JDCS
디지털콘텐츠학회논문지
Journal of Digital Contents Society
Vol. 20, No. 1, pp. 15-20, Jan. 2019

역행성 견관절 전치환술을 위한 인공관절 삽입 훈련 시뮬레이터

김 수 영[1] · 고 준 호[1,3] · 장 성 욱[1] · 유 연 식[2] · 김 윤 상[1,3*]
[1]한국기술교육대학교 컴퓨터공학과 바이오컴퓨팅연구실
[2]한림대학교 동탄성심병원 정형외과
[3]한국기술교육대학교 바이오공학응용기술연구소

A prosthesis insertion training simulator for reverse total shoulder arthroplasty

Su Young Kim[1] · Junho Ko[1,3] · Seong-wook Jang[1] · Yon-Sik Yoo[2] · Yoon Sang Kim[1,3*]

[1]BioComputing Lab, Department of Computer Science and Engineering, Korea University of Technology and Education (KOREATECH), Cheonan 31253, Republic of Korea

[2]Department of Orthopaedic Surgery, Dongtan Sacred Hospital, Hallym University, College of Medicine, Hwasung, Republic of Korea

[3]Institute for Bioengineering Application Technology, KOREATECH, Cheonan, Republic of Korea

[요 약]

기존의 인공관절 전치환술 시뮬레이터들은 대부분 고관절 및 슬관절 수술을 대상으로 하고 있으며, 역행성 견관절 전치환술을 위한 시뮬레이터 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 역행성 견관절 전치환술을 위한 인공관절 삽입 훈련 시뮬레이터를 제안한다. 제안된 시뮬레이터는 상완골, 견갑골, 인공관절 모델에 기반하여 다양한 환경에서 인공관절을 삽입시키는 훈련 기능을 제공한다. 또한, 어깨 회전 운동 검사를 통해 훈련 결과를 피드백하는 기능을 제공한다. 훈련자는 제공되는 인공관절 삽입 훈련을 반복적으로 수행함으로써, 역행성 견관절 전치환술에 대한 숙련도를 향상시킬 수 있다.

[Abstract]

Most of the conventional arthroplasty simulators are targeting the hip and knee surgery. Whereas, it didn't consider about the simulator of reverse total shoulder arthroplasty. In this paper, we propose a prosthesis insertion training simulator for reverse total shoulder arthroplasty. The proposed simulator provides training function to insert prosthesis in a variety of environments based on the humerus, scapula, prosthesis models. In addition it provides function to feedback training results through range of motion on shoulder. Trainee can improve surgical skill of reverse total shoulder arthroplasty by repeatedly performing the provived prosthesis insertion training.

색인어 : 역행성 견관절 전치환술, 훈련 시뮬레이터, 인공관절 삽입

Key word : Reverse total shoulder arthroplasty, Training simulator, Prosthesis insertion.

http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2019.20.1.15

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-CommercialLicense(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 26 November 2018; **Revised** 20 December 2018
Accepted 20 January 2019

***Corresponding Author; Yoon Sang Kim**

Tel: ※ 개인정보 표시제한
E-mail: yoonsang@koreatech.ac.kr

Ⅰ. 서 론

최근 고령화 사회로 인한 퇴행성 질환이 증가하고 있으며, 컴퓨터 및 스포츠 활동으로 인해 어깨의 회전근 개가 파열되는 환자가 증가하고 있다. 이러한 환자들은 근력이 약하므로 회전근 개와 삼각근을 사용하여 어깨를 회전하게 되는 순행성 견관절 전치환술(total shoulder arthroplasty)이 불가능하기 때문에, 삼각근 만으로도 어깨 회전이 가능하게 되는 역행성 견관절 전치환술(reverse total shoulder arthroplasty)이 이루어지고 있다[1], [2]. 이러한 인공관절 전치환술은 인공관절의 적합성, 수술자의 숙련도, 수술의 정확도가 요구되기 때문에, 다양한 연구들에서 시뮬레이션 기술이 이용되고 있다.

