

광학식측정장치를 이용한 금속정 내고정 수술의 원위부 나사체결을 위한 로봇틱 유도 시스템

Robotic Guidance of Distal Screwing for Intramedullary Nailing Using Optical Tracking System

An Liming¹ · 김우영² · 고성영[†]

Liming An¹, Woo Young Kim², Seong Young Ko[†]

Abstract: During the intramedullary nailing procedure, surgeons feel difficulty in manipulation of the X-ray device to align it to axes of nailing holes and suffer from the large radiation exposure from the X-ray device. These problems are caused by the fact the surgeon cannot see the hole's location directly and should use the X-ray device to find the hole's location and direction. In this paper, we proposed the robotic guidance of the distal screwing using an optical tracking system. To track the location of the hole for the distal screwing, the reference marker is attached to the proximal end of an intramedullary nail. To guide the drill's direction robustly, the 6-degree-of-freedom robotic arm is used. The robotic arm is controlled so as to align the drill guiding tool attached the robotic arm with the obtained the hole's location. For the safety, the robot's linear and angular velocities are restricted to the predefined values. The experimental results using the artificial bones showed that the position error and the orientation error were 0.91 mm and 1.64°, respectively. The proposed method is simple and easy to implement, thus it is expected to be adopted easily while reducing the radiation exposure significantly.

Keywords: Distal Screwing, Robotic Guidance, Intramedullary Nailing Procedure, Optical Tracking System

1. 서 론

근골격계 골절 정복 수술은 대퇴골, 경골 또는 상완골 같은 근골격에 골절상을 입었을 때 골절 부위를 다시 접합하는 외과 수술을 말한다. 근골격계 골절 정복 수술은 다음 같이 진행된다. 1) 수술 중 획득한 X-ray 이미지를 이용하여 골절 상태와 부위를 확인한다. 이때 수술 전 CT이미지도 촬영하여 활용되기도 한다. 2) 어긋난 골절부위를 당겨서 1차 정렬을 수행한다. 3) 수술 중 획득한 환부의 관상면, 시상면 그리고 측면의 X-ray

이미지들을 기반으로 보다 정밀한 2차 정렬을 수행한다. 4) 정렬이 완료되면 정렬된 상태를 유지하면서 상황에 따라 고정막대, 즉 금속정(Intramedullary nail)를 삽입하거나 고정판을 삽입한다. 5) 마지막으로, 금속정이나 고정판을 뼈에 부착하고 고정시킨 뒤 수술 부위를 봉합하고 수술을 마친다¹⁾.

이때, 금속정을 뼈에 부착하는 과정을 금속정 내고정(Intramedullary nailing) 수술이라고 하며 이는 다음과 같이 진행된다. 1) 피부절개 후 Fig. 1(a)와 같이 대퇴부의 Greater Trochanter부근에 구멍을 내서 골수강까지 확장 시킨다. 2) Guide Wire를 근위부의 골수강을 통해서 원위 부의 골수강까지 삽입하여 금속정이 안정적으로 들어갈 수 있도록 한다. 3) Guide Wire를 따라 금속정을 정렬된 뼈의 골수강 내에 삽입시킨다. 4) X-ray 이미지를 통해 금속정의 근위부와 원위부의 나사체결 구멍위치를 확인한 후 Fig. 1(b)와 같이 고정나사를 체결하여 뼈에 금속정을 고정시킨다.

금속정 고정술의 가장 힘들면서 중요한 부분은 원 위부 고

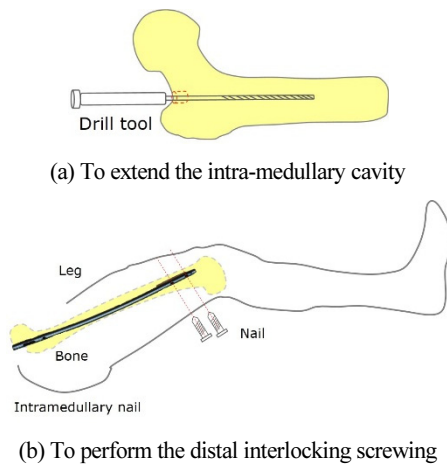
Received : May. 15. 2017; Revised : Oct. 26. 2017; Accepted : Nov. 10. 2017

