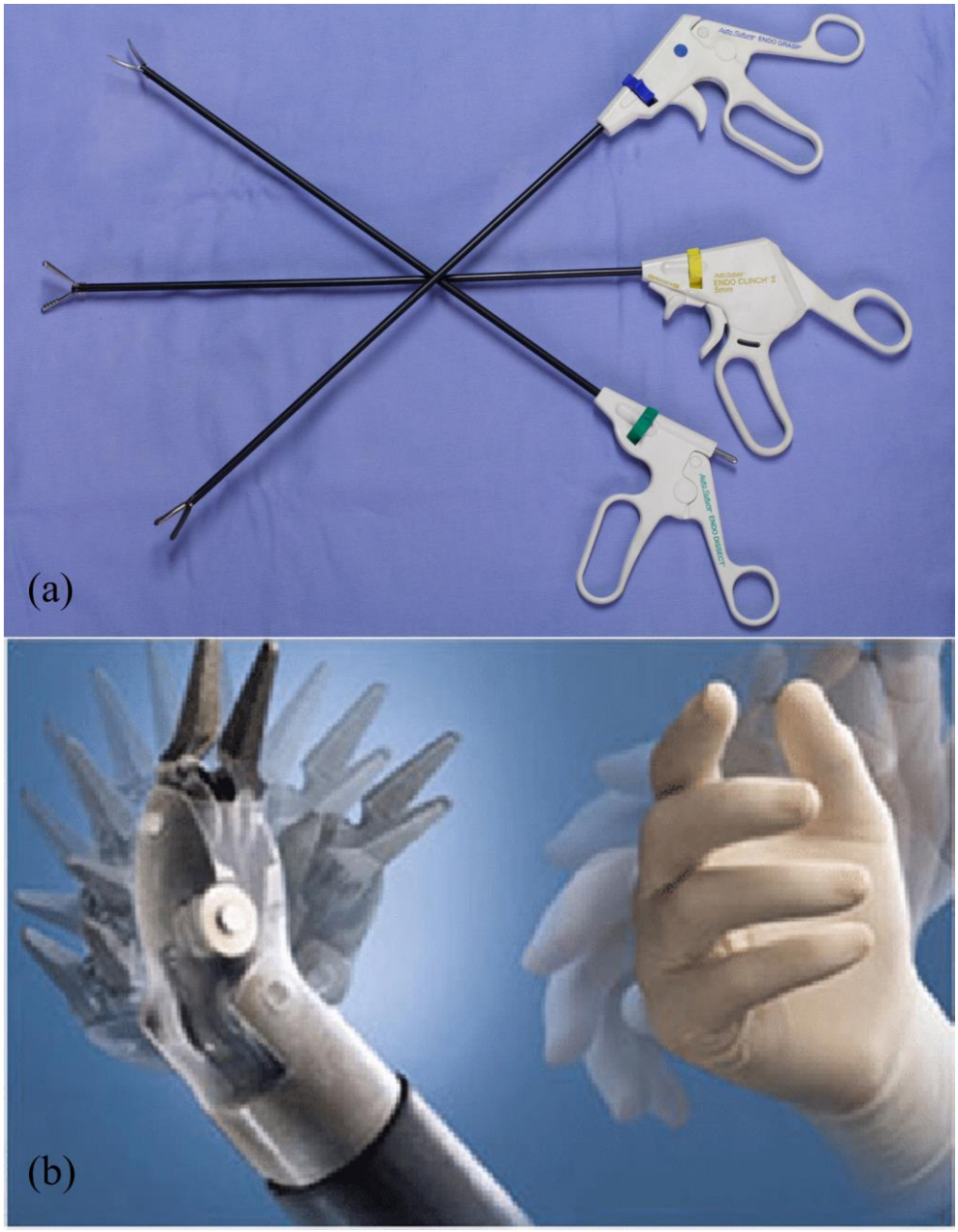


그림 1. (a) 기구 말단과 조작부의 움직임이 상이한 내시경 수술 기구 [20], (b) 기구 말단이 손의 움직임을 모사하는 수술 로봇 [21].

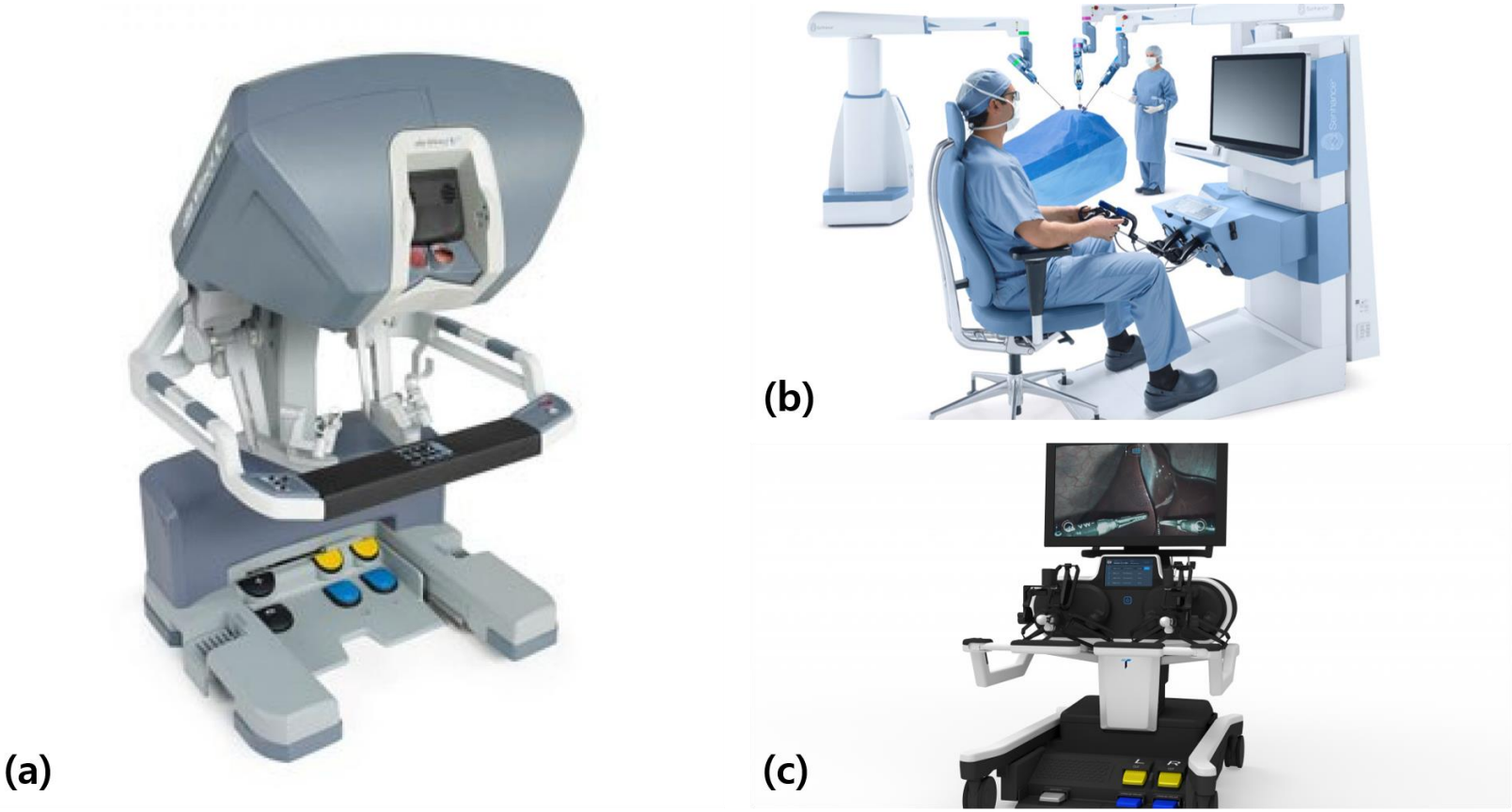


그림 2. (a) 한 쌍의 디스플레이가 탑재된 da Vinci 수술 로봇 시스템,
(b, c) 단일 디스플레이가 탑재된 Transentrix사와 Titan medical사의 수술 로봇 시스템

제 2 절 연구의 내용과 목적

본 연구에서는 수술 과정 중 집도의의 편의성을 증대하면서도 시각적 피드백의 품질이 저하되지 않도록 기존 da Vinci® 수술 로봇 시스템의 Stereo viewer를 대체할 3D 디스플레이로 머리 부분 탑재형 디스플레이 (Head mounted display, HMD)를 제안하고 제안된 시스템의 유효성 검증을 위한 사용자 평가 방법을 제시한다. 본 연구에 앞서 인체공학적인 관점에서 내시경 제어에 HMD를 활용한 연구가 있으나 [22, 23] 타 분야에서 널리 사용되어 객관성이 입증된 방법을 활용하지 않았거나 추가적으로 정량적 측면에서의 분석이 필요하다고 사료되었다.

따라서, 이전 연구들보다 개선된 HMD를 활용한 수술 로봇 시스템을 구현하고 이 시스템의 유효성 검증을 위한 정량·정성적 평가를 제시하는 것이 본 연구의 목적이다.

제 2 장 본 론

제 1 절 시스템의 구성

본 연구에서 평가에 사용되는 시스템은 da Vinci® research kit (dVRK, Intuitive Surgical, Inc., Sunnyvale, CA, USA), 4 자유도 내시경 제어 시스템 (Endoscope control system, ECS) 그리고 HMD로 구성되며 다시 크게 수술 로봇 조작부와 내시경 영상 송출부로 나뉜다. 이를 구성도로 나타내면 아래 그림 3와 같다.

수술 로봇 조작부는 Master tool manipulator (MTM)에서 사용자로부터 명령을 입력 받아 Ubuntu (Ubuntu, Canonical Ltd., London, UK) 컴퓨터에서 적절한 제어 신호로 변환하여 Patient side manipulator (PSM)을 구동한다. 내시경 영상 송출부는 ECS가 촬영한 영상을 Windows (Windows 10, Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) 컴퓨터로 전송하고 Windows 컴퓨터는 전송된 영상을 어플리케이션 및 게임 개발용 프로그램 “유니티 게임 엔진” (Unity, Unity technologies, San Francisco, CA, USA)을 통해 3D 입체 영상으로 변환하여 HMD를 통해 사용자에게 송출한다.