인공관절 전치환술은 뼈 절단을 통한 인공관절 삽입 단계에서 인공관절의 위치나 각도에 매우 민감하게 영향을 받기 때문에 탈구 및 굴곡의 제한, 수술 주변으로의 감염 증상이 나타날 수 있다. 따라서 환자의 의학영상정보(자기 공명 영상, 전산화 단층촬영 영상)에 기반하여 맞춤형 인공관절을 제작하는 연구가 진행되었다[3], [4]. 또한, 인공관절 전치환술은 높은 정밀도가 요구되는 수술로써, 수술자의 높은 숙련도 및 정확한 수술 계획이 요구된다. 따라서, 환자의 의학영상정보를 이용하여 사전에 수술 훈련 및 가상 수술을 시행할 수 있는 시뮬레이터를 개발하는 연구가 진행되었다[4]-[6]. 이러한 시뮬레이터는 수술자의 수술 숙련도를 향상시키고, 사전에 적합한 인공관절을 선정함으로써 수술 시간을 감소시키고 정확도를 향상시켰다. 그러나, 기존의 인공관절 전치환술 시뮬레이터들은 대부분 고관절 및 슬관절 수술을 대상으로 하고 있으며, 역행성 견관절 전치환술을 위한 시뮬레이터 연구는 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 역행성 견관절 전치환술을 위한 인공관절 삽입 훈련 시뮬레이터를 제안한다. 제안된 시뮬레이터는 상완골(humerus), 견갑골(scapula), 인공관절 모델에 기반하여 다양한 환경에서 인공관절을 삽입시키는 훈련 기능을 제공한다. 어깨 관절가동범위 검사를 통해 훈련 결과를 피드백 하는 기능을 제공한다.

본 논문의 2장에서는 제안된 역행성 견관절 전치환술을 위한 인공관절 삽입 훈련 시뮬레이터에 대해 설명하고, 3장에서는 2장에서 제안된 인공관절 삽입 훈련 시뮬레이터를 이용한 역행성 견관절 전치환술 시나리오를 소개한다. 4장에서는 연구 결과를 논의하고 결론을 맺는다.

Ⅱ. 제안된 역행성 견관절 전치환술을 위한 인공관절 삽입 훈련 시뮬레이터

본 장에서는 역행성 견관절 전치환술을 위한 인공관절 삽입 훈련 시뮬레이터를 설계한다.

역행성 견관절 전치환술은 대표적으로 상완골 치환물 삽입, 견갑골 치환물 삽입, 견관절 정합 과정으로 구분할 수 있다. 상완골 치환물 삽입 과정에서는 상완골의 상완골두(humeral head)를 절단하고 상완골 치환물(humeral prosthesis)을 삽입한다. 견갑골 치환물 삽입 과정에서는 견갑골의 관절와(glenoid)를 절단하고 관절와 치환물(glenoid prosthesis)를 삽입한다. 마지막으로, 정합 과정에서는 상완골이 관절와 치환물의 관절와 반구(glenosphere)를 중심으로 회전할 수 있도록 상완골과 견갑골을 정합(registration)한다[7], [8].

제안된 시뮬레이터는 실제 수술 과정을 고려하여 그림 1과 같이 입력(input), 처리(process), 출력(output)의 3단계로 구성된다.

입력 단계에서는 가상 수술 환경을 구성하는 상완골 모델(humerus model), 견갑골 모델(scapula model), 인공관절 모델(prothesis model)을 입력 받는다. 처리 단계에서는 다양한 기능을 제공하여 가상 수술 훈련이 이루어진다. 출력 단계에서는 피드백으로 훈련 결과 데이터를 제공한다.

처리 단계는 가상 수술 환경 구축, 가상 수술 훈련, 훈련 결과의 측정을 위한 기능들로 구분된다. 가상 수술 환경 구축을 위한 기능들은 모델 불러오기(model importing), 모델의 지역 좌표계 동기화(model coordinates synchronization)이다. 가상 수술 훈련을 위한 기능들은 상완골 치환(humeral replacement), 견갑골 전치환술(scapula replacement), 견관절의 정합(shoulder joint registration)이다. 훈련 결과의 측정을 위한 기능은 어깨 관절가동범위 검사(shoulder range of motion test)이다.