※ This work has been supported by the National Strategic R&D Program for Industrial Technology (No. 10041605) funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), South Korea

1. Mechanical Engineering, Chonnam National University (lymahn@gmail.com)

2. Mechanical Engineering, Chonnam National University (woo0288@chonnam.ac.kr)

† Corresponding author: Mechanical Engineering, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju, Korea (sko@jnu.ac.kr)



[Fig. 1] Key procedures of distal interlocking screwing

정나사를 금속정의 원 위부 구멍에 정확한 위치에 정확한 방향으로 삽입하는 것이다. 뼈 안에 있는 금속정의 구멍위치를 직접 눈으로 확인할 수 없기 때문에 X-ray를 많이 찍어야 하며, 2차원 X-ray 영상을 기반으로 위치를 예상하여 X-ray 장비를 움직이기에 방향 정렬이 쉽지 않다. 나사체결 방향이 맞지 않을 경우에는 반복작업을 함으로써 골절된 뼈와 연부조직에 손상이 많이 발생하며 X-ray 피폭량이 증가된다²⁾.

환자와 의사의 많은 X-ray 피폭량을 줄이면서 금속정 나사체결 구멍위치와 방향을 정확하게 찾아서 나사를 체결하는 방법에 대한 연구들은 다양한 접근 방법으로 진행되어 왔다^{3,9)}. 먼저, [3] 또는 [4]과 같이 X-ray 영상 이미지를 이용하여 금속정의 나사체결구멍을 획득하는 방법이 있다. 정확도를 높이기 위하여 2개의 서로 다른 방향의 영상을 사용하기도 하는데, 정확한 위치를 얻기 위해서는 정교한 캘리브레이션 작업이 필요하며, X-ray 피폭량을 완전히 제거하지 못하는 단점이 존재한다. Soni et al.은 외부 고정지그를 이용하는 방법을 제시하였는데⁵⁾, 이는 금속정의 끝단에 같은 길이의 막대를 부착하여 인체 밖에서 지그를 통해 구멍위치를 지정하는 방법이다. 하지만 고정도구 연결단에서의 작은 각도에러로 인하여 무시할 수 없는 크기의 구멍 위치에러가 발생하기도 한다. 최근 Distalock, LLC사에서는 금속정 내부로부터 피부 밖으로 드릴링하는 방법을 제시하였다⁶⁾. 삽입된 금속정 내부에서 구멍을 통해 피부 밖으로 드릴링해서 구멍의 위치를 지정하는 방법이다. 피부 밖으로 나온 드릴 끝단을 기준으로 밖에서 다시 드릴링하는 방법이다. 내부에서 밖으로 나올 때 수직방향으로 나오지 않을 수 있고, 피부 조직을 손상시킬 수 있는 문제가 존재한다. 이 외에도, Wong et al.은 코일로 감은 C-shape모양의 전자기장 발생장치를 이용하여 금속정 구멍에서 전압의 변화를 측정하여 구멍의 위치를 예측하는 방법⁷⁾을 제시하였고, Antonini et al.은 전자기장과 마그네틱 센서를 이용한 수동형

방향 결정 장치를 개발하여 성능을 제시하였다⁸⁾. 전자기장을 사용하는 이러한 시스템들은 X-ray 피폭량을 현저히 줄일 수 있지만, 자기장은 주변환경(로봇, 금속 지그 등)에 따라서 쉽게 왜곡되기에 금속정 나사체결 구멍위치의 정밀도가 떨어질 수 있다. 최근에는 광섬유소스를 금속정 안의 나사체결 구멍 위치에 접근시킬 때 빛의 강도를 감지하여 구멍의 위치를 확인하는 방법⁹⁾을 제안하였다. 이 방법은 대략적인 구멍의 위치만 확인이 가능하며 빛의 강도가 약해 피부는 뚫지 못해 피부를 크게 절개하는 단점이 존재한다.

본 연구에서는 고정 틀 변형의 영향을 최소화하고 X-ray 피폭을 최소화하며 외부 자기장 영향을 받는 전자기를 사용하지 않는 광학식 측정장치 기반의 최소침습적 접근방법을 제시하려고 한다. 즉 광학식 측정장치를 이용하여 끝단 마커 기준의 구멍 위치의 관계를 구하고, 시술 중에 구멍 위치를 계산하여 로봇의 드릴링 툴이 구멍과 정확히 정렬하도록 이동하여 의료진이 드릴을 쉽게 하기 위한 가이드를 제공하려 한다.

