

뇌혈종 제거 수술을 위한 무마커 수술 유도 로봇 시스템의 정확도 향상을 위한 캘리브레이션 기법

박규식 · 윤현민 · 신상균 · 조현철 · 김영준 · 김래현 · 이득희[†]

한국과학기술연구원 의공학연구소 바이오닉스연구단

Application of Calibration Techniques to Enhance Accuracy of Markerless Surgical Robotic System for Intracerebral Hematoma Surgery

Kyusic Park, Hyon Min Yoon, Sangkyun Shin, Hyunchul Cho, Youngjun Kim, Laehyun Kim, and Deukhee Lee[†]

Center for Bionics, Biomedical Research Institute, Korea Institute of Science and Technology (KIST)

Received 16 March 2015; received in revised form 14 April 2015; accepted 14 April 2015

ABSTRACT

In this paper, we propose calibration methods that can be applied to the markerless surgical robotic system for Intracerebral Hematoma (ICH) Surgery. This surgical robotic system does not require additional process of patient imaging but only uses CT images that are initially taken for a diagnosis purpose. Furthermore, the system applies markerless registration method other than using stereotactic frames. Thus, in overall, our system has many advantages when compared to other conventional ICH surgeries in that they are non-invasive, much less exposed to radiation exposure, and most importantly reduces a total operation time. In the paper, we specifically focus on the application of calibration methods and their verification which is one of the most critical factors that determine the accuracy of the system. We implemented three applications of calibration methods between the coordinates of robot's end-effector and the coordinates of 3D facial surface scanner, based on the hand-eye calibration method. Phantom tests were conducted to validate the feasibility and accuracy of our proposed calibration methods and the surgical robotic system.

Key Words: Hand-eye calibration, ICH surgery, Markerless registration, Stereotactic device, Surgical robot

1. 서 론

의료 기술의 발전으로 점차 보편화되고 있는 최

소 침습 수술(Minimal Invasive Surgery)은 환자의 회복속도가 기존의 절개 방식의 수술보다 빠르다는 장점을 지닌다. 특히, 최소 침습 수술에 다빈치(Da Vinci)나 로보닥(ROBODOC)과 같은 수술 로봇이 상용화되어 실제 수술에 적용되고 있는 추세이다. 한편, CT(Computed Tomography)나 MRI

[†]Corresponding Author, dkylee@kist.re.kr
©2015 Society of CAD/CAM Engineers

(Magnetic Resonance Imaging) 등의 영상을 이용하여 환자 상태를 진단하고, 수술 계획을 세우기에 용이하게 해주는 수술 유도 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1-6].

특히, ICH(Intracerebral Hematoma)와 같은 응급 질환에는 빠른 시간 내의 수술이 요구된다. 이 때, 비침습적인 방법을 통해 환자와 수술 유도 장비를 정합하는 수술 유도 시스템은 수술 준비 시간을 효율적으로 단축시킬 수 있다. 이러한 수술 유도 시스템은 추가적인 CT 촬영없이 초기 진단 영상만을 이용하여 수술할 수 있어야 하고, 뇌정위 장치 등의 추가적인 수술 장치 사용을 배제하여야 할 필요성이 있다^[7-9].

ICH(Intracerebral Hematoma)는 뇌혈관이 터져 혈액이 고이고 굳어져 시간이 지남에 따라 점점 혈종(Hematoma)의 크기가 커져, 뇌가 손상되는 병증이다. 현재 통상적으로 시행되는 ICH 수술 과정은 환자가 도착하면 CT 영상 등을 통해 환부를 진단하고, 뇌정위 장치(Stereotactic Frame)를 환자의 머리에 부착하여, 다시 CT 촬영을 한다. 이러한 영상을 기반으로 수술을 세우고, 뇌정위 장치를 통한 Catheter 삽입 위치를 계산하여 수술을 시행한다. ICH는 응급 상황임에도 불구하고, 통상적으로 Fig. 1에서와 같이 1 단계(진단), 2 단계(수술준비)까지의 과정이 최소 1시간 이상이 걸린다. 진단을

위한 CT 촬영을 하고 부가적으로 뇌정위 장치를 장착하고 촬영을 하기 때문에 환자의 방사선 피폭량이 증가하는 문제점도 존재한다.