출력 단계에서는 어깨 관절가동범위 검사로부터 측정된 외전(abduction) 및 내전(adduction) 데이터를 훈련 결과에 대한 피드백으로 제공한다.

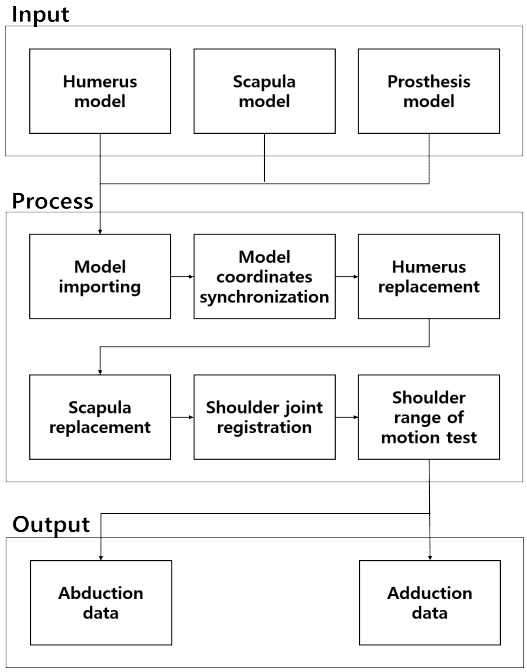


그림 1. 제안된 시뮬레이터의 구성도
Fig. 1. Configuration diagram of the proposed simulator

Ⅲ. 인공관절 삽입 훈련 시뮬레이터를 이용한 역행성 견관절 전치환술 시나리오

본 장에서는 2장에서 제안된 인공관절 삽입 훈련 시뮬레이터를 이용한 역행성 견관절 전치환술 시나리오를 소개한다.

역행성 견관절 전치환술 훈련 시나리오에 사용된 제안된 시뮬레이터는 물리엔진(Unity technology)을 이용하여 구현되었다. 구현된 시뮬레이터의 각 기능들은 시각화 패널(visualization panel)과 제어 패널(control panel)로 구성된 인터페이스를 통해 각 훈련 기능들이 제공된다.

가상 수술 환경 구축을 위한 모델 불러오기 기능은 제어 영역의 모델 불러오기 버튼(model importing)을 통해 제공되며, 전산화 단층촬영으로 제작된 골성구조물(상완골, 견갑골) 모델과 인공관절 치환물 모델을 화면에 시각화한다.

시각화된 골성구조물 모델은 전산화단층촬영 환경에 따라 초기 지역 좌표계가 상이하기 때문에, 역 좌표계 동기화 기능을 통해 그림 2와 같이 상완골 및 견갑골 모델을 시각화 패널에 위치시킨다. 지역 좌표계의 동기화를 위한 상완골의 지역 좌표계는 y축, x축, z축의 순서로 설정된다. y축은 상완골 모델을 구성하는 모든 정점 간의 거리를 3축(x, y, z)별로 비교하여, 가장 긴 거리를 가지는 두 정점을 포함하는 선(장축)으로 설정된다. x축은 모든 정점들과 설정된 y축이 직교하는 선의 거리를 비교하여, 가장 긴 거리를 가지는 선(medial-lateral epicondyle)으로 설정된다. z축은 설정된 y축과 x축을 외적 시킴으로써 설정된다. 카메라는 설정된 지역 좌표계의 원점을 초점으로 하여 상완골 모델을 시각화한다. 견갑골의 지역 좌표계는 x축, y축, z축 순서로 설정된다. x축은 견갑골 모델을 구성하는 모든 정점 간의 거리를 3축(x, y, z)별로 비교하여, 가장 긴 거리를 가지는 두 정점을 포함하는 선으로 설정된다. y축은 모든 정점들과 설정된 x축이 직교하는 선의 거리를 비교하여, 가장 긴 거리를 가지는 선으로 설정된다. z축은 설정된 x축과 y축을 외적 시킴으로써 설정된다.