2. 광학식 측정기반의 금속정 나사체결 구멍위치 획득 알고리즘

2.1 구멍위치 획득

금속정의 나사체결 구멍위치는 골수강 내에 들어가면 확인이 어렵다. 이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 삽입 전 미리 금속정의 노출되는 머리부위에 부착된 금속정 마커(Intra-Medullary (IM) rod Marker)를 기준으로 원위 부의 나사체결 구멍위치를 나타내는 구멍마커(Hole Marker)를 이용하여 원위부 나사체결 구멍위치와 금속정 마커의 상관 관계를 획득하고, Hole Marker를 제거한 상태에서 금속정을 골수강 내에 삽입 후 노출된 IM Marker 기준으로 획득한 구멍위치로 로봇 툴 끝단을 이동시키는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 Fig. 2와 같이 금속정 삽입 전과 삽입 후 작업으로 나누어 나타낼 수 있다.

1) 금속정 삽입 전 작업

Fig. 2(a)는 금속정 삽입 전 그림이다. 주요목적은 IM Marker와 Hole Marker 사이의 상관관계를 구하는 것이다. Hole Marker는 노출되지 않는 금속정 나사체결 구멍에 장착되고, IM Marker는 금속정의 머리부위의 입구에 장착된다. 두 개의 마커를 금속정에 각각 부착시키고 나서 광학식 측정장치(Optical Tracking System-OTS)를 이용하여 각 마커의 위치를 획득하고, 식 (1)과 같이 두 마커의 상관관계를 구한다. 구멍의 좌표계는 구멍의 중심축을 z방향으로 선정하였고, 중심축과

금속정 표면이 만나는 점을 원점으로 선정하였다.

$${}^{IM}_{Hole} T = ({}^{IM}_{OTS} T)^{-1} ({}^{OTS}_{Hole} T) \quad (1)$$

두 마커(Hole Marker, IM Marker)의 상관관계를 구하고 나면, 수술절차에 따라서 금속정에 부착된 두 마커를 빼고 골절된 뼈에 삽입시킨다.

2) 금속정 삽입 후 작업

로봇에 부착된 drill guiding tool의 끝단을 금속정 나사체결 구멍위치에 접근시키기 위해서는 로봇 틀에 끝단 마커(Rtool Marker)를 추가로 부착하였다. Rtool Marker의 원점은 drill guiding tool 끝단에 위치하도록 고정하였고, 틀의 축방향을 z 방향으로 선정하였다. 이 상태에서, 다시 IM Marker를 금속정 끝단에 삽입시킨 뒤, Rtool Marker와 IM Marker의 상관관계를

구하고, 금속정을 삽입하기 전에 구한 IM Marker와 Hole Marker의 상관관계를 이용하여 Rtool Marker와 Hole Marker의 상관관계를 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$${}^{Rtool}_{Hole} T = ({}^{OTS}_{Rtool} T)^{-1} ({}^{OTS}_{IM} T) ({}^{IM}_{Hole} T) \quad (2)$$

다음으로, IM Marker기준위치로부터 로봇을 이동하여 금속정 나사체결 구멍위치를 향해 접근시킨다. 제안된 시스템의 각 요소들의 이름은 Table 1에 정리되어 있다.