이를 개선하기 위해 본 연구에서 소개하는 무마커 방식의 수술 유도 로봇 시스템은 추가 CT 촬영이 없고, 침습적인 마커를 사용하지 않는 장점을 지니고 있다. Fig. 1에서와 같이, 본 시스템은 진단 영상만을 이용하기 때문에 방사선 피폭량을 반으로 줄일 수 있고, 표면 정합의 방법으로 수술 유도를 하여 뇌정위 장치의 사용으로 발생하는 침습적인 부분이 발생하지 않는다. 그리고, 진단 영상만을 이용하여 수술 유도하므로, 기존의 수술 방식에 비해 빠른 뇌혈종 제거 수술이 가능하게 하는 수술 보조 시스템이다^[10].

한편, 본 시스템 상에서는 카메라 혹은 이미지 센서의 정보를 이용하여 수술 로봇을 제어하며, 이를 위해 두 장치 사이의 관계를 정의하여야 한다. 이 때, 이미지 센서에서 획득한 좌표 공간과 로봇의 워크스페이스(Work Space)는 서로 독립적이기 때문에 월드 좌표 공간을 매개(Parameter)로 두 좌표계 사이의 관계를 계산할 수 있다. 이러한 과정을 캘리브레이션(Calibration)이라고 한다^[11]. 이러한 캘리브레이션 기법은 본 시스템의 정확도를 결정짓는 핵심적인 기술이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 혈종(Hematoma) 제거 술을 위한 수술 유도 로봇 시스템 상에 적용되는, 환자의 얼굴 표면 정보가 담겨 있는 3차원 표면 스캔 공간과 실제로 환부로 침습해야 하는 로봇 공간 상의 캘리브레이션 기법에 대해 다루어보고자 한다. 캘리브레이션 기법에 관해 총 세가지 방법을 구현해 보았으며, 팬텀 실험을 통해 각각의 적용 방법들의 정확도를 분석하였다. 이를 통해 본 시스템에 적합한 환자 공간과 로봇 공간의 캘리브레이션 기법을 도출해내고자 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 캘리브레이션 기법의 개요와 원리를 다루고자 한다. 3장에서는 캘리브레이션 기법들을 적용시킨 시스템에 대한 설명을 하며, 4장에서 팬텀 실험을 통한 정확도 검증 결과를 다룬다. 마지막으로 5장에서 본 연구의 결론을 도출하고자 한다.

2. Hand-Eye 캘리브레이션 기법

기본적인 캘리브레이션 기법은 크게 매개 변수

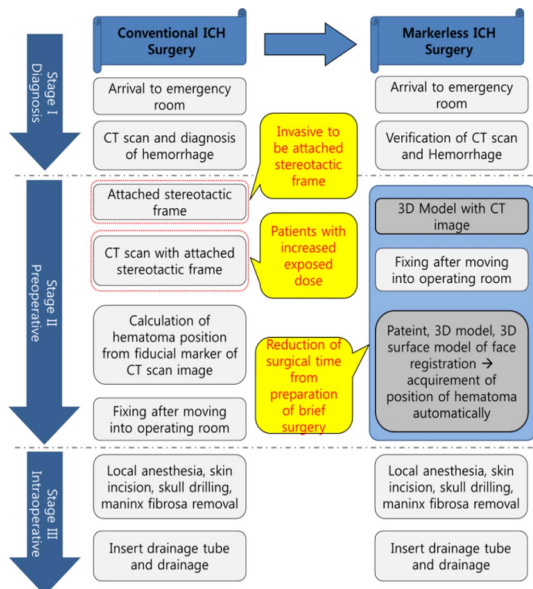


Fig. 1 Conventional ICH Surgery vs. Markerless Robotic ICH Surgery

근사화(Parameter Estimation) 기법과 공간 맵핑(Mapping the Space) 기법이 있다. 공간 맵핑 기법은 참값과 비교하여 보간(Interpolation)을 통해 에러를 줄여 나가는 기법이며, 매개 변수 근사화 기법은 수학적 모델을 이용하여 참값(Ground Truth)과 비교하여, 에러를 최소화하는 기법이다. 에러를 최소화하는 데에 사용할 수 있는 여러 가지 수학적 기법이 있는데, Linear Parameter Estimation, Least Squares Adjustment, Linear Least Squares 등이 있다.