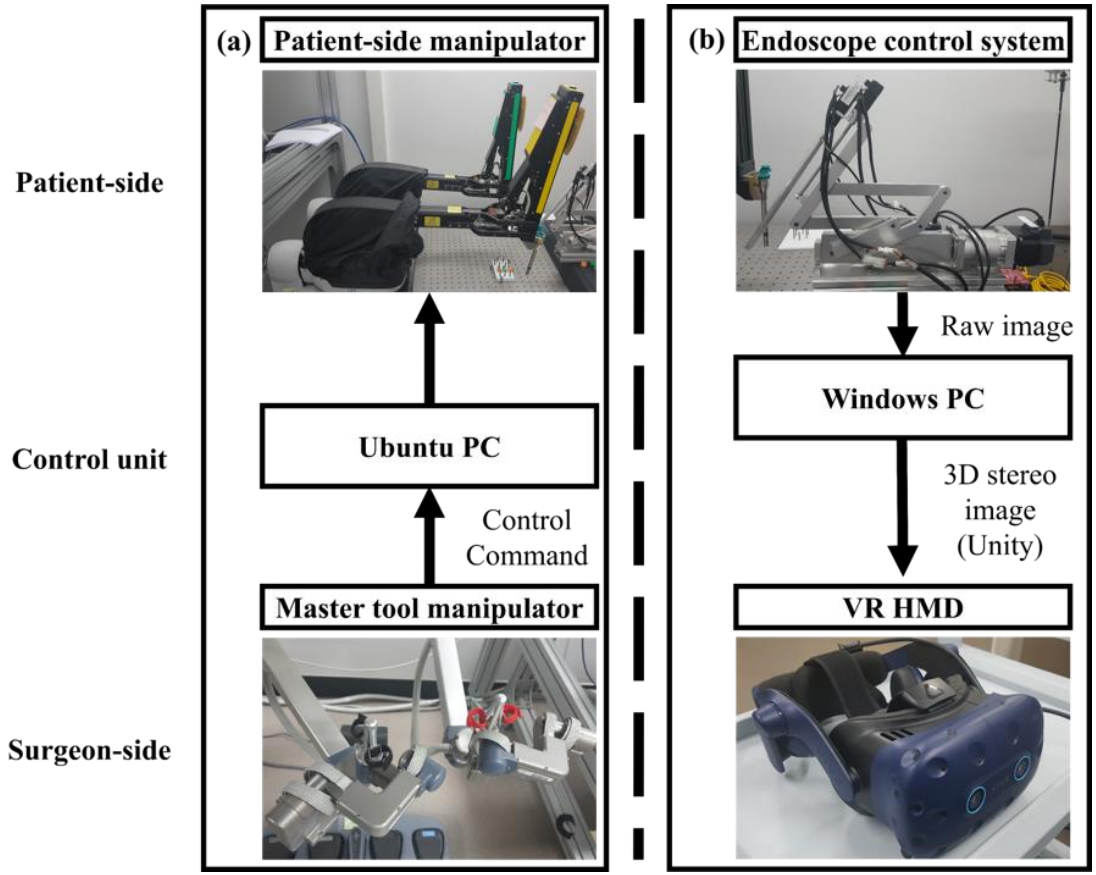


그림 3. HMD가 적용된 수술 로봇 시스템의 구성도: (a) 수술 로봇 조작부, (b) 내시경 영상 송출부.

dVRK는 1세대 da Vinci 수술 로봇 시스템을 연구 목적으로 활용한 것으로 한 쌍의 MTM과 PSM, 8축 모터 제어 유닛, Foot pedal tray 그리고 Stereo viewer로 구성된다 (그림 4). PSM은 MTM의 움직임에 따라 이를 모사하여 동작하고 8축 모터 제어 유닛은 PSM과 MTM 사이에서 명령을 전송하는 역할을 맡는다. Foot pedal tray는 양손으로 MTM을 조작하는 동시에 발로 조작하여 PSM과 MTM 사이의 명령 전송 여부를 설정하는 등 추가 기능을 수행할 수 있는 제어 인터페이스다. Stereo viewer는 한 쌍의 640×480 해상도 모니터가 내장되어 사용자에게 좌측과 우측 화면에 별도의 영상을 띄우는 방식으로 3D 영상을 제공한다.

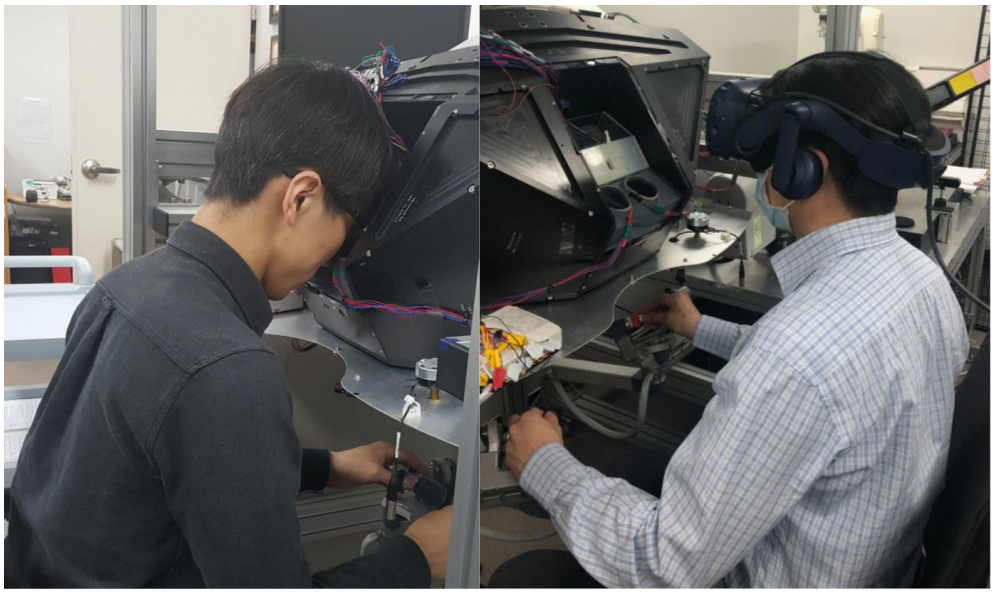
dVRK에는 내시경 카메라 Manipulator가 포함되지 않아 선행된 연구에서 설계한 ECS를 활용하였다. ECS는 640×480 해상도의 CMOS 카메라 2개가 수평 방향으로 배열되어 두 카메라의 시차를 통해 3D 영상 구성에 필요한 영상을 촬영한다. 또한, MIS에서 필요한 Fulcrum point motion[①]이 가능하며 말단부가 30° 로 기울어 있어 Roll 방향으로 회전만으로도 카메라의 시야를 좌우로 움직일 수 있다 [24].

본 연구에서 사용한 HMD는 VIVE Pro Eye (HTC, New Taipei, Taiwan)로 접안부가 사용자의 머리보다 낮게 위치하여 고개를 숙인 채로 접안부에 얼굴을 밀착하는 특정 자세가 강요되는 Stereo viewer와 달리 본체가 사용자의 안면부에 고정되어 화면이 눈 앞에 위치하는 HMD는 상체의 움직임이 자유로워 편안한 자세에서 수술 로봇의 제어가 가능하다는 장점을 가진다 (그림 5). 또한, 좌우 화면을 합쳐 2,880×1,660 픽셀의 해상도, 615 pixels per inch의 고화질 영상을 최대 110° 시야각과 90Hz의 주사율로 송출할 수 있어 이전 연구에 사용된 HMD에 비해 제공하는 영상의 품질이 우수하다 (표 1).

① 레버가 레버 상의 한 점을 중심으로 회전하는 운동.

(a) (b) (c)

그림 4. dVRK의 구성 요소: (a) stereo viewer, master tool manipulators, and patient side manipulators, (b) 8축 모터 제어 유닛, (c) foot pedal tray.



(a) (b)

그림 5. Stereo viewer와 HMD의 사용 자세 비교:
(a) 머리를 앞으로 숙인 고정된 자세를 유지해야함,
(b) 상체의 움직임이 자유로워 편안한 자세를 취할 수 있음.

표 1. HMD 성능 비교표

모델명	VIVE Pro Eye	VIVE	Oculus
해상도*	2,880×1,660	2,160×1,200	2,160×1,200
Pixels per inch**	615	448	461
부가 기능	Augmented reality 기능 (Dual 카메라) / 시선 추적 센서	Augmented reality 기능 (Mono 카메라)	–

*단위: Pixels **단위: Pixels per inch

본 연구에서 구성한 시스템의 Software flowchart는 그림 6과 같으며 상세히 설명하면 다음과 같다. 우선, HMD의 내·외부 센서 및 인터페이스에서 획득한 움직임과 명령을 Windows PC에 전달하고 사용자에게 송출할 영상을 HMD로 전송한다. 이를 위해 HMD와 Windows PC를 연결하는 Steam VR (Valve Corp., Bellevue, WA, USA)이 필수적이다. Steam VR은 동 사가 배포하는 OpenVR SDK 기반의 플랫폼으로 HMD와 PC의 통신을 중개하며 PC에서 HMD의 하드웨어 구성 요소에 접근하고 제어할 수 있도록 Application programming interface (API)를 제공한다. Steam VR에서 중개하는 데이터는 API를 활용하여 Unity에서 접근할 수 있으며 Unity에서 구현된 가상 공간의 영상이 HMD로 전송되고 동시에 현실 세계에서 HMD에 주어진 동작이나 명령이 가상 공간 상에 구현된 HMD 모델에도 동일하게 적용된다 (그림 7).