2.2 로봇 유도 알고리즘

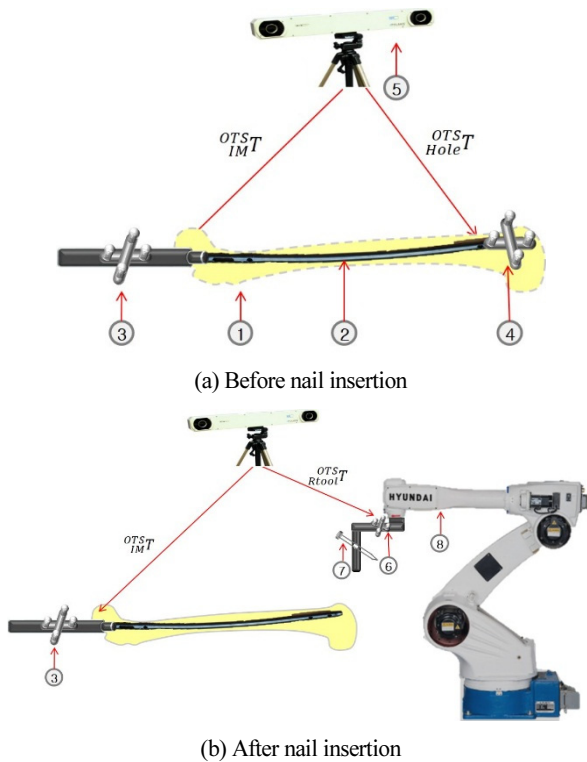
금속정을 고정하기 위한 나사체결 구멍위치를 알아낸 다음 해야 할 일은, 로봇을 이용하여 원 위부 나사체결 가이드를 하는 것이다. 이는 Drill guiding tool 끝단의 위치를 금속정 원위부 나사체결 구멍의 위치와 일치시킴을 의미한다. 이를 수학적으로 표현하면 2.1에서 얻어진 ${}^{Rtool}_{Hole} T$ 가 4x4 단위행렬(identity matrix)로 된다는 의미와 같다.

$${}^{Rtool}_{Hole} T_{des} = \begin{bmatrix} {}^{Rtool}_{Hole} R & {}^{Rtool} P_{Hole} \\ [000] & 1 \end{bmatrix} = I_{4 \times 4} \quad (3)$$

본 연구에서는 로봇이 따라가기 위한 위치와 각도 제어 명령을 독립적으로 생성하였다. Fig. 3은 로봇틱 가이드 제어흐름을 나타내는 블록 다이어그램이다. 광학식측정장치(OTS)에서 IM Marker와 Rtool Marker를 획득하여, ${}^{Rtool}_{Hole} T_{des}$ 를 측정된 뒤, 식(3)의 희망 위치로 가기 위한 로봇의 증분 지령을 생성하게 된다. 나사체결 구멍의 위치까지 도달할 때까지 로봇은 일정한 속도와 각속도를 갖도록 하여 안전성을 향상시켰다.

1) 위치제어

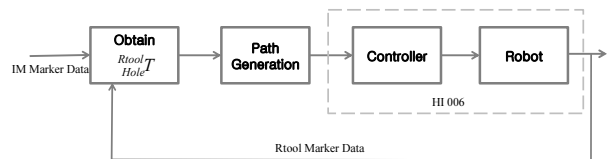
로봇이 금속정 나사체결 구멍위치 접근 과정에서 과도 속도 이동으로 인한 환자와 의사의 다침을 막기 위하여 로봇의 이동속도를 제한하였다. Fig. 4에서 보여준 바와 같이 로봇이 구멍위치로 향하여 이동할 때 필요한 위치(파란색 실선)가 결



[Fig. 2] Conceptual diagram of proposed system

[Table 1] Name of components of proposed system

Index	Name	Index	Name
1	Bone	5	Optical tracking system
2	Intramedullary nail	6	Rtool marker
3	IM marker	7	Drill guiding tool
4	Hole marker	8	Robotic arm



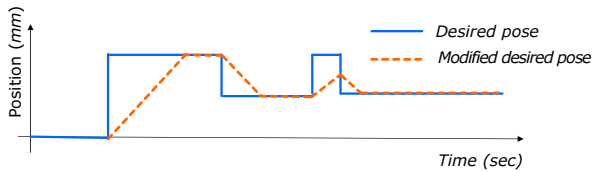
[Fig. 3] Block diagram for robotic guidance

정되면, 최대 속도를 제한하여 수정된 희망 위치(주황색 점선)를 생성하여 로봇 제어에 활용하였다.