로봇을 사람의 손이라고 하였을 때, 둘 사이의 관계를 찾는 방법을 Hand-Eye Calibration(캘리브레이션)이라고 한다. 이 방법은 Tsai에 의해서 제안된 것으로 $AX = XB$ 의 Solution을 계산하여, 두 좌표계 간의 캘리브레이션을 한다^[12,13].

Inside-Out 방식의 Hand-Eye 캘리브레이션 모식도(Fig. 2)를 살펴보면, Hand-Eye 장치가 Position 1과 Position 2의 위치로 움직일 때, Closed-Loop를 만들 수 있다. Fig. 2의 개념을 수식으로 생각해 보면 다음과 같다.

$$A = \begin{pmatrix} R_A & t_A \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = A_2 A_1^{-1} \tag{1}$$

로 A를 정의할 수 있다. 이 때,

$$A A_1 = A_2 \tag{2}$$

와 같이 표현할 수 있다. 또한,

$$B = \begin{pmatrix} R_B & t_B \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = B_2^{-1} B_1 \tag{3}$$

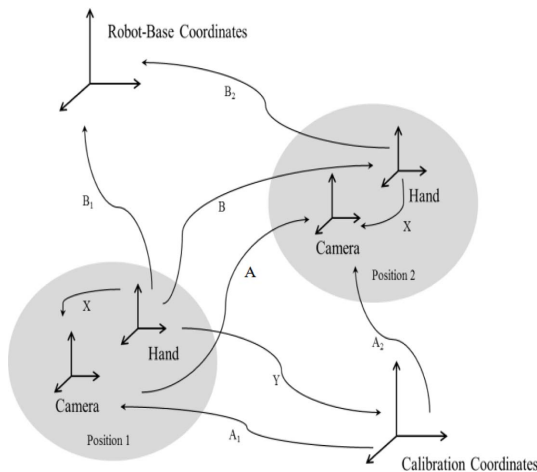


Fig. 2 Schematic of Hand-Eye Calibration

로 B를 정의할 수 있다. 마찬가지로,

$$B_2 B = B_1 \tag{4}$$

같이 표현할 수 있다. 결론적으로는, 식 (2), (4)와 같이 정의할 수 있다. 이 때, A와 B는 모두 4×4 행렬이다. Hand-Eye 캘리브레이션을 위해서,

$$AX = XB \tag{5}$$

의 식에서 X 값을 구해야 한다. Fig. 2에서 X에 관한 식을 만들면,

$$X = A_1 Y \tag{6}$$

와 같이 정의할 수 있다. 이제, 식 (5)에 식 (1)과 식 (6)을 대입하면,

$$A_1^{-1} A_1 Y = A_1 Y B \tag{7}$$

와 같이 표현된다. 이 식을 정리하면,

$$A_2 Y = A_1 Y B \tag{8}$$

가 된다. 결국, 캘리브레이션 좌표계(Calibration Coordinates)에서의 Y 값을 알 수 있다. 마지막으로 Y 값을 식 (6)에 대입하면, 최종적으로 X 값을 구할 수 있다.

3. 캘리브레이션 기법의 시스템 적용

이제, 위에서 설명한 Hand-Eye 캘리브레이션 기법을 본 ICH 제거를 위한 수술 유도 로봇 시스템 상에 적용하는 방법에 대해 설명하도록 한다. 본