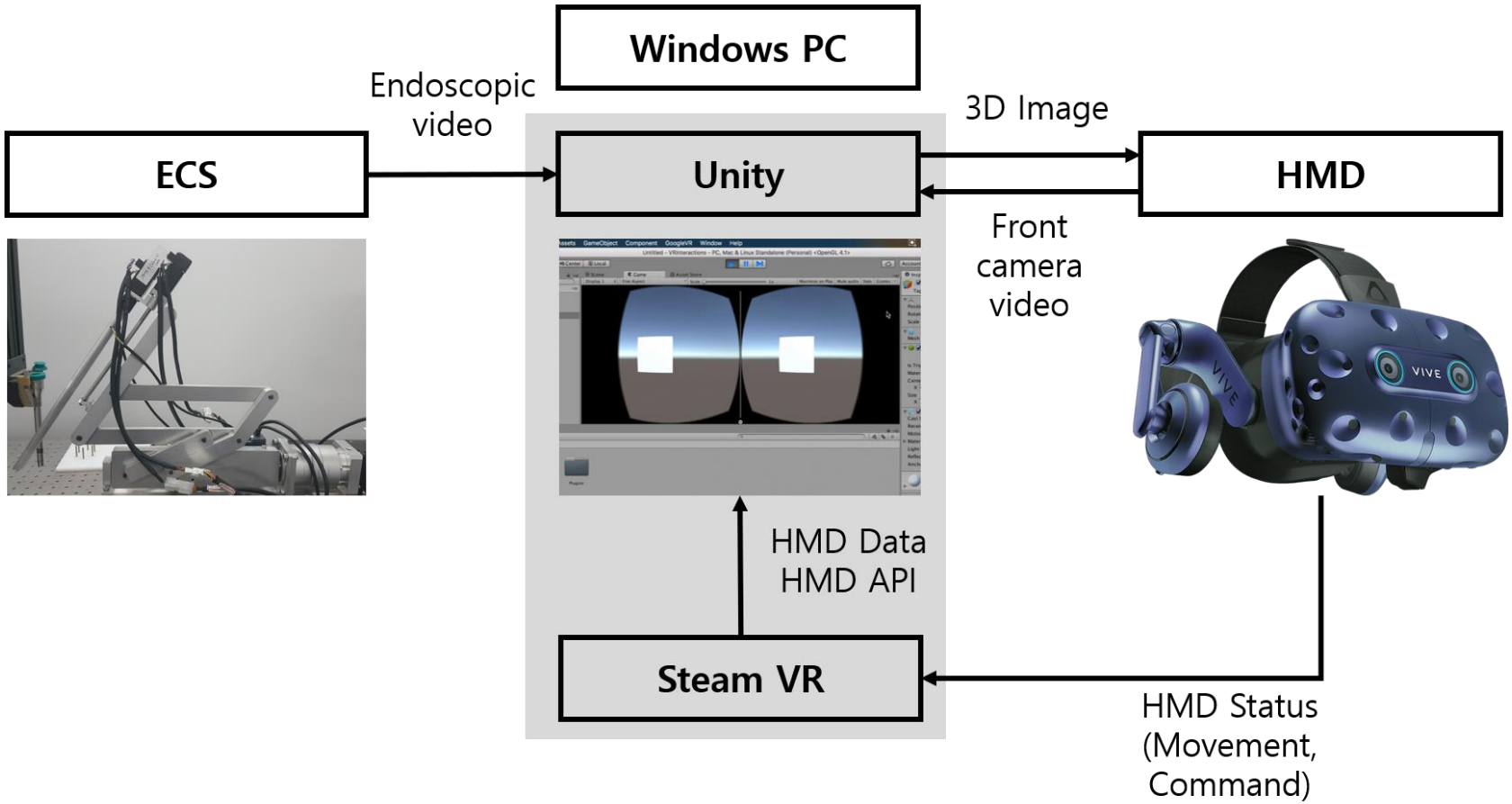


그림 6. 구성한 시스템의 Software flowchart

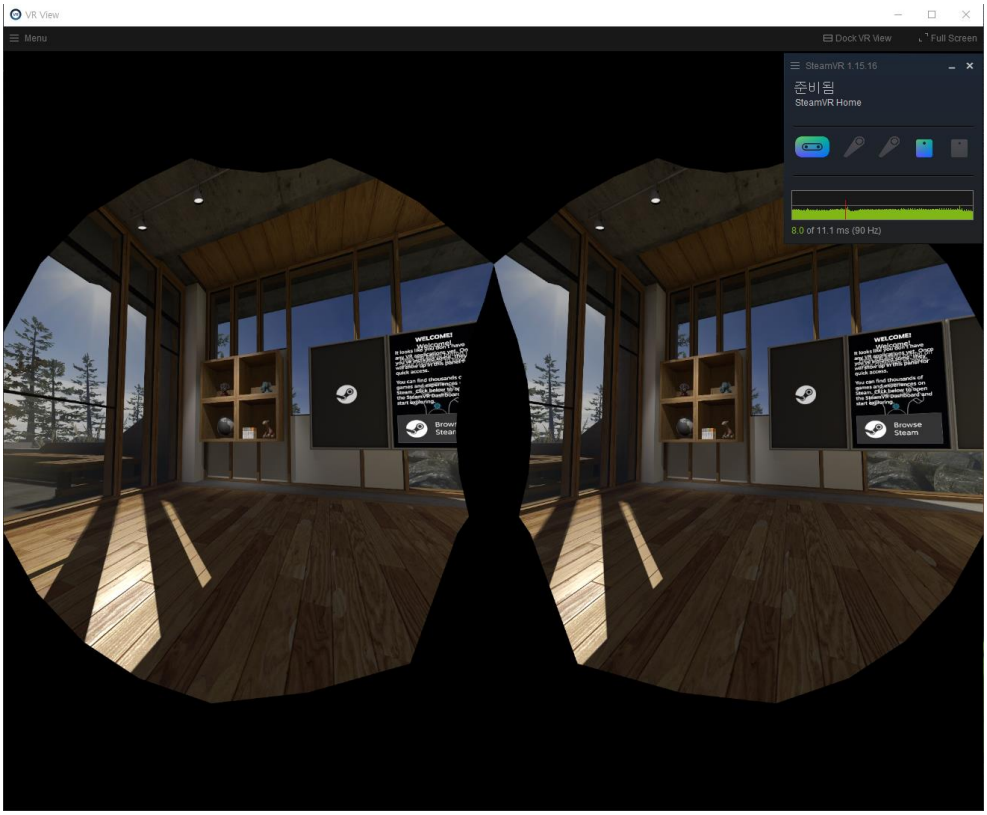


그림 7. Steam VR의 구동 화면 및 HMD 내부에 구현된 가상 환경

이후, ECS에서 촬영한 영상을 3D 입체 영상으로 변환하는 과정은 Unity 내 가상 공간에서 수행된다. 가상 공간에 2개의 영상 평면을 설정하고 촬영된 2D 영상을 각각 투영하여 HMD의 좌우 측 화면에 해당하는 2개의 카메라에 각각 하나의 평면만이 나타나도록 레이어를 설정한다 (그림 8). 즉 사용자는 왼쪽 눈과 오른쪽 눈으로 각기 다른 영상을 봄으로써 HMD에서 송출되는 영상을 3D 영상으로 인지할 수 있게 된다. 하지만, ECS가 촬영한 두 2D 영상은 깊이감이 제거되어 있으므로 사용자가 실제로 3D 영상으로 느끼기 위해서는 Epipolar geometry에 따라 두 영상 평면의 위치 관계를 가상 공간의 두 카메라 간의 위치 관계와 일치시켜야 한다. 이러한 과정은 주로 OpenCV와 같은 컴퓨터 비전 라이브러리를 통해 기계적으로 구현되나 C# 언어를 기반으로 동작하는 Unity에서는 C++ 언어 기반의 OpenCV 라이브러리를 적용할 수 없어 가상 공간에서 두 영상 평면의 위치를 직접 조정하였다 (그림 9).

또한, HMD의 화면이 눈 앞에 고정되면 동시에 외부 시야가 차단되므로 착용자가 외부를 볼 수 없어 Hand-eye coordination에 지장을 끼쳐 수술 로봇 제어에 방해 요인이 될 수 있다. 따라서, HMD의 영상 Source를 ECS의 카메라에서 HMD 전면에 위치한 한 쌍의 카메라로 변경하는 기능을 추가하여 수술 로봇을 제어하는 중에 사용자가 HMD를 벗지 않고도 외부 상황을 인지할 수 있도록 했다 (그림 10, 11).

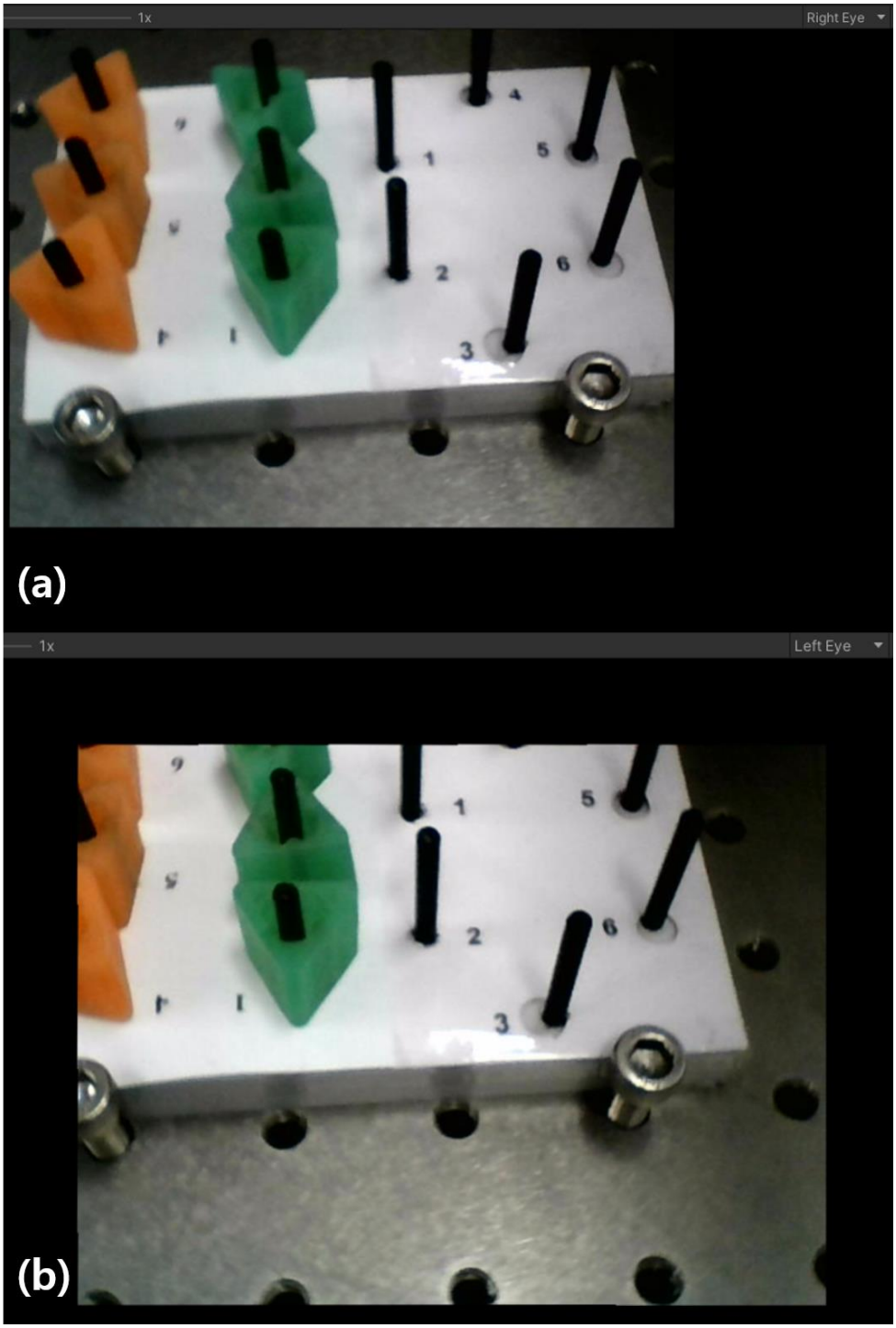


그림 8. 가상 공간에 투영되는 영상 평면: (a) 우안을 담당하는 우측 카메라에 표현되는 영상, (b) 좌안을 담당하는 좌측 카메라에 표현되는 영상