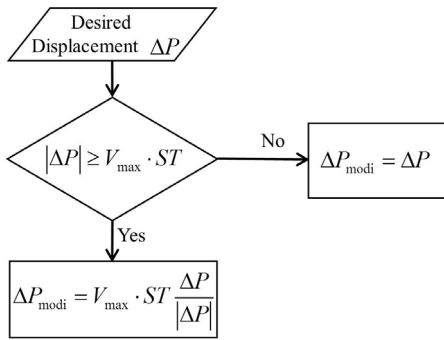
Fig. 5과 같이 로봇 현재 위치(P_1)에서 나사체결 구멍위치(P_2)로 접근할 때, 로봇이 이동할 수 있는 최대 속도를 V_{max} 라 하자. 본 연구에서 사용된 로봇은 일정한 sampling time (ST, 5msec)마다 희망 변위를 제어 입력 신호로 받기 때문에, 본 연구에서는 희망 변위 ΔP_{modi} 를 구하도록 구현하였다. 즉, 희망 변위 $\Delta P = P_2 - P_1$ 가 필요할 때, 그 길이 $|\Delta P|$ 가 $V_{max} \cdot ST$ 보다 크면, Fig. 5와 같이 ΔP_{modi} 를 제한하도록 하고, 작으면 그대로 사용한다.

2) 방향제어

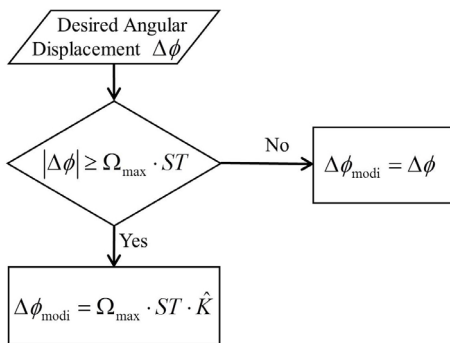
방향제어도 기본적인 개념은 Fig. 6에서 제시하는 바와 같이 앞의 위치제어와 같다. 공간상의 움직임을 고려하기 위



[Fig. 4] Modified desired position with its restricted velocity



[Fig. 5] Algorithm for restriction on maximum velocity



[Fig. 6] Algorithm for restriction on maximum angular velocity

하여, Equivalent angle-axis representation 방법을 활용하였다^[10]. 계산의 간략화를 위하여, 각도 변화는 미소 변위라고 가정하였으며, 최대 각속도는 Ω_{max} 라 하였다. Rtool Marker 기준의 현재의 Hole Marker 위치가 식 (4)과 같이 주어질 때, 미소 변위로 가정하여 Equivalent angle과 해당 axis를 구하면 각각 식 (5)와 (6)으로 표현되며, 회전 변위 $\Delta\phi$ 는 식 (7)과 같이 표현된다. 만약 필요한 로봇의 회전 변위의 길이 $|\Delta\phi|$ 가 $\Omega_{max} \cdot ST$ 보다 크면, 수정된 회전 변위는 $\Delta\phi_{modi} = \Omega_{max} \cdot ST \cdot \hat{K}$ 와 같이 제한되고, 작으면 그대로 사용하게 된다. 이 때 회전의 방향은 \hat{K} 로 유지하였다.

$${}^{R_{tool}}R_{meas} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\Delta\theta = \cos^{-1} \left(\frac{r_{11} + r_{22} + r_{33}}{2} \right) \quad (5)$$

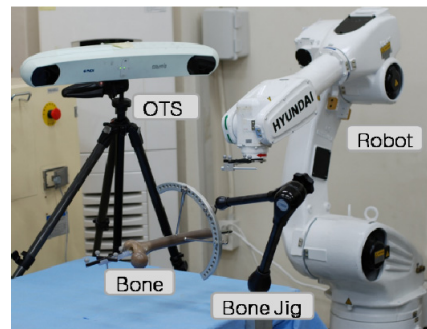
$$\hat{K} = \frac{1}{2\sin\Delta\theta} \begin{bmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\Delta\phi = \Delta\theta \cdot \hat{K} \quad (7)$$

3. 실험 및 검증

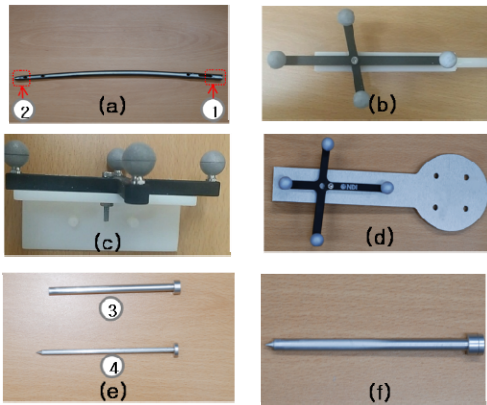
3.1 실험세팅

Fig. 7은 제안된 로봇틱 가이드 시스템을 검증하기 위한 실험 세트이다. 광학식측정장치(OTS), 6자유도 산업용 로봇(현대중공업, HA006), 로봇제어기(현대중공업 Hi5 제어기), 금속 정, 모형 뼈(Sawbones, Co., 대퇴골뼈), 가이드 홀, 마커, 지그로 구성 되어있다. 시스템을 통합적으로 제어하기 위하여, 윈도