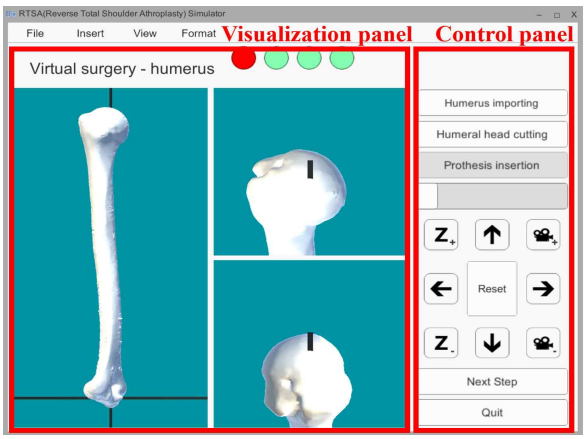


그림 2. 모델의 지역 좌표계 동기화 결과 화면 예시
Fig. 2. Result screen example of model coordinates synchronization

가상 수술 훈련을 위한 상완골 전치환술 기능은 실제 수술과 같이 상완골두 절단, 상완골 치환물 삽입으로 구분된다.

제어 영역의 절단 기능 버튼(humeral head cutting)으로 제공되는 상완골두 절단은 기준면(base plane) 생성, 모델의 절단, 절단된 모델의 단면 생성 과정으로 이루어진다. 기준면 생성 과정에서는 가시화 영역에서 시각화된 상완골의 표면에 설정한 3개의 정점을 포함하는 면을 생성한다. 모델의 절단 과정에서는 모델을 구성하는 모든 삼각 폴리곤을 그림 3(A)와 같이 절단한다. 절단된 삼각 폴리곤은 삼각면(triangular face) 또는 사각면(square face)으로 분할된다. 일반적인 모델은 삼각 폴리곤으로 구성되기 때문에, 분할된 면이 사각면일 경우 그림 3(B)와 같이 대각선을 기준으로 분할되어 2개의 삼각 폴리곤으로 생성된다. 절단된 모델의 단면 생성 과정에서는 삼각 폴리곤으로 구성된 다각면을 생성하기 위한 정점들의 리스트를 설정하고, 리스트를 이용하여 단면을 생성한다. 리스트는 기준면과 폴리곤의 교점들을 그림 3(C)와 같이 각도에 따라 순차적으로 정렬하여 설정된다. 절단된 모델의 단면은 설정된 리스트의 연속된 두 점과 중점에 기반한 삼각 폴리곤을 반시계 방향으로 생성하며 그림 3(D)와 같이 생성된다.

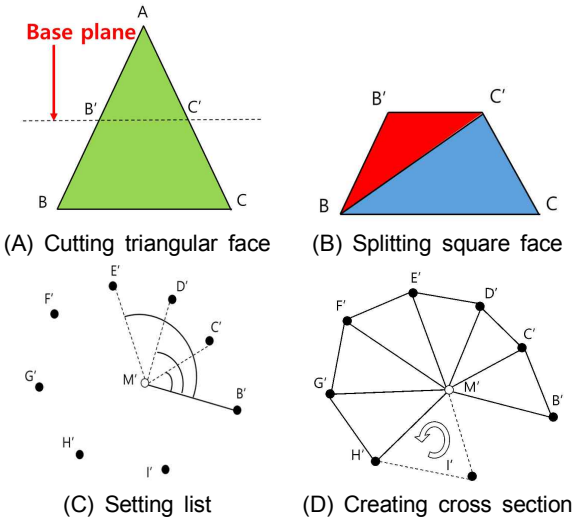
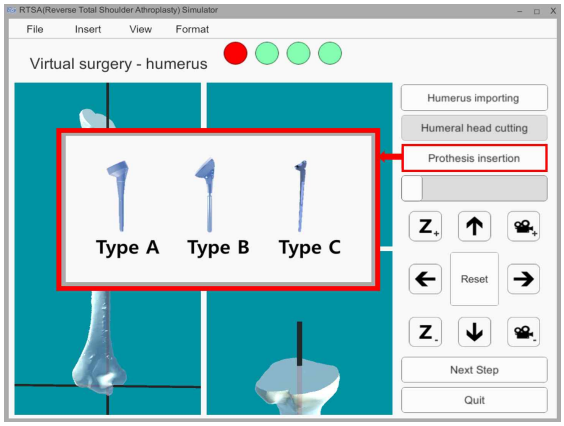
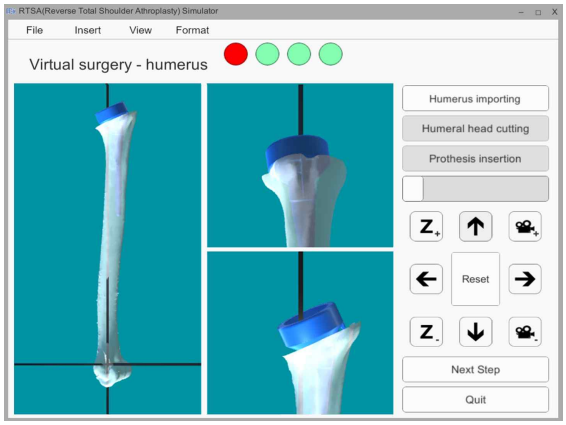