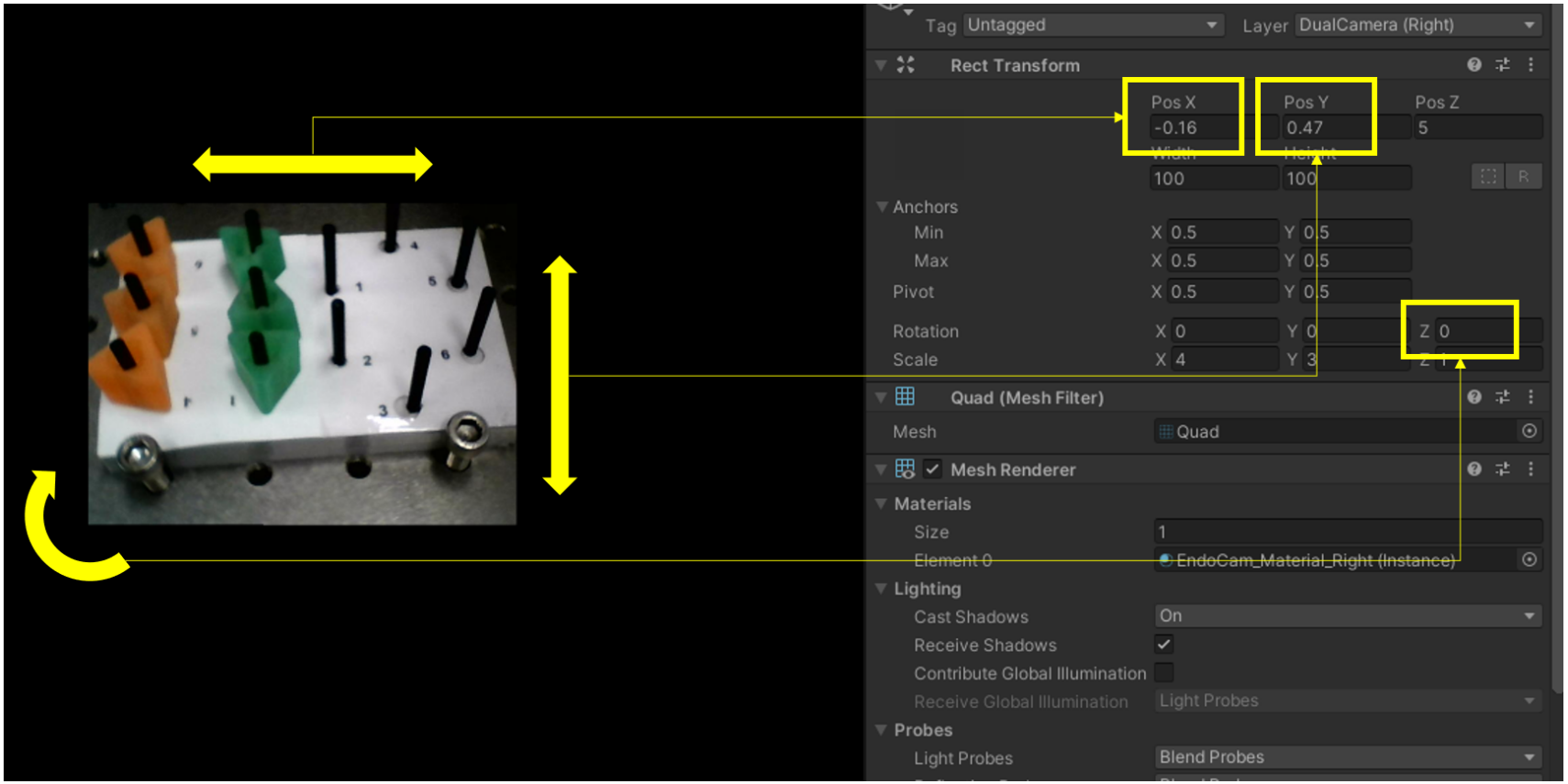


그림 9. 영상 평면 수동 조정 방향 및 Unity 내부 변수

```
1   using System;
2   using System.Collections;
3   using System.Collections.Generic;
4   using UnityEngine;
5
6   public class EndoCam_Script_Manual : MonoBehaviour
7   {
8       public WebCamTexture endoCamTexture;
9       public enum CamIndex { Left, Right };
10      public CamIndex EndoCamSource;
11      public bool EndoCamON = false;
12      public bool CamCrossed = false;
13      public GameObject FrontCameraObj; // 전면 카메라 GameObject가 할당될 전역 변수
14      public string[] Connected_Camera_devices_Arr;
15
16      public void Update()
17      {
18          if (Input.GetKeyDown(KeyCode.Space)) EndoCamON = !EndoCamON;
19          switch (EndoCamON)
20          {
21              case true:
22                  GetComponent<Renderer>().enabled = true;    //Debug.Log("EndoCam
                    ON!");
23                  FrontCameraObj.GetComponent<Renderer>().enabled = false; // EndoCam이
                    On 되면서 전면 카메라는 Off 되도록 함
24                  break;
25              default:
26                  GetComponent<Renderer>().enabled = false;   //Debug.Log("EndoCam
                    OFF!");
27                  FrontCameraObj.GetComponent<Renderer>().enabled = true; // EndoCam이
                    On 되면서 전면 카메라는 Off 되도록 함
28                  break;
29          } // EndoCam 및 전면 카메라 Toggle - Space 로 동작
30
31          if(Input.GetKeyDown(KeyCode.C)) endoCamTexture.Stop(); // 영상 좌우 Switching
            전에 스트리밍을 멈춰놓아야함
32
33          if (Input.GetKeyDown(KeyCode.Return)) CamCrossed = !CamCrossed; // 영상 좌우
            Switching
34          switch(CamCrossed)
35          {
36              case true:
37                  switch ((int)EndoCamSource)
38                  {
39                      case 0: // 좌측으로 표기된 영상을 우측 화면에 표기하여 교정
40                          EndoCamSource = CamIndex.Right;
41                          break;
42                      case 1: // 우측으로 표기된 영상을 좌측 화면에 표기하여 교정
43                          EndoCamSource = CamIndex.Left;
44                          break;
45                      default:
46                          break;
47                  }
48                  EndoCamTextureRender((int)EndoCamSource,
                    Connected_Camera_devices_Arr);
49                  CamCrossed = !CamCrossed;
50                  break;
51              case false:
52                  break;
53          }
54      }
55
56      void Start()
57      {
58          endoCamTexture = new WebCamTexture();
59          WebCamDevice[] Connected_Camera_devices = WebCamTexture.devices;
60
61          Connected_Camera_devices_Arr = new string[Connected_Camera_devices.Length];
62          string Camera_devices_name_temp;
63
64          for (int i = 0; i < Connected_Camera_devices.Length; i++)
65          {
66              Connected_Camera_devices_Arr[i] = Connected_Camera_devices[i].name;
```

그림 10. 영상 Source 전환 기능을 구현한 C# Code – 1

```
67          } // 자료형 WebCamDevice[]은 Read only 이므로 아래 카메라 이름 순서 변경을 위해서 별도의 배열로 옮김
68
69          int VR_Device_index = Array.IndexOf(Connected_Camera_devices_Arr, "VIVE Pro
            Multimedia Camera");
70          // 카메라 배열 중 VR의 순서를 탐색함
71
72          switch (VR_Device_index)
73          {
74              case -1:
75              case 0:
76                  break;
77              case 1:
78                  Camera_devices_name_temp = Connected_Camera_devices_Arr[0];
79                  Connected_Camera_devices_Arr[0] = Connected_Camera_devices_Arr[1];
80                  Connected_Camera_devices_Arr[1] = Camera_devices_name_temp;
81                  break;
82              case 2:
83                  Camera_devices_name_temp = Connected_Camera_devices_Arr[0];
84                  Connected_Camera_devices_Arr[0] = Connected_Camera_devices_Arr[2];
85                  Connected_Camera_devices_Arr[2] = Camera_devices_name_temp;
86                  break;
87              default:
88                  Debug.Log("NO VR CAMERA FOUND! App Crash!");
89                  Debug.Break(); // VR 카메라를 찾지 못할 경우 정지 시킴
90                  break;
91          } // 카메라 이름 배열에서 Vive Pro 순서를 첫번째(0번)로 변경함.
92
93          for (int i = 0; i < Connected_Camera_devices_Arr.Length; i++)
94              Debug.Log(Connected_Camera_devices_Arr[i] + " // Camera number : " + i);
95          // 연결된 Camera 장비의 목록을 나타냄. 현재 VR 세팅에서는 Vive Pro, Teslong Cam 2개 총 3개
            인식되어 Console에 나옴.
96
97          EndoCamTextureRender((int)EndoCamSource, Connected_Camera_devices_Arr);
98      }
99
100     public void EndoCamTextureRender(int CamSource, string[] CamDeviceArray)
101     {
102         switch (CamSource)
103         {
104             case 0: // 0은 CamIndex.Left
105                 endoCamTexture.deviceName = CamDeviceArray[1];
106                 // 위 Switch문에서 배열 순서를 정리했으므로 카메라 선택쪽에서 1, 2로 고정해도 세팅별 영향 없음
107                 Debug.Log("Left Cam ON : " + endoCamTexture.deviceName + "\n");
108                 GetComponent<Renderer>().material.mainTexture = endoCamTexture; //
                    Material에 텍스쳐를 뿌려줌.
109                 FrontCameraObj = GameObject.Find("ImagePlane (left)"); // 전면 카메라
                    Plane의 Toggle을 위해 GameObject 할당
110                 break;
111             case 1: // 1은 CamIndex.Right
112                 endoCamTexture.deviceName = CamDeviceArray[2];
113                 Debug.Log("Right Cam ON : " + endoCamTexture.deviceName + "\n");
114                 GetComponent<Renderer>().material.mainTexture = endoCamTexture; //
                    Material에 텍스쳐를 뿌려줌.
115                 FrontCameraObj = GameObject.Find("ImagePlane (right)");
116                 break;
117         } // EndoCam이 좌, 우 어느것으로 설정했느냐에 따라 텍스쳐 및 GameObject를 할당하는 부분.
118
119         endoCamTexture.Play();
120     }
121 }
122
```

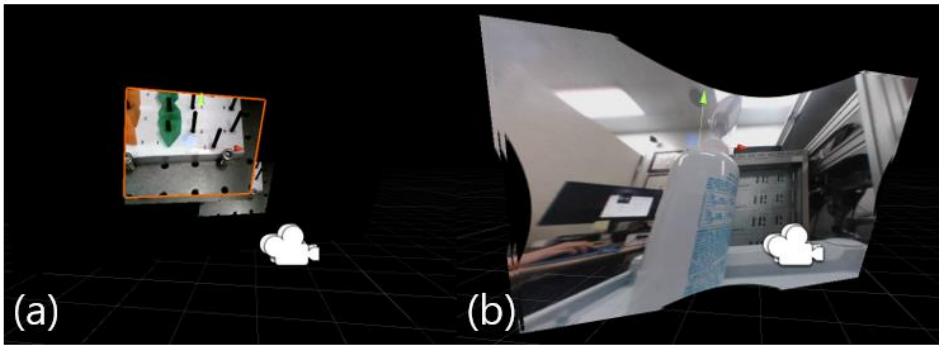
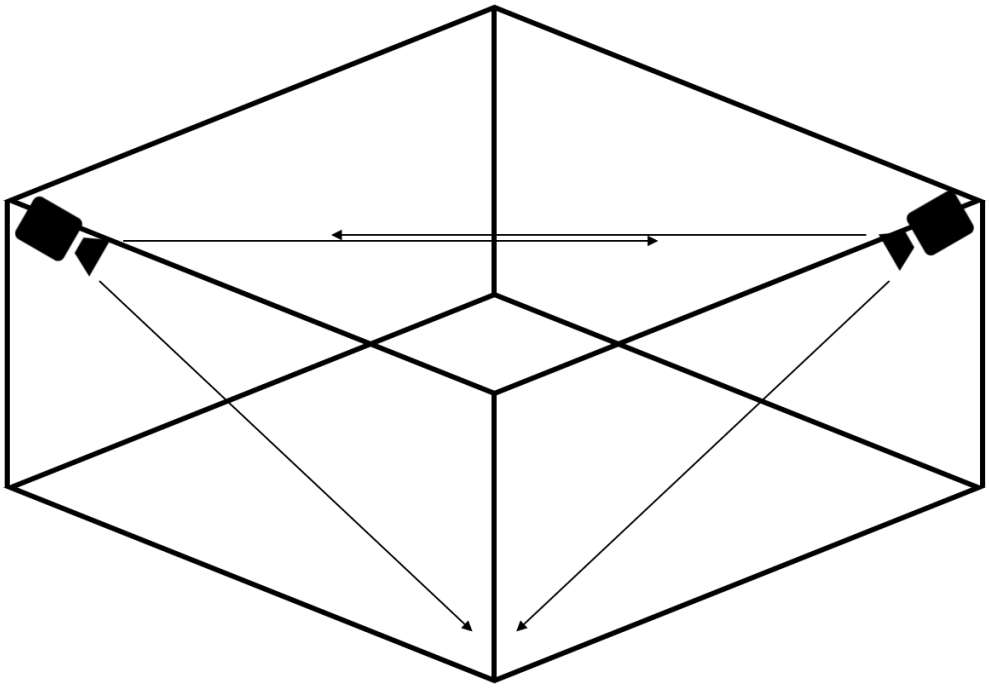


그림 11. 영상 Source 전환 기능을 구현한 C# Code – 2,
영상 전환 예시: (a) 내시경 영상, (b) HMD 전면 카메라 영상

한편, HMD는 외부 센서에서 기기의 위치를 실시간으로 감지할 수 있어야 정상적으로 동작하므로 외부 센서의 배치가 적절히 고려되어야 했다. 본래 HMD의 센서는 기기를 사용하는 영역을 직육면체로 두고 직육면체의 상단에 대각선 방향으로 센서끼리 마주보도록 설치할 것을 권하는데, 본 연구에서 사용하는 시스템의 구성 상 센서의 신호가 구조물에 가리워 통신에 방해를 받을 수 있어 제조사에서 권장하는 방식을 따르기에 어려움이 있었다. 따라서 외부 센서의 위치를 임의로 변경하였으며 사용자가 수술 로봇을 조작할 때 MTM와 Foot pedal을 마주 보는 위치에 앉으며 영상 Source를 HMD 전면의 카메라로 전환하여 MTM과 Foot pedal을 볼 때에도 문제가 없어야 하는 점을 감안하여 두 센서를 각각 Stereo viewer 상단과 Foot pedal 후면에 위치시켜 사용자가 앉은 위치에서 아래를 바라보아도 신호 두절 없이 원활하게 HMD를 사용할 수 있도록 했다 (그림 12).