[Fig. 7] Experimental setup for robotic guidance system

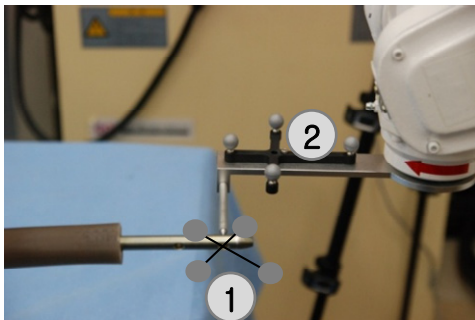
우 PC에서 MFC를 이용하여 C++로 프로그램을 구성하였으며, Hi5 제어가 필요로 하는 5 msec의 주기를 구현하기 위하여 multimedia timer를 이용하였다. Fig. 8은 실험 세트에서 필요한 각 장치를 독립적으로 보여주고 있다. 금속정 삽입 전 설정은 Fig. 9과 같고, Fig. 10은 금속정이 삽입된 상태에서 가이드가 완료된 상태를 나타낸다. 금속정이 인체내에 삽입함으로 인하여 Hole Marker는 직접적으로 금속정에 장착할 수 없기 때문에 우선 IM Marker과 Hole Marker의 상관관계를 구하고 IM Marker 를 장착된 금속정을 인체에 삽입시킨다.



[Fig. 8] Main components: (a) Intramedullary Nail (① Proximal end, ② Distal end), (b) IM Marker, (c) Hole Marker, (d) Rtool Marker, (e) Drill guiding tool(③ Guiding hole, ④ Indication tip), f) Assembled drill guiding tool



[Fig. 9] Intramedullary nail with attachment of IM Marker and Hole Marker



[Fig. 10] Situation when the drill guiding tool and the hole are aligned (① (estimated) Hole Marker, ② Rtool Marker)

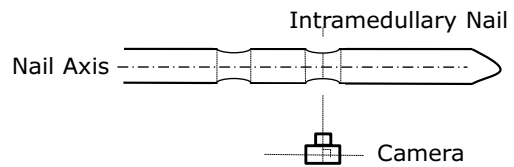
3.2 정확도 측정 방법

본 장에서는 로봇 툴 끝단의 최종위치 및 자세와 금속정의 실제 나사체결 구멍위치와 및 자세 의 에러를 측정하기 위한 방법을 설명하고자 한다.

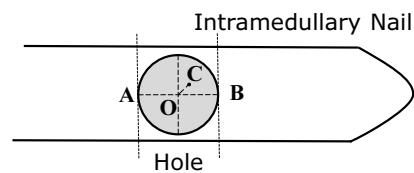
1) 위치 에러

위치 에러를 측정하기 위해서 Fig. 11과 같이 구멍과 수직으로 카메라를 위치시켰다. O는 구멍의 중심, C는 드릴 가이드 툴의 끝단 위치, AB는 구멍의 직경이다. 카메라에서 획득된 이미지에서, 실제 구멍직경(d_{AB_real})과 이미지상 구멍직경(d_{AB_image})의 비와, 실제 드릴 가이드 툴 끝점과 구멍 중심 사이의 거리(d_{OC_real})와 이미지상에서의 드릴 가이드 툴 끝점과 구멍 중심 사이의 거리(d_{OC_image})의 비를 이용하여 아래와 같이 d_{OC_real} 를 구할 수 있고, 이를 위치 에러로 정의하였다. Fig. 11(c)는 실제 실험 세트를 이용하여 촬영된 이미지이다.