그림 3. 상완골두 절단 과정
Fig. 3. Cutting process of humeral head

그림 4에서 제어 영역의 인공관절 삽입 버튼(prothesis insertion)으로 제공되는 상완골 치환물 삽입은 치환물 선택(prothesis selection), 치환물 삽입(prothesis insertion) 과정으로 이루어진다. 치환물 선택 과정에서는 훈련자가 그림 4(A)와 같이 제공되는 다양한 치환물들 중에서 삽입 과정에 사용하기 위한 치환물을 선택한다. 치환물 삽입 과정에서는 치환물의 위치 및 크기를 조절하여 그림 4(B)와 같이 치환물을 삽입한다.



(A) Prothesis selection screen



(B) Prothesis insertion screen

그림 4. 상완골 전치환술 훈련 기능 화면 예시
Fig. 4. Screen example of humeral replacement training function

견갑골 전치환술 기능은 관절와 절단, 관절와 치환물 삽입으로 구분되며 각각 절단 기능 버튼(glenoid reaming), 인공관절 삽입 버튼(prothesis insertion)으로 제공된다. 관절와 치환물 삽입에서 치환물은 상완골 전치환술 기능에서 선택된 치환물과 매칭되는 모델로 선택되며, 이를 제외한 과정들은 상완골 전치환술과 동일하게 그림 5와 같이 이루어진다.

견관절 정합 기능은 견갑골의 trigonum spinae scapulae(TS), angulus inferior(AI), glenoid center(GC)와 상완골의 inferior facet(IF), lesser tubercle(LT), 관절와 평면을 이용하여[9], 그림 6과 같이 견갑골을 기준으로 상완골을 재배치한다.

어깨 관절가동범위 검사 기능은 내전과 외전 동작에 따른 회전 데이터를 측정한다. 내전과 외전 동작은 그림 7과 같이 z축을 기준으로 상완골 모델이 회전하는 동작이다. 측정된 회전 데이터는 정합된 상완골의 위치를 기준(0°)으로 상완골과 견갑골 모델 간에 충돌 시 회전된 상완골의 각도이다.

출력 단계에서는 훈련자에게 측정된 외전 및 내전 데이터를 피드백으로 제공한다.

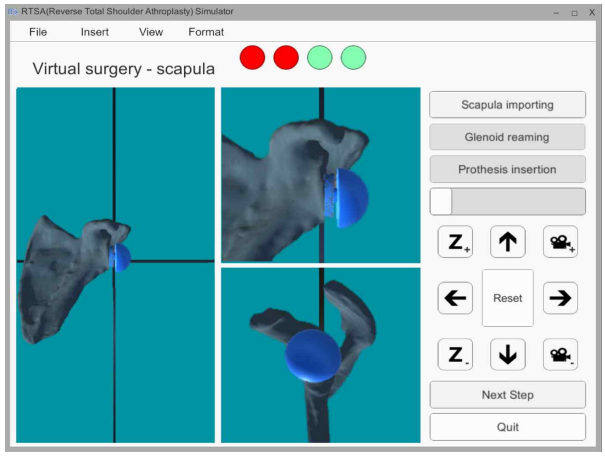


그림 5. 견갑골 전치환술 훈련 결과 화면 예시
Fig. 5. Screen example of scapula replacement training result