(a)

(b)

그림 12. HMD의 센서 배치:
(a) 제조사에서 권장하는 센서 배치도,
(b) 평가 환경에 맞추어 배치한 센서의 위치;
좌 – Stereo viewer 상단, 우 – Foot pedal 후면

제 2 절 사용자 평가 설계

수술 로봇 시스템은 환자의 생명과 직결되는 의료기기로서 특히 시각적 피드백의 중요성을 앞서 언급하였다. 즉, 이미 널리 보급되어 성능이 입증된 기존 Stereo viewer를 HMD로 대체하여도 수술 로봇의 성능과 운용에 문제가 없는지 여부를 확실히 판단하는 것이 매우 중요한데 이를 위해서는 타당한 수준의 평가 도구를 활용한 사용자 평가가 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 앞서 구현한 HMD를 활용한 수술 로봇 시스템에 대해 구성의 변경이 미치는 영향을 검증하고자 이를 설계하였다.

사용자 평가는 정량적인 평가와 정성적인 평가로 구성되며 평가의 타당성을 확보하기 위하여 이전의 연구 또는 타 분야에서 유효성이 입증된 평가 도구를 결정하였다. 정량적인 평가 도구로는 집도의의 MIS 또는 수술 로봇 숙련도의 평가에 활용되는 Peg transfer task를 제안한다. Peg transfer task는 Fundamentals of Laparoscopy Surgery (FLS)에서 고안한 평가 기법 중 하나로 의사가 수술 기구를 얼마나 능숙하게 다루는지를 확인한다 [25]. 총 12개의 Peg가 좌우측에 6개씩 나뉘어 설치된 판에 고무와 같이 신축성이 있는 6개의 삼각형 고리를 6개의 Peg에 나누어 꽂은 채로 시작하여 맞은편의 Peg로 옮기는 작업을 수행토록 하여 소요되는 시간을 측정한다. 평가의 시작과 완료 시점에 관해서는 가능한 동일한 기준에서 task를 수행하도록 참가자가 기구를 board 중앙에 위치시키고 준비를 마치면 참가자에게 시작 신호를 보내고 마지막 고리가 원 위치로 옮겨져 board에 닿는 시점에 시간 측정을 멈추었으며 부수적인 조건으로는 평가를 진행하는 동안 Peg board를 촬영하는 내시경이 board 전체를 시야 안에 담을 것과

고리를 옮길 때, 두 End-effector를 모두 활용하도록 한쪽 End-effector로 들어올린 고리를 공중에서 반대쪽 End-effector로 옮긴 뒤 목표한 Peg에 내려놓을 것을 요구한다.

정성적인 평가 도구로는 NASA-Task Load Index(NASA-TLX)를 선택하였다. NASA-TLX는 NASA Ames research center에서 개발한 작업 부하 평가로서 평가자가 수행한 작업의 난이도를 6가지 항목에서 0점에서 100점 범위로 채점하는데, 작업이 어렵다고 느껴진 만큼 높은 점수를 매기도록 되어있다 (그림 13). 6가지 평가 항목은 Mental demand, physical demand, temporal demand, performance, effort, and frustration으로 각 항목에 대한 상세한 설명은 아래 표 2에 서술하였다. 평가지를 다 작성한 뒤에는 6개의 항목 중 2개 항목을 뽑아 비교하여 항목별 가중치를 추가적으로 추려내어 평가하고자 하는 작업이 특히 어느 영역에서 어려움을 느끼는지 확인하는 과정을 거치기도 한다 [26].

이후, 설정된 평가 도구를 활용하여 평가를 진행하게 될 평가군을 모집할 때는 평가자의 숙련 여부에 초점을 두고자 한다. 앞서 진행한 두 연구는 수술 로봇에 익숙하지 않은 일반인을 대상으로 진행하였으며 이로 인한 결과는 일반적인 수술 로봇의 성능이나 연구의 결과를 대변할 수는 있으나 실제 수술 로봇을 주로 활용하게 될 집도의에게 미치는 영향을 나타낸다고 보기는 어렵다. 따라서 평가군을 크게 로봇 수술을 실제로 수행하는 집도의 (숙련자)와 수술 로봇을 접해보지 못한 일반인 (비숙련자)로 나누어 수술 로봇의 일반적인 성능 또는 반복에 따른 학습 수준을 확인하는 한편, 숙련자가 다룰 때에도 성능의 차이가 유의미한지 또는 체감 성능의 향상이 있는지 여부를 확인하고자 한다. 특히 수술 로봇은 다른 범용 로봇과 달리 환자의 생명과 직결되므로 집도의의 의견이 더 강조될 필요가 있을 것이다. 또한, 숙련 여부에 따라 앞서

제시한 두 평가 도구를 적절히 변경하여 유연하게 평가를 진행하는 것도 고려해 볼 수 있을 것이다.

NASA Task Load Index

Hart and Staveland's NASA Task Load Index (TLX) method assesses work load on five 7-point scales. Increments of high, medium and low estimates for each point result in 21 gradations on the scales.

Name	Task	Date

Mental Demand — How mentally demanding was the task?

Very Low — Very High

Physical Demand — How physically demanding was the task?

Very Low — Very High

Temporal Demand — How hurried or rushed was the pace of the task?

Very Low — Very High

Performance — How successful were you in accomplishing what you were asked to do?

Perfect — Failure

Effort — How hard did you have to work to accomplish your level of performance?

Very Low — Very High

Frustration — How insecure, discouraged, irritated, stressed, and annoyed wereyou?

Very Low — Very High

그림 13. NASA-TLX 평가지 예시 [27]

표 2. NASA-TLX의 6개 평가 항목 설명

평가 항목	원 질문	상세 설명
Mental demand	How mentally demanding was the task?	작업 중 정신적인 능력(사고, 판단, 집중 등)이 얼마나 요구되는지
Physical demand	How physically demanding was the task?	작업 중 신체 능력(하중, 정밀도 등)이 얼마나 요구되는지
Temporal demand	How hurried or rushed was the pace of the task?	작업 중 시간적인 압박이 있었는지
Performance	How successful were you in accomplishment what you were asked to do?	작업 목표를 얼마나 충족했는지
Effort	How hard did you have to work to accomplish your level of performance?	일정 수준의 작업 결과를 이루기 위해 많은 노력이 필요했는지
Frustration	How insecure, discouraged, irritated, stressed, and annoyed were you?	작업 중 짜증, 좌절 등의 감정이 유발되었는지

제 3 장 결과 및 분석

제 1 절 시스템 구성 결과

앞선 설명한 과정을 통해 HMD를 수술 로봇 시스템에 적용하였으며 그 결과를 Stereo viewer를 사용하는 기존 시스템과 비교하면 다음과 같다 (그림 14). 두 영상 모두 좌안과 우안의 영상을 구별하여 3D 입체 영상을 제공하며 Stereo viewer의 영상이 더 크게 보이는 이유는 Stereo viewer의 해상도 (640×480)가 낮아 출력되는 영상을 Mirroring하는 고해상도 모니터 (1,920×1,080)에서는 각 평면이 상대적으로 크게 나타나기 때문이다. 또한, 장비 간의 초점거리 차이에 따라 좌 우 영상의 간격이 다르게 보이나 착용 시, 두 영상이 적절히 겹쳐 3D로 보이는 최적의 거리에 영상 평면이 위치하므로 실제로 착용 시에는 간격의 차이가 체감되지 않았다.

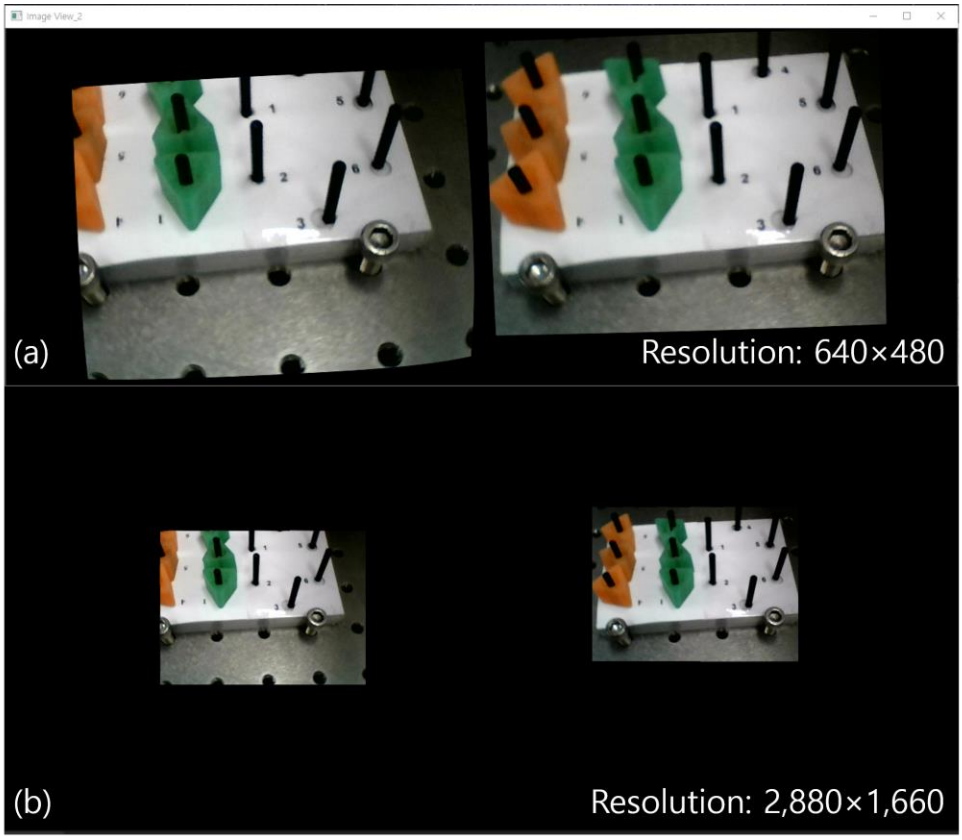


그림 14. Stereo viewer와 HMD에 표시되는 화면의 비교:
(a) Stereo viewer, (b) HMD

제 2 절 사용자 평가 방법

위 2장에서 제시한 점을 토대로 설계한 사용자 평가 방법을 도시하면 다음과 같다 (그림 15). 본 평가는 비숙련자(일반인)와 숙련자(집도의) 두 군이 각각 Stereo viewer와 HMD가 적용된 수술 로봇 시스템을 조작하였을 때 작업 수행 시간으로 나타나는 장비의 정량적인 성능이 어떠한지 그리고 주관적으로 표현하기 쉬운 장비의 정성적인 성능을 평가 도구를 통해 객관화하여 HMD가 Stereo viewer에 비해 성능상으로 우위에 있거나 또는 비열등성이 보장됨을 확인하는 것을 목표로 한다. 두 장비를 번갈아 사용하며 평가를 진행하므로 2장에서 구현한 시스템에 Stereo viewer를 추가하여 아래와 같은 시스템이 평가에 활용될 것이다 (그림 16).