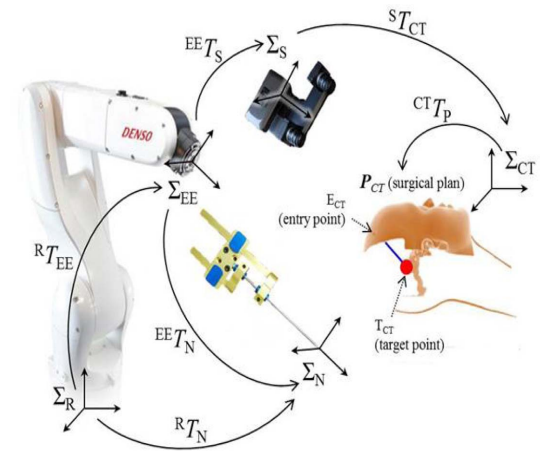


Fig. 3 Schematic of Hand-Eye Calibration in our proposed surgical robotic system

시스템 상의 캘리브레이션은 Fig. 3에서와 같이 로봇암과 3차원 표면 스캐너간의 캘리브레이션(${}^{EE}T_S$), 로봇암과 수술 유도 장치 간의 캘리브레이션(${}^{EE}T_N$), 총 두가지로 구성된다. 본 연구에서는 전자에 대한 구현 방법 및 검증을 논하기로 한다.

본 시스템에 사용한 로봇 암은 DENSO사의 VS-068 모델로 6-축(6-DOF) 로봇이며 반복 정밀도(Repeat Accuracy)가 0.02 mm이다. 3차원 표면 스캐너는 스테레오 비전(Stereo Vision) 기반의 3차원 표면 스캔장치이며, 2대의 카메라와 1대의 프로젝터를 사용한다. 카메라는 PointGrey사의 Chameleon(CMLN-13S2M-CS) 제품 2대를 사용하였다. 해상도(Resolution)는 1.3 mega pixel이고, 1296 × 964 해상도로 18 FPS(Frame Per Second)의 Frame Rate의 성능을 가진다. 그리고, 스캔을 위해 패턴(Pattern)을 뿌려주기 위한 프로젝터는 Optoma사의 PK320을 사용하며, 해상도는 WVGA (854 × 480)이다.

Hand-Eye 캘리브레이션을 위해서, 카메라와 기준 물체(Calibration Pattern)와의 상대적인 위치를 나타내는 외부 파라미터(Extrinsic Parameter)를 사용해야 한다. 외부 파라미터는 3 × 4 행렬로 카메라 기준 좌표에서 리얼 월드(Real World)의 패턴까지의 거리를 Rotation과 Translation으로 표현한다.

3.1 광학식 추적기(Optical Tracker)를 이용한 캘리브레이션 방법

NDI 사의 SPECTRA 광학식 추적기를 사용한 캘리브레이션은 로봇 좌표계와 3차원 표면 스캔 좌표계 모두를 광학식 추적기 좌표계로 옮겨 로봇과 3차원 스캐너와의 관계를 구하는 방법이다. 다시 말하면, 광학식 추적기를 매개 변수로 두고 캘리브레이션을 구현한다. 이 방법은 로봇암이 특정 위치에 있을 때, 3차원 스캐너에 보이는 점과 광학식 추적기를 이용해 얻은 대응점(Corresponding Point)를 이용해 각각 좌표계의 관계에 대한 매트릭스를 구한다. 이러한 방법은 사람의 손으로 광학식 추적기의 위치를 얻기 때문에 정확성이 떨어지는 단점이 있으나, 이후에 제시하는 방법에 비해 비교적 간편하게 캘리브레이션 작업을 진행할 수 있는 장점이 있다. 광학식 추적기를 사용한 캘리브레이션은 Table 1과 같이 계산할 수 있다.

Table 1 Solution of Hand-Eye calibration using optical tracker

$$T_{Position} = {}^S T_{Optical} S_{Point}$$

$$S_{Point} = {}^R T_S R_{Position}$$

$${}^S T_{Optical} = T_{Position} (S_{Point}^T) (S_{Point} S_{Point}^T)^{-1}$$

$$= \begin{pmatrix} -0.1616 & -0.1801 & -0.9652 & -282.0235 \\ 0.9508 & -0.0019 & -0.1983 & -10.5333 \\ 0.0428 & -0.9808 & 0.1758 & -874.6492 \\ -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 1.0000 \end{pmatrix}$$

$${}^R T_S = ({}^S T_{Optical})^{-1} R_{Position} (R_{Position}^T) (R_{Position} R_{Position}^T)^{-1}$$

$$= \begin{pmatrix} 0.0087 & 1.0113 & 0.1661 & -87.1231 \\ -1.0561 & 0.0233 & -0.2662 & 797.7994 \\ -0.0346 & -0.1724 & 0.7211 & -598.3179 \\ 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{pmatrix}$$