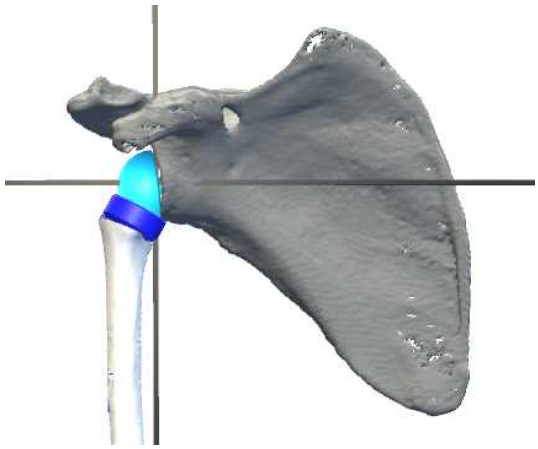


그림 6. 견관절 정합 결과 화면 예시
Fig. 6. Screen example of shoulder joint registration result

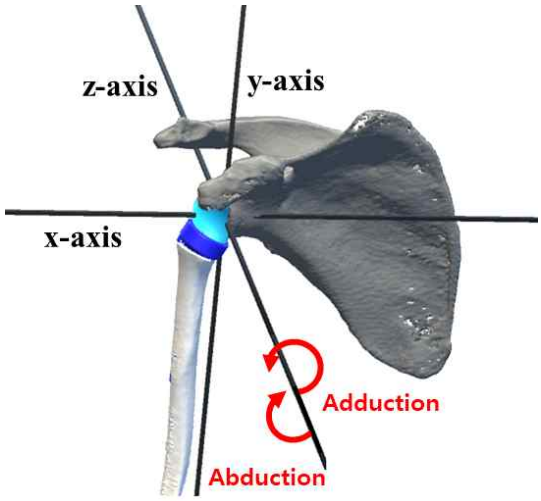


그림 7. 어깨 관절가동범위 검사 기능 화면 예시
Fig. 7. Screen example of shoulder range of motion test function

Ⅳ. 결론

본 논문에서는 역행성 견관절 전치환술을 위한 인공관절 삽입 훈련 시뮬레이터를 제안하였다. 제안된 시뮬레이터는 상완골 및 견갑골 전치환술 훈련 기능과 훈련 결과를 측정하기 위한 어깨 회전 운동 검사 기능을 제공한다. 이러한 기능들은 훈련자가 역행성 견관절 전치환술 시 골성구조물의 절단 부위 및 인공관절의 종류를 결정하는데 도움이 될 것이다. 제안된 시뮬레이터에서는 모델의 지역 좌표계가 전역 좌표계와 크게 다른 경우에 동기화가 이루어지지 않는 한계점이 있었다. 따라서, 향후 연구에서는 주성분 분석(principle component analysis) 방법을 이용하여 모델의 지역 좌표계 동기화 기능을 개선할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2016년 정보(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2016R1D1A1A09920056)

참고문헌

[1] B. T. Samuelsen, E. R. Wagner, M. T. Houdek, B. T. Elhassan, J. Sánchez-Sotelo, R. Cofield, and J. W. Sperling, “Primary reverse shoulder arthroplasty in patients aged 65 years or younger,” *Journal of shoulder and elbow surgery,* Vol. 26, No.1, pp. 13-17, 2017

[2] N. Cho, H. Oh, and Y. Rhee, "Debridement or tuberoplasty for massive rotator cuff tear," *Clinics in Shoulder and Elbow*, Vol. 13, No. 1, pp. 146-152, 2010

[3] J. Seo, and Y. Jun, "Extracting 3D geometry parameters of hip joint for designing a custom-made hip implant," *Korean Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 200-208, 2008

[4] D. Y. Park, H. M. Ji, K. S. Kwak, S. G. Nair, and Y. Y. Won, "Three dimensional CT-based virtual patellar resection in female patients undergoing total knee replacement: a comparison between tendon and subchondral method," *Clinics in orthopedic surgery*, Vol. 4, No. 3, pp. 193-199, 2012

[5] Y. Yoon, S. Park, Soohong Lee, L. Kim, and K. Choi, “Knee Joint Replacement Virtual Surgery Based on CAD System,” *HCI 2006*, Pyeongchang-gun, Gangwon-do, pp. 75-81, 2006.