더불어, HMD를 활용한 3D 구현에 있어 좌우 두 영상 평면의 Epipolar geometry를 수동으로 직접 조작하였으므로 이를 개인차에 맞추어 조정하는 Stereo calibration 과정을 추가하였다. 조정 과정은 좌안과 우안에 보이는 영상이 다르므로 주시안의 결정과 이를 기준으로 영상 평면의 위치를 조정하는 두 단계로 나뉘며 상세 내용은 다음과 같다. 우선, 참가자가 양안을 뜬 상태에서 멀리 있는 물체를 바라보고 엄지와 검지 손가락을 모아 원을 그려 해당 물체를 원 안에 둔다. 이후, 좌안과 우안을 번갈아 감았다 뜨며 어느 눈을 떴을 때 해당 물체가 원 안에 존재하는 지로 주시안을 판단한다. 주시안을 확인한 뒤에는 해당 방향의 영상 평면만을 송출한 상태로 평가자가 HMD를 착용하여 해당 평면을 기준으로 다른 평면의 위치를 조정함을 안내하고 다른 평면을 송출 및 위치를 보정하였다. 이를 통해 두 영상 평면이 동시에 송출되어도 평가자가 주시안을 기준으로 HMD 사용시 영상의 어긋남이

최소화되는 위치를 결정할 수 있도록 한다.

평가 과정을 단계별로 보면, 평가자에게 연구와 평가 과정을 상세히 설명하고 Stereo calibration 과정과 장비의 작동 방법을 숙지할 충분한 연습 시간을 주어 이후 작업 수행에 어려움이 없도록 한다. 이후, Stereo viewer와 HMD 두 장비를 번갈아 사용하며 Peg transfer task를 수행하고 이에 소요된 시간을 측정한다. 정량적인 평가는 총 2회 진행하며 회차 간에 적절히 휴식 시간을 보장하여 이전 회차로 인한 영향을 최소화해야 하겠다. 단, 장비의 사용 순서가 일정하면 (HMD – Stereo viewer – HMD – Stereo viewer) 무작위성의 결여로 인해 학습 효과가 유발될 우려가 있는데 이는 한 평가 군 내에서 장비의 사용 순서를 달리한 결과를 수집하여 분석하면 장비의 사용 순서가 미칠 오류를 배제할 수 있을 것으로 사료된다. 더불어 장비의 사용 순서를 바꾸어 평가를 진행하여도 주어진 작업을 반복하면 평가자가 이에 익숙해짐에 따라 학습효과로 인해 결과가 불확실해질 가능성이 있다. 따라서, 일정의 휴식 기간을 두고 평가군의 순서를 바꾸어 교차 평가를 진행하면 2회차로 진행하는 평가로 인한 학습 효과를 더욱 확실히 배제할 수 있을 것이다.

정량적 평가가 종료되면 평가 수행 경험을 토대로 정성적 평가를 진행하여 작업의 부하를 조사함으로써 두 장비의 상대적인 작업 부하를 비교할 것이다.

추가적으로, 평가 군이 비숙련자와 숙련자를 모두 아우르므로 숙련 여부에 따라 작업의 난이도가 너무 어려워 수행하기 적합하지 않거나 익숙하지 않은 평가 도구로 인해 결과에 비의도적인 영향이 미칠 것에 대해 평가 도구의 간소화가 필요하다고 판단하였다. 따라서, 정량·정성적 평가 도구를 모두 다음과 같이 변경하여 보았다. Peg transfer task는 FLS Program에서 제시하는 평가 환경 및 과정은

동일하게 유지하되 옮겨야 할 고리의 개수를 6개에서 3개로 줄이고 이에 맞추어 Peg board의 12개 Peg 중 한 쪽 6개 만을 활용하도록 간소화하였다 (그림 17). 본래 평가에서 목표치로 요구하는 Dead line도 절반으로 낮추어 비숙련자도 신속히 작업에 적응하게 돕는 한 편, 평가 기법의 훼손을 최소화하여 객관성을 제고하고자 하였다. NASA-TLX의 경우, 두 장비의 작업 부하를 각각 채점하면 서로를 비교하는 기준이 모호하고 개인이 느끼는 어려움의 정도가 상이하므로 두 장비의 성능을 비교하는 본 연구에서는 명확한 결과를 보이기 어렵다고 판단하였다. 그러므로 기존 수술 로봇 시스템에 적용된 Stereo viewer를 기준점 (3.5점)으로 삼고 HMD를 사용할 때 체감한 작업 부하를 비교하는 방식으로 채점 방식을 수정하여 Modified NASA-TLX라 명명하고 0점에서 100점 범위의 채점 기준을 6단계로 나누어 상대적인 작업 부하의 차이를 명료화하여 비교하고자 했다 (그림 18).

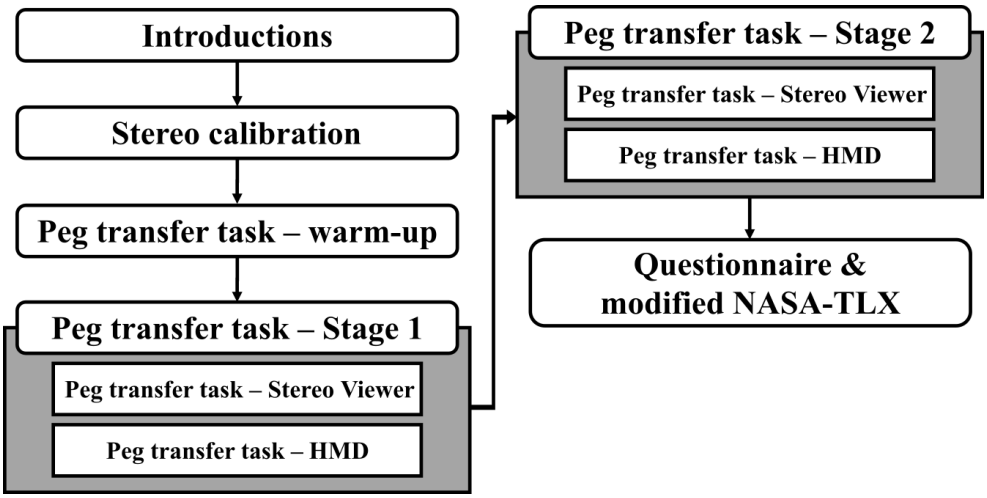
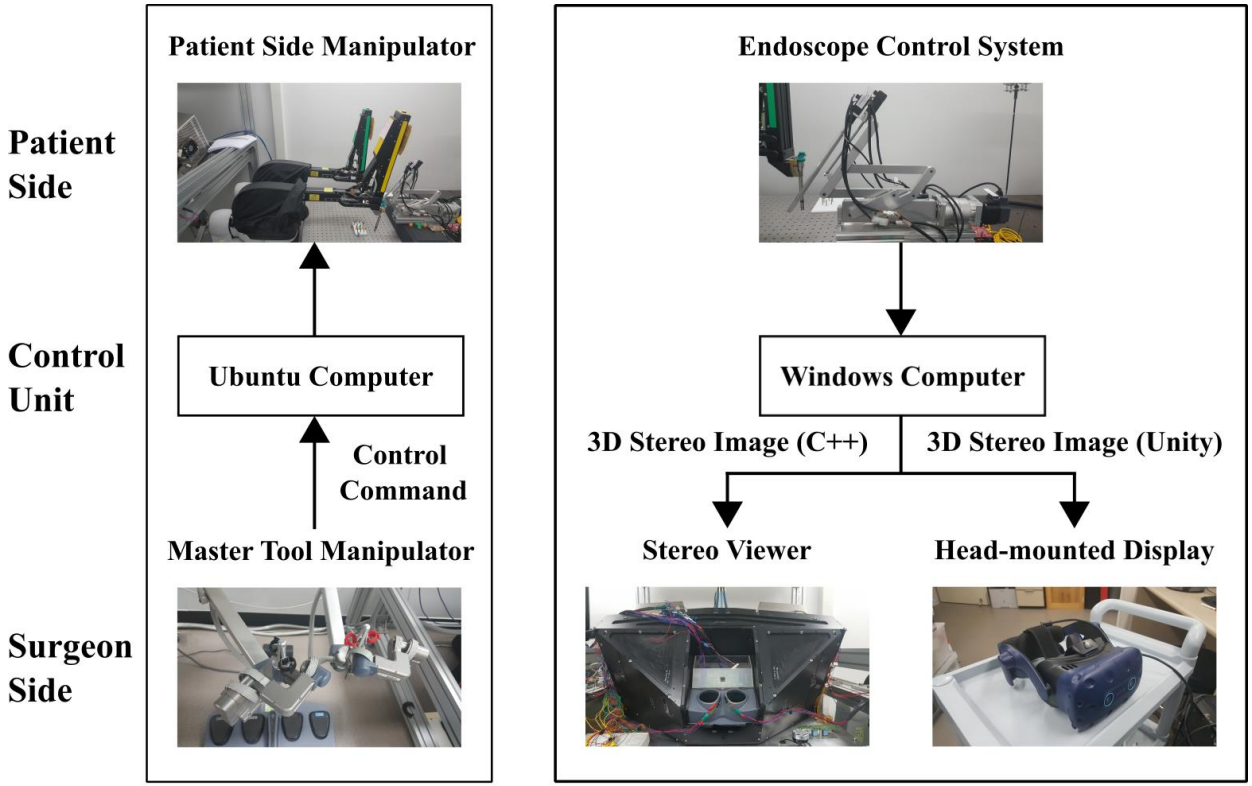
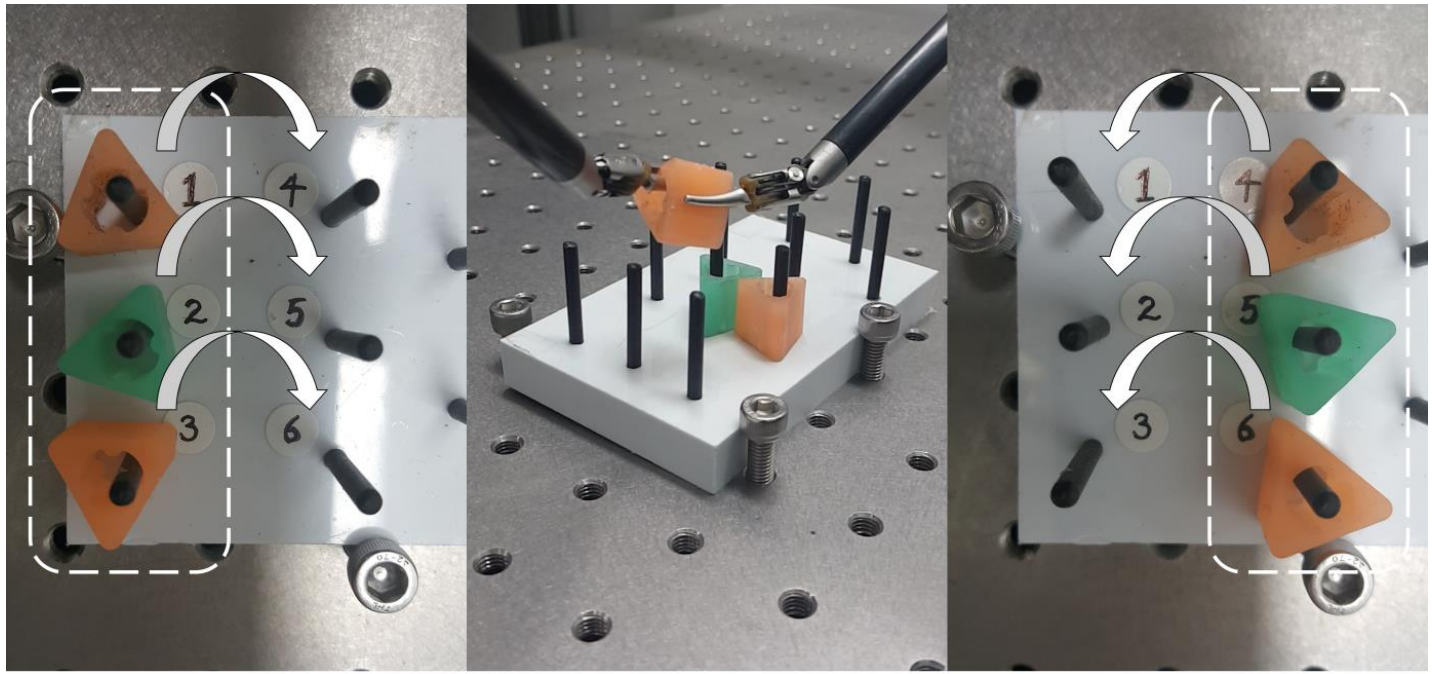