$T_{Position}$: Tool Position using Optical Tracker Points
 $R_{Position}$: Robot Position
 S_{Point} : 3D Scanner Surface Point
 ${}^S T_{Optical}$: Coordinates Between 3D Scanner and Optical Tracker
 ${}^R T_S$: Coordinates Between Robot End-Effector and 3D Scanner

3.2 3차원 표면 스캐너를 이용한 캘리브레이션 방법

외부 장치의 도움 없이 3차원 표면 스캐너를 이용하여 캘리브레이션하는 방법이다. Fig. 4에서와 같이 로봇을 이동시켜 각각의 위치에서의 로봇 좌표와 스캐너 위치 좌표를 대응시켜 Hand-Eye 캘리브레이션을 할 수 있다. 이 때, 스캐너의 위치좌

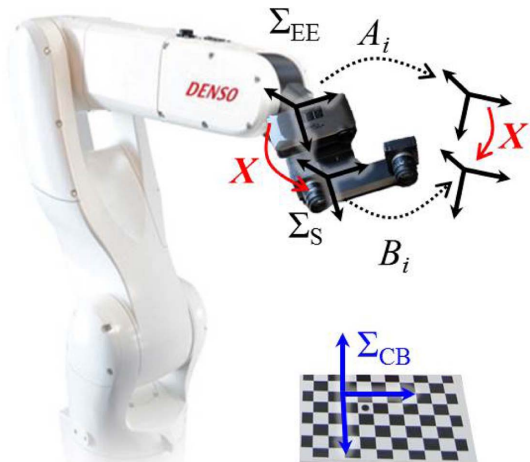


Fig. 4 Hand-eye calibration relationship between 3D scanner and robot end-effector (Σ_{EE} : coordinates of robot's end-effector, Σ_{CB} : coordinates of chessboard, Σ_S : coordinates of the end-effector of 3D scanner)

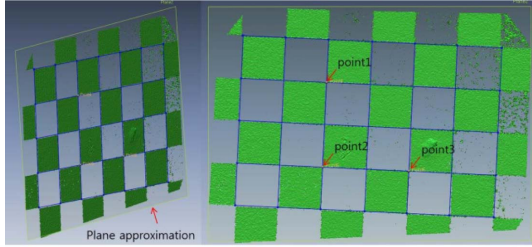


Fig. 5 3D surface image: 3D surface image of plane fitting and line fitting (left), finding 3 points of cross line (right)

표는 원점이 체스보드 위에 있다고 가정하고, 이 기준(\sum_{CB})에서 3차원 스캐너가 위치한 좌표 정보를 얻는다. 기준이 되는 \sum_{CB} 을 구하는 방법은 Fig. 5와 같이 체스보드의 3차원 스캔 데이터 상에서 평면 피팅 과정을 거치고, 경계선을 그어 만나는 점들 중에 세 점을 선택하여 각각 Point1 = (x₁, y₁, z₁), Point2 = (x₂, y₂, z₃), Point3 = (x₃, y₃, z₃)이라고 정의한다. 이 때, 선택된 세 점 중 Point2를 원점으로 하고, Point2-Point3을 연결하는 선분을 X축, Point2-Point1을 연결하는 선분을 Y축, 화면에서 나오는 방향을 Z축이라고 설정하여 하나의 좌표계를 완성시킬 수 있다.

3.3 스테레오 영상을 이용한 캘리브레이션 방법

스테레오 카메라 영상 정보를 이용하여 Hand-Eye 캘리브레이션을 할 수 있다. 3.2장의 3차원 스캔 데이터를 이용한 캘리브레이션은 스캐너의 위치를 얻기 위해 평면 피팅, 경계선 검출, 교점 검출 등의 다단계의 과정이 필요하지만, 카메라로부터 얻어진 2차원 영상을 이용할 시에는 OpenCV 라이브러리를 이용해 간단히 세 점을 추출해 낼 수 있는 장점이 있다(Fig. 6). 세 점을 얻은 후의 캘리브레이션 과정은 3차원 스캐너를 사용한 캘리브레이션 과정과 동일하다.