[6] K. W. Lee, Y. I. Kim, H. Y. Kim, D. S. Yang, G. S. Lee, and W. S. Choy, "Three-Dimensional Scapular Kinematics in Patients with Reverse Total Shoulder Arthroplasty during Arm Motion," *Clinics in orthopedic surgery*, Vol. 8, No. 3, pp. 316-324, 2016.

[7] C.H. Choi, B. H. Kwack, and T. B. Oh, "Difference in the Surgical Approach in Reverse Total Shoulder Arthroplasty for Cuff Tear Arthroplasty: Comparison of the Radiological and Clinical Result according to the Deltopectoral and Anterosuperior Approach," *Journal of the Korean Orthopaedic Association,* Vol. 53, No. 4, pp. 316-323, 2018.

[8] Y. Kim, "Reverse Total Shoulder Arthroplasty: Complications," *Clinics in Shoulder and Elbow*, Vol. 14, No. 1, pp. 111-116, 2011.

[9] S. J. Kim, S. W. Jang, K. H. Jung, Y. S. Kim, S. J. Lee, and Y. S. Yoo, "Analysis of impingement-free range of motion of the glenohumeral joint after reverse total shoulder arthroplasty using three different implant models," *Journal of Orthopaedic Science,* 2018.

김수영(Su young Kim)

2014년 : 대전 서일고등학교 졸업

2018년～현 재: 한국기술교육대학교 대학원 컴퓨터공학과 (재학 중)
※관심분야 : 가상현실(Virtual Reality), 증강현실 (Augmented Reality), 바이오 인포매틱스(Bio-informatics) 등

고준호(Junho Ko)

2009년 : 한국기술교육대학교 컴퓨터공학부 (공학사)
2011년 : 한국기술교육대학교 대학원 컴퓨터공학과 (공학석사)
2017년 : 한국기술교육대학교 대학원 컴퓨터공학과 (공학박사)

2017년～현 재: 한국기술교육대학교 바이오컴퓨팅 연구실 연구원
※관심분야 : 가상 시뮬레이션(Virtual simulation), 바이오 인포매틱스(Bio-informatics) 등

장성욱(Seong-wook Jang)

2011년 : 한국기술교육대학교 컴퓨터공학부 (공학사)
2014년 : 한국기술교육대학교 대학원 컴퓨터공학과 (공학석사)
2018년 : 한국기술교육대학교 대학원 컴퓨터공학과 (공학박사)

2018년～현 재: 한국기술대학교 산학협력단
※관심분야 : 의료 시뮬레이션(Medical Simulation), 바이오 인포매틱스(Bio-informatics) 등

유연식(Yon-Sik Yoo)

1990년 : 중앙대학교 의학과
1995년 : 중앙대학교 대학원 의학과 (의학석사)
1999년 : 중앙대학교 대학원 의학과 (의학박사)

2001년～2005년: 포항 성모병원 정형외과 관절경센터 전문의
2005년～2007년: 미국 피츠버그 의대 생체공학연구소 연구원
2011년～현 재: 한림대학교 성심병원 교수
※관심분야 : 무릎/어깨운동 역학(Knee and Shoulder Kinematics), 수술 시뮬레이션 (Surgicla Simulation) 등

김윤상(Yoon Sang Kim)

1993년 : 성균관대학교 전기공학과 (공학사)
1995년 : 성균관대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
1999년 : 성균관대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)

1999년～2000년: 한국과학기술연구원 Post-Doc.
2000년～2003년: Univ. Washington 전기공학과 Faculty Research Associate
2003년～2005년: 삼성종합기술원 수석연구원
2005년～현 재: 한국기술교육대학교 컴퓨터공학부 교수
※관심분야 : 가상 시뮬레이션(Virtual simulation), 전력-IT 기술(Power-IT technology), 바이오 인포매틱스(Bio-informatics) 등