Introductions
Stereo calibration
Peg transfer task – warm-up
Peg transfer task – Stage 1
Peg transfer task – Stereo Viewer
Peg transfer task – HMD
Peg transfer task – Stage 2
Peg transfer task – Stereo Viewer
Peg transfer task – HMD
Questionnaire &
modified NASA-TLX

그림 15. 평가 과정



(a) (b)

그림 16. 평가에 사용될 시스템의 구성도: (a) 수술 로봇 조작부, (b) 내시경 영상 송출부



(a) (b) (c)

그림 17. Peg transfer task 수행 과정: (a) 고리를 맞은편으로 옮김, (b) 맞은편 수술 기구로 고리를 넘김, (c) 고리를 원위치로 되돌림

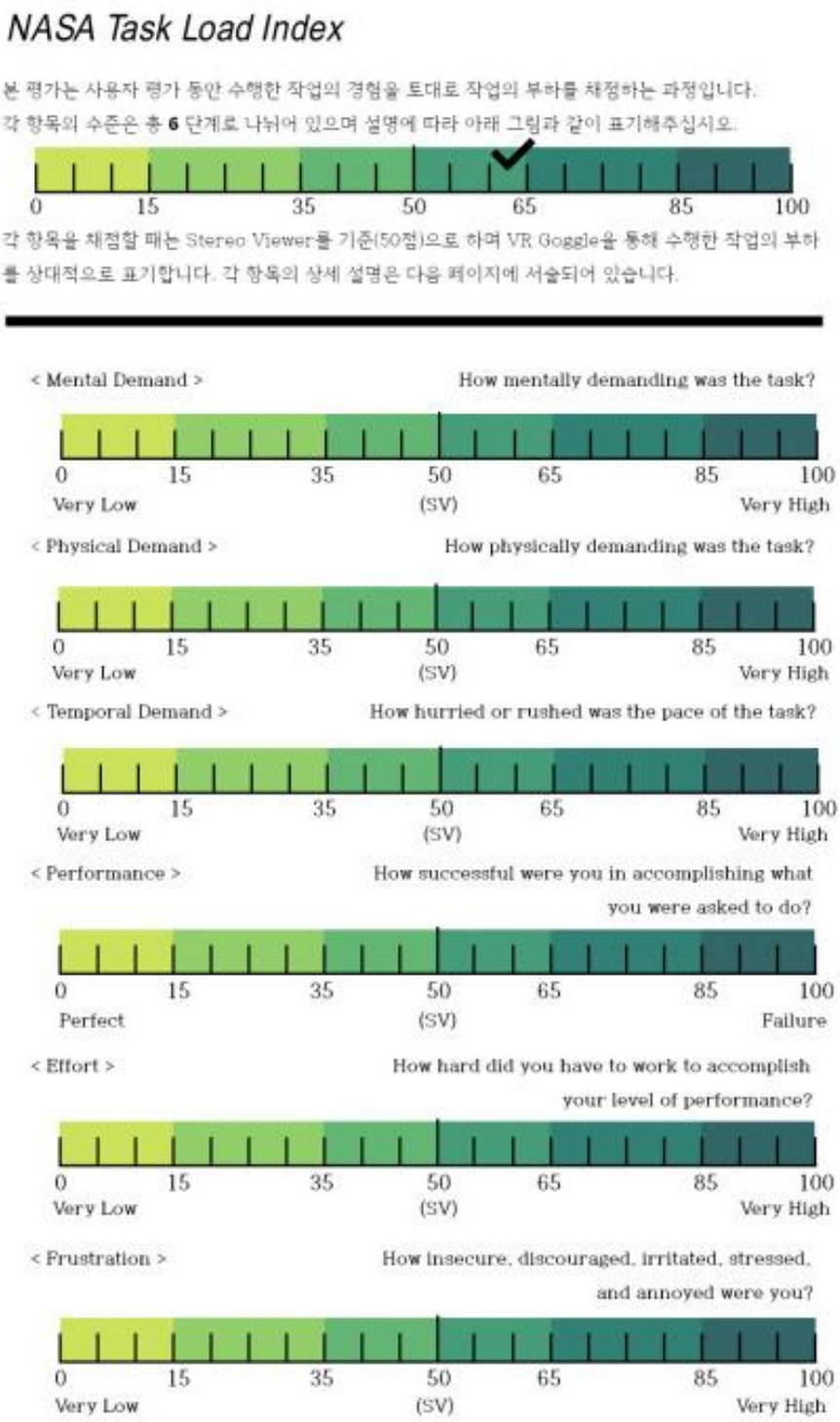


그림 18. Modified NASA-TLX 평가지 예시

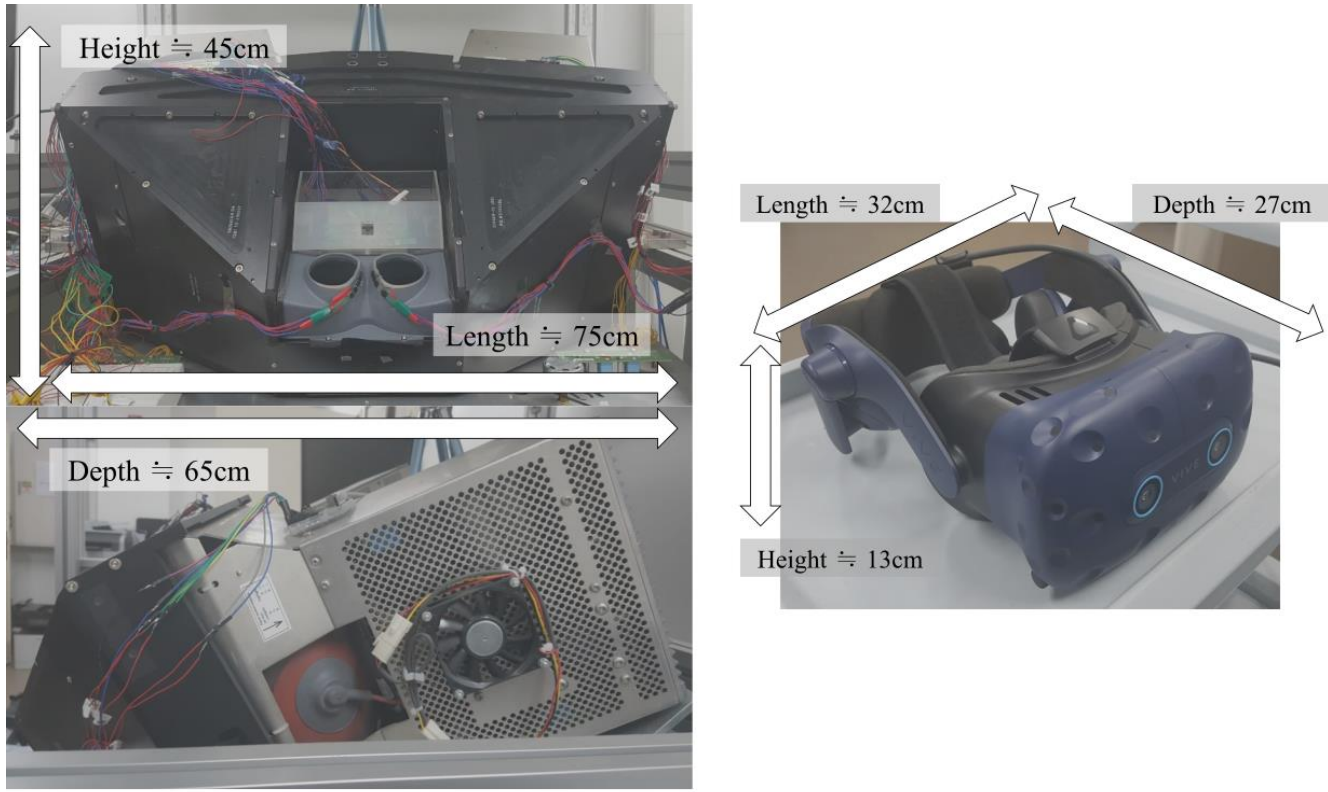
제 4 장 결 론

본 연구는 Stereo viewer의 구조적 단점으로 유발되는 근골격계 질환 등 부작용을 해소하고자 HMD를 대안으로서 제시하고 HMD가 적용된 시스템을 구현 및 해당 시스템의 사용성 검증을 위한 정량·정성적 측면에서 사용자 평가를 제시하였다. HMD는 Stereo viewer와 달리 사용자가 상체를 자유로이 움직일 수 있으며 신체적인 부담을 주는 자세를 오래 유지할 필요가 없어 수술 로봇 시스템의 인체공학적 향상을 이끌어 낼 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 영향은 본 연구에서 제안한 사용자 평가를 진행하여 검증할 수 있을 것이며 해당 결과에서 수술 로봇 시스템의 성능 유지 여부 및 예상하지 못한 문제점 등을 파악하여 차기 연구 방향을 제시하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

한편, HMD를 수술 로봇 시스템에 적용하면 앞서 확인한 긍정적인 영향과 더불어 Stereo viewer의 용적이 220,000 cm^3에 달하는데 반해 HMD는 5% 수준에 미치는 약 11,000cm^3의 작은 크기를 지녀 수술 로봇 시스템의 부피를 줄일 수 있을뿐더러 (그림 19) 가상 현실 또는 증강 현실 기술의 적용이 간편하므로 3D Overlay 등의 기술 또는 가상 현실 기반의 로봇 수술 교육에도 활용할 수 있을 것이다.

다만, 본 연구는 3D Stereo calibration 과정을 수동으로 진행하여 수학적으로 엄밀하다고 보기 어려우며 시야가 차단되는 HMD의 구조적 단점에서 기인하는 Hand-eye coordination의 저해 같은 문제를 근본적으로 해결하지 못한 한계점이 있다. 따라서, 컴퓨터 비전 라이브러리를 통한 자동화된 3D Stereo calibration의 적용과 가상

환경을 적극 활용하여 주변 환경을 HMD 내부에 표시하거나 충돌 가능성을 경고 하는 등 추가적인 개선이 향후 이뤄져야 하며 차후 제시한 사용자 평가를 통해 HMD가 Stereo viewer를 대체하기에 적합한지 여부를 검증할 필요가 있겠다.