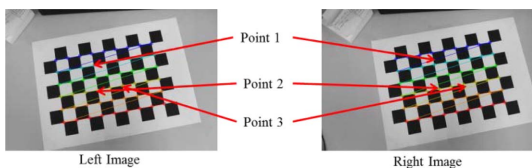


Fig. 6 Calculating 3D scanner position from stereo image

4. 팬텀 실험 및 실험 결과

통상적으로 혈종(Hematoma) 제거 술에 필요한 정확도 오차는 약 2 mm이다. 위에서 설명한 각각의 Hand-Eye 캘리브레이션 방법을 적용한 혈종 제거를 위한 수술 유도 로봇 시스템의 정확도를 검증해보았다. 본 실험에는 팬텀, 광학식 추적기를 이용하여 각각의 캘리브레이션을 적용했을 때의 정확도를 확인해볼 수 있었다.

먼저, 실험에 앞서 안면과 머리부위의 피부 및 두개골로 이루어진 팬텀을 1 mm 두께로 CT 촬영하였다(TSX-301A). CT 이미지를 이용하여 시술 계획을 마치고, 3차원 팬텀 표면 스캔 데이터와의 정합을 통해 시술 계획에 따라 로봇을 구동시켰을 때, 시술 계획 상의 카테터 위치와 실제 카테터의 위치를 비교하는 방식으로 각각의 캘리브레이션 기법을 적용한 시스템의 정확도를 비교 검증할 수 있었다. 이 때, 시술 계획 상의 카테터 위치와 실제 카테터의 위치를 정의하는 데에는 NDI SPECTRA 광학식 추적기를 이용하였다. 먼저, 광학식 추적기 좌표계를 기준으로 광학식 마커를 부착한 팬텀의 모델 좌표 정보를 정의해 두었다. 그리고, 시술 계획 상의 계획점(planning points)들과 로봇 구동을 하였을 때의 니들 가이드 장치의 타겟점(target points)들의 좌표 정보를 광학식 추적

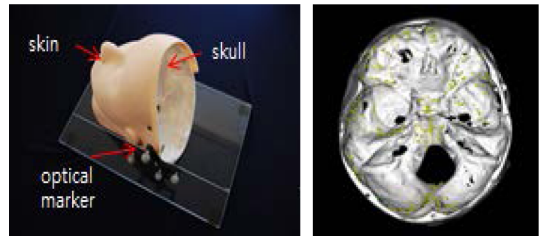


Fig. 7 Phantom test: initial setting for the phantom test (left), and surface points information derived from optical tracking (right)

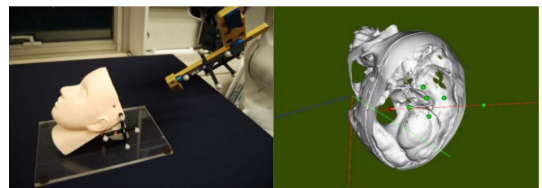


Fig. 8 Comparison of virtual planning and actual needle guide based on optical tracking coordinates

Table 2 Distance & Orientation errors when each of calibration methods was applied to the system

	Method 1		Method 2		Method 3	
	Dist.	Ori.	Dist.	Ori.	Dist.	Ori.
Ave.	1.94	0.65	1.85	0.60	1.83	0.61
SD	0.49	0.20	0.41	0.21	0.42	0.18
Max.	3.22	0.95	3.04	0.99	3.01	0.94
Min.	0.93	0.28	0.87	0.23	0.85	0.21

을 통해 얻을 수 있었다(Fig. 7, 8).

각각의 캘리브레이션 기법을 사용하여 팬텀 실험을 5회씩 진행하였을 때, 계획점과 타겟점의 오차를 Table 2와 같이 확인할 수 있었다.

Table 2에서 method 1은 광학식 추적기를 사용하는 방법, method 2는 삼차원 표면 스캐너를 이용하는 방법, method 3은 스테레오 카메라를 이용하는 방법을 각각 의미한다. Distance는 계획점과 타겟점 사이의 절대 거리(mm)이며, Orientation은 각각의 점을 관통하는 선들 사이의 각도(degree)를 의미한다.

위의 표에서 보는 바와 같이, 광학식 추적기를 사용하는 방법(method 1)에 비하여 체스 보드와 촬영장비를 이용한 캘리브레이션 방법(method 2, 3)이 정확도와 반복성 관점에서 우수함을 확인할 수 있었다. 즉, 사람의 손을 통해 광학식 추적 위치를 얻기 때문에 작업 과정 상에서 정확성을 떨어뜨리는 오차를 발생시킨다는 결론을 도출할 수 있었다.

한편, 삼차원 표면 스캐너를 이용한 캘리브레이션 방법(method 2)과 스테레오 카메라를 이용한 캘리브레이션 방법(method 3)을 적용한 결과를 비교해 보았을 때, 정확도 측면에서 거의 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 두 캘리브레이션 방법의 차이점은 영상 촬영 장비와 좌표 설정 방법이다. 비슷한 정확도를 나타내므로, 카메라 영상(method 3)을 이용할 시에는 평면 피팅의 과정이 없는 더 간편한 방법으로 스캐너 좌표 정보를 구할 수 있다는 장점이 있다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 뇌혈종(Intracerebral Hematoma) 제거 수술을 위한 수술 유도 로봇 시스템 상에 적용되는, 3차원 표면 스캔 공간과 로봇 공간 상의 캘리브레이션 기법에 대해 다루어보았다. 적용 가능

한 캘리브레이션 기법에 관해 총 세가지 방법을 시스템 상에 구현해 보았으며, 광학식 추적기와 팬텀을 사용한 실험을 통해 각각의 방법들을 적용했을 때의 시스템 정확도 검증할 수 있었다.

수술 유도 로봇 시스템에 들어가는 기술들이 다양하나, 그 중 시스템 오차에 가장 크게 기인하는 요소가 바로 본 연구에서 다룬 캘리브레이션이다. 본 시스템에 적용 가능한 세가지 캘리브레이션 기법을 구현하고 비교해 보았을 때, 스테레오 카메라의 영상 정보를 이용한 Hand-Eye 캘리브레이션 기법이 가장 효과적임을 확인할 수 있었으며 그 오차 또한 시술 상에 필요한 오차 이하(1.83 mm ~ 1.94 mm)로 충족됨을 확인할 수 있었다.

본 수술 유도 로봇 시스템의 정확도 개선을 위한 추가적인 연구가 필요하다. 캘리브레이션 작업 과정은 사용자에게 따라 오차의 범위가 크게 변동하기 때문에, 이러한 편차를 줄일 수 있는 반복성과 안정성을 보장하는 심층적인 기술의 개발과 매뉴얼의 개발이 필요하다. 또한, 수술 유도 로봇 시스템을 구성하는 기술 요소 중 3차원 스캐닝 시의 에러, 이미지 정합 시의 에러 등을 최소화할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술연구원의 첨단 의공학 플래그십 사업인 십자인대 재건술을 위한 3차원 수술전 계획 및 실시간 네비게이션 기술개발과 미래 원천연구사업인 멀티 모달 이미지 가이드 미세 수술 시스템의 연구 결과로 수행되었음(2E25116, 2E24551).

References

1. Howe, R.D. and Matsuoka, Y., 1999, Robotics for Surgery, *Annual Review of Biomedical Engi-*

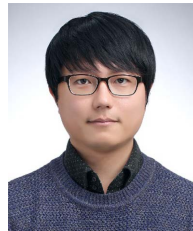
neering, 1, pp.211-240.