(a) (b)

그림 19. Stereo viewer와 HMD의 용적 비교:
(a) Stereo viewer의 높이, 길이, 그리고 깊이, (b) HMD의 높이, 길이, 그리고 깊이

참고 문헌

[1] A. A. Patel et al., "Minimally invasive versus open lumbar fusion: a comparison of blood loss, surgical complications, and hospital course," *Iowa Orthopedic Journal*, vol. 35, pp. 130–134, 2015

[2] R. P. Kiran, C. P. Delaney, A. J. Senagore, B. L. Millward, and V. W. Fazio, “Operative Blood Loss and Use of Blood Products After Laparoscopic and Conventional Open Colorectal Operations,” *Archives Surgery*, vol. 139, pp. 39–42, Jan. 2004.

[3] R. P. Kiran, G. H. El-Gazzaz, J. D. Vogel, and F. H. Remzi, “Laparoscopic Approach Significantly Reduces Surgical Site Infections after Colorectal Surgery: Data from National Surgical Quality Improvement Program,” *Journal of the American College Surgeons*, vol. 211, no. 2, pp. 232–238, Aug. 2010.

[4] J. E. Varela, S. E. Wilson, and N. T. Nguyen, “Laparoscopic surgery significantly reduces surgical-site infections compared with open surgery,” Surgical Endoscopy, vol. 24, no. 2, pp. 270–276, Feb. 2009.

[5] A. T. Ng and P. C. Tam, “Current status of robot-assisted surgery,” Hong Kong Medical Journal, vol. 20, no. 3, pp. 241–250, Jun. 2014.

[6] F.C. Brunicardi et al. “Minimally Invasive Surgery,” in Schwartz's Principles of Surgery: ABSITE Board Rev., 10e. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2016.

[7] J. Heemskerk, R. Zandbergen, J. G. Maessen, J. W. M. Greve, and N. D. Bouvy, “Advantages of advanced laparoscopic systems,” Surgical. Endoscopy, vol. 20, no. 5, pp. 730–733, Mar. 2006.

[8] J. Kang, K. J. Yoon, B. S. Min, H. Hur, S. H. Baik, N. K. Kim, and K. Y. Lee, “The Impact of Robotic Surgery for Mid and Low Rectal Cancer,” Annals of Surgery, vol. 257, no. 1, pp. 95–101, Jan. 2013.

[9] M. Kitagawa, D. Dokko, A. M. Okamura, and D. D. Yuh, “Effect of sensory substitution on suture-manipulation forces for robotic surgical systems,” The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery, vol. 129, no. 1, pp. 151–158, Jan. 2005.

[10] F. M. Sánchez-Margallo, D. D. Rey, Á. S. Pascual, J. A. Martínez, and J. A. Sánchez-Margallo, “Comparative Study of the Influence of Three-Dimensional Versus Two-Dimensional Urological Laparoscopy on Surgeons' Surgical Performance and Ergonomics: A Systematic Review and Meta-Analysis,” Journal of Endourology, Sep. 2020.

[11] M. M. Lux, M. Marshall, E. Erturk, and J. V. Joseph, “Ergonomic Evaluation and Guidelines for Use of the daVinci Robot System,” Journal of Endourology, vol. 24, no. 3, pp. 371–375, Mar. 2010.

[12] C. D. V. T. Hullenaar, B. Hermans, and I. A. Broeders, “Ergonomic assessment of the da Vinci console in robot-assisted surgery,” Innovative Surgical Sciences, vol. 2, no. 2, pp. 97–104, Apr. 2017.

[13] E. H. Lawson, M. J. Curet, B. R. Sanchez, R. Schuster, and R. Berguer, “Postural ergonomics during robotic and laparoscopic gastric bypass surgery: a pilot project,” Journal of Robotic Surgery, vol. 1, no. 1, pp. 61–67, Feb. 2007.

[14] G. I. Lee, M. R. Lee, I. Green, M. Allaf, and M. R. Marohn, “Surgeons’ physical discomfort and symptoms during robotic surgery: a comprehensive ergonomic survey study,” Surgical Endoscopy, vol. 31, no. 4, pp. 1697–1706, Aug. 2016.

[15] E. Gustafsson, S. Thomée, A. Grimby-Ekman, and M. Hagberg, “Texting on mobile phones and musculoskeletal disorders in young adults: A five-year cohort study,” Applied Ergonomics, vol. 58, pp. 208–214, Jan. 2017.

[16] E. Altobelli, S. Gidaro, A. M. Bove, C. Falavolti, E. Ruiz, M. Stark, and M. Buscarini, “1405 Telelap Alf-X: A Novel Telesurgical System For The 21St Century,” Journal of Urology, vol. 189, no. 4S, Apr. 2013.

[17] T. Johnson, L. Bauler, D. Vos, A. Hifko, P. Garg, M. Ahmed, and M. Raphelson, “Virtual Reality Use for Symptom Management in Palliative Care: A Pilot Study to Assess User Perceptions,” Journal of Palliative Medicine, vol. 23, no. 9, pp. 1233–1238, Aug. 2020.

[18] L. Fauster, “Stereoscopic techniques in computer graphics,” M.S. thesis, TU Wien, 2007.

[19] K. Schwab, R. Smith, V. Brown, M. Whyte, and I. Jourdan, “Evolution of stereoscopic imaging in surgery and recent advances,” World Journal of Gastrointestinal Endoscopy, vol. 9, no. 8, pp. 368–377, Aug. 2017.

[20] Laparoscopic Hand Instruments 001 JPN.jpg. Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laparoscopic_Hand_Instruments_001_JPN.jpg, Accessed Mar. 24, 2021.

[21] Perspectives of Robotic Bariatric Surgery - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/The-similarity-of-the-robotic-grasper-and-the-human-hand-copyright-Intuitive-Surgical_fig3_281377370, Accessed Mar. 24, 2021.

[22] Y. Jo, Y. J. Kim, M. Cho, C. Lee, M. Kim, H.-M. Moon, and S. Kim, “Virtual Reality-based Control of Robotic Endoscope in Laparoscopic Surgery,” International Journal of Control, Automation and Systems, vol. 18, no. 1, pp. 150–162, Nov. 2019.

[23] T. Dardona, S. Eslamian, L. A. Reisner, and A. Pandya, “Remote Presence: Development and Usability Evaluation of a Head-Mounted Display for Camera Control on the da Vinci Surgical System,” Robotics, vol. 8, no. 2, p.

31, Apr. 2019.

[24] M. Kim, C. Lee, N. Hong, Y. J. Kim, and S. Kim, “Development of stereo endoscope system with its innovative master interface for continuous surgical operation,” BioMedical Engineering Online, vol. 16, no. 1, Jun. 2017.

[25] Revised Manual Skills Guidelines February 2014. Available from: https://www.flsprogram.org/wp-content/uploads/2014/03/Revised-Manual-Skills-Guidelines-February-2014.pdf, Accessed Mar. 24, 2021.

[26] S. G. Hart and L. E. Staveland, “Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research,” Advances in Psychology, pp. 139–183, 1988.

[27] NASA TLX Paper and Pencil Version. Available from: https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/tlx/downloads/TLXScale.pdf, Accessed Jul. 25, 2021.

Abstract

Application of head-mounted display to da Vinci Research Kit (dVRK) with its performance evaluation method

Gyeongbin Mun
Interdisciplinary program in bioengineering
The Graduate School
Seoul National University

Robotic surgery has become prevalent because of its various advantages as a progressive method of minimally invasive surgery. However, the stereo viewer of the most widely used da Vinci® surgical robot system requires the surgeon to maintain an uncomfortable posture that increases the risk of musculoskeletal disorders. After other open-console type surgical robot systems with single display were released to the market, it was expected to solve this problem. But they had shortcomings on the quality of visual feedback, such as flickering, ghosting, and crosstalk due to 3D stereo technique using single display. To overcome this problem, we suggested replacing the stereo viewer with a head-mounted display (HMD).

The system suggested in this research was comprised with da Vinci® research kit (dVRK), 4 degree-of-freedom endoscope control system (ECS) and the HMD as a 3D display device. And the system is largely divided into surgical tool control subsystem and

endoscope imaging subsystem. dVRK was a research kit which is converted from the early model of da Vinci® surgical robot system and a master-slave type robot that Patient side manipulator (PSM) were controlled by computers following applied movements on Master tool manipulator (MTM). ECS provided a 3D image to HMD by processing images captured by 2 cameras aligned horizontally on ECS through computer. Meanwhile, HMD is mounted on one's head blocking him/her sight. Therefore, a function of changing a video source between the front of the HMD and the ECS was applied to mitigate this inconvenience. Also, we proposed comparative evaluations, including peg transfer tasks and a modified NASA-Task Load Index (TLX) to determine whether the stereo viewer could be replaced by the HMD and to investigate that the HMD had clear ergonomic advantages.

Suggested system on this study is expected to show better ergonomic performance compared to existing surgical robot system. And we can clarify the effects of replacing the Stereo viewer with the HMD and determine concepts of further research. In addition, a volume of surgical robot system will be decreased increasing a spatial efficiency on the operation room. Additional improvement can be expected by combination with existing features using in HMD, such as wireless controllers or 3D overlay.

Keywords : surgical robot system, dVRK, ergonomic system, head-mounted display

Student Number : 2019-25593

감사의 글

우선 저에게 사랑과 헌신을 아끼지 않으시는 부모님과 가족들에게 감사하다는 말씀을 드리고 싶습니다. 한이 없는 큰 은혜를 다 갚을 수 없겠지만 부족한 여력이나마 보은할 수 있도록 최선을 다하겠습니다.

지난 2년간 넓은 아량으로 부족하기 그지없는 저의 대학원 과정을 세심히 보살펴 주시고 지도해주신 김성완 교수님께 진심으로 감사드립니다. 공학적 지식과 지혜는 물론 사회에서 한 사람으로서 꼭 갖추어야할 덕목을 꼼꼼히 지도해주신 것 마음 깊이 새기고 간직할 수 있도록 하겠습니다. 의학적 관점의 조언과 검토로 많은 도움을 주신 공성호 교수님, 정창욱 교수님 그리고 이규언 교수님께 심심한 감사의 말씀을 드립니다. 또한, 귀한 시간을 허락하여 학위 심사를 맡아 주시고 조언을 아끼지 않으신 이정찬 교수님과 공현중 교수님 감사합니다.

마지막으로 생체모델링 및 제어 (BMC) 연구실분들께 감사드립니다. 연구실 생활 동안 함께 지내며 많은 것을 보고 배울 수 있었습니다. 연구의 방향을 잡는데 많은 도움을 주신 김윤재 박사님, 연구실 생활과 연구에 있어 사려 깊은 관심과 조언을 주신 이우형 교수님, 임민혁 선생님 그리고 조민우 교수님, 롤 모델로 삼고 싶은 병준 형, 동갑내기 혜민이, 배울 점이 많은 단이, 동생 같지 않게 듬직한 병수와 영균이, 다재다능한 원석이 모두 제가 드릴 수 있는 것보다 받은 것이 더 많아 미안하고 또 감사합니다.

본 논문은 2020년도 서울대학교병원 (Grant No. 03-2020-0150)과 2021년도 범부처전주기의료기기연구개발사업단 (Project Number: 202012D15)의 지원을 받아 수행된 연구입니다. da Vinci® Research Kit는 2014년 Intuitive Surgical사로부터 기증받았습니다.