2. Davies, B., 2000, A Review of Robotics in Surgery, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H*, 214(1), pp.129-140.
3. Taylor, R.H. and Stoianovici, D., 2003, Medical Robotics in Computer-integrated Surgery, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(5), pp.765-781.
4. Dogangil, G., Davies, B.L. and Baena, F.R.Y., 2010, A Review of Medical Robotics for Minimally Invasive Soft Tissue Surgery, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, part H*, 224(5), pp.653-679.
5. Lanfranco, A.R., Castellanos, A.E., Desai, J.P. and Meyers, W.C., 2004, Robotic Surgery: a Current Perspective, *Annals of Surgery*, 239(1), pp.14-21.
6. Mattei, T.A., Rodriguez, A.H., Sambhara, D. and Mendel, E., 2014, Current State-of-the-art and Future Perspectives of Robotic Technology in Neurosurgery, *Neurosurgical Review*, 37(3), pp.357-366.
7. Eggers, G., Muhling, J. and Marmulla, R., 2006, Image-to-patient Registration Techniques in Head Surgery, *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 35, pp.1081-1095.
8. Li, Q.H., Zamorano, L., Pandya, A., Perez, R., Gong, J. and Diaz, F., 2002, The Application Accuracy of the NeuroMate Robot—a Quantitative Comparison with Frameless and Frame-based Surgical Localization Systems, *Computer Aided Surgery*, 7(2), pp.90-98.
9. Callovin, G., Sherkat, S. and Gazzeri, R., 2014, Frameless Nonstereotactic Image-guided Surgery of Supratentorial Lesions: Introduction to a Safe and Inexpensive Technique, *Journal of Neurological Surgery, Part A: Central European Neurosurgery*, 75(5), pp.365-370
10. Shin, S., Lee, D., Kim, Y. and Park, S., 2012, Markerless Registration for Intracerebral Hemorrhage Surgical System using Weighted Iterative Closest Point (ICP), *Proceedings of 34th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, pp.5306-5309.
11. Wang, C., 1992, Extrinsic Calibration of a Vision Sensor Mounted on a Robot, *IEEE Trans. Robot. Automat.* 8, pp.161-175.
12. Shiu, Y. and Ahmad, S., 1989, Calibration of Wrist-mounted Robotic Sensors by Solving Homogeneous Transform Equations of the Form $AX=XB$, *IEEE Trans. Robot. Automat.* 5, pp.16-27.
13. Tsai, R.Y. and Lenz, R.K., 1989, A New Technique for Fully Autonomous and Efficient 3D Robotics Hand/eye Calibration, *IEEE T Robotic Autom.* 5(3), pp.345-358.



박 규 식

2009년 서울대학교 기계항공공학부 학사
 2011년 서울대학교 기계항공공학부 석사
 2013년~2015년 한국과학기술연구원 위촉연구원
 관심분야: Medical modeling, Computer assisted surgery system



윤 현 민

2010년 University of Michigan Mechanical Engineering 학사
 2014년 서울대학교 기계항공공학부 석사
 2014년~현재 한국과학기술연구원 인턴연구원
 관심분야: Computer assisted surgery system, Surgical navigation



신 상 균

2002년 울산대학교 전자공학과 학사 졸업
 2004년 한양대학교 전자통신전파공학과 석사 졸업
 2015년 고려대학교 컴퓨터전파통신공학과 박사 졸업
 2015년~현재 한국과학기술연구원 재직
 관심분야: Computer assisted surgery system, Surgical navigation



조 현 철

2003년 고려대학교 컴퓨터학과 학사
 2005년 고려대학교 컴퓨터학과 석사
 2005년~현재 한국과학기술연구원 연구원
 관심분야: Computer graphics, Computer assisted surgery system



김 영 준

2001년 서울대학교 기계항공공학과
학사
2003년 서울대학교 기계항공공학과
석사
2009년 서울대학교 기계항공공학과
박사
2009년~현재 한국과학기술연구원
스타포닥, 선임연구원
관심분야: 3D medical software,
Computer assisted surgery system



김 래 현

1994년 한양대학교 금속공학과 학사
1996년 연세대학교 전산학과 석사
2003년 University of Southern
California, 전산학과 박사
2003년~현재 한국과학기술연구원
연구원, 선임연구원, 책임연구원
관심분야: 햅틱스(Haptics), 컴퓨터
그래픽스(computer graphics), 인
간-컴퓨터 인터랙션(Human
computer interaction), 가상 현실
(Virtual Reality)



이 득 희

2000년 한양대학교 정밀기계공학과
학사
2003년 서울대학교 기계설계공학과
석사
2008년 일본 동경대학교 산업기계
공학과 박사
2003년~현재 한국과학기술연구원
재직
관심분야: 비주얼서보제어, 수술내
비게이션