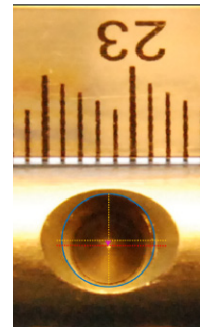
$$P_{error} = d_{OC_real} = \frac{d_{AB_real}}{d_{AB_image}} \times d_{OC_image} \quad (8)$$



(a) Camera position of lateral view



(b) Lateral view from camera

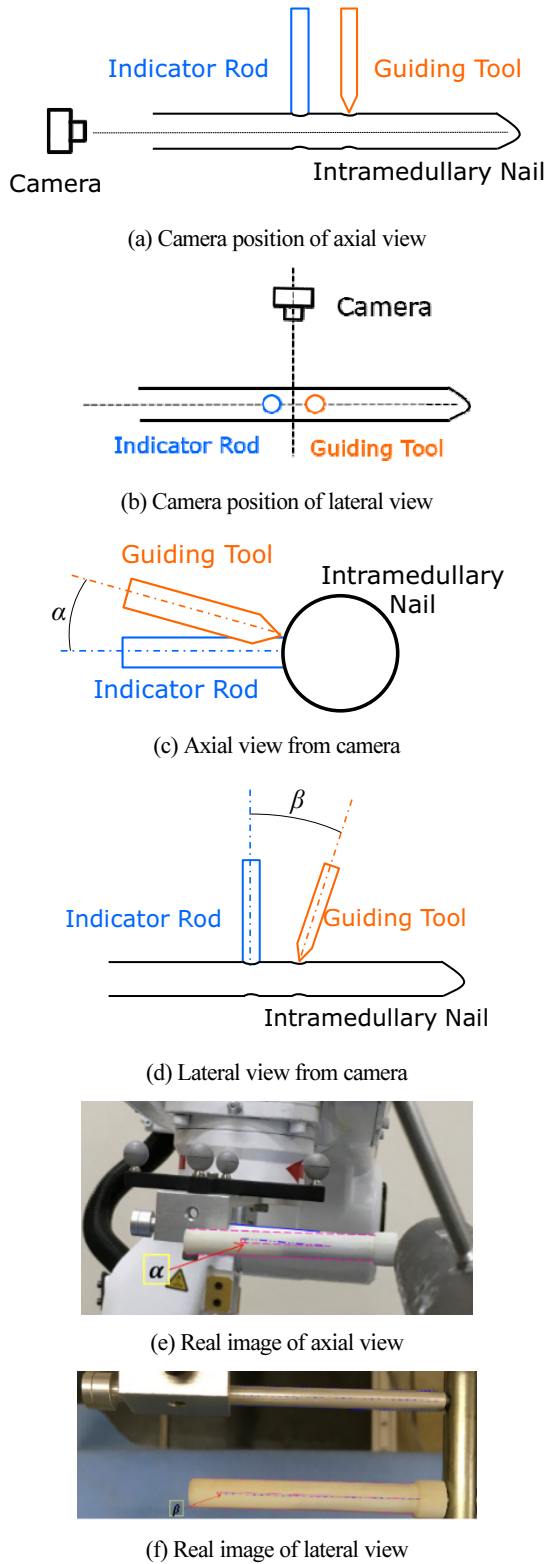


(c) Real image of lateral view

[Fig. 11] Method to measure position error

2) 각도 에러

각도 에러를 구하기 위해서는 Fig. 12(a)와 Fig. 12(b)와 같이 카메라 축이 금속정과 수직이 되도록 정렬하였으며, 보다 정



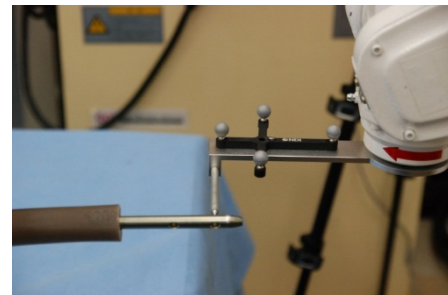
[Fig. 12] Method to measure angular error

확한 측정을 위하여 서로 수직이 되는 두 방향에서 측정하였다. 두 개의 구멍이 평행하기 때문에, 구멍의 축방향을 쉽게 찾기 위하여 indicator rod를 금속정의 두 번째 나사구멍에 삽입시켰다. 이미지상에서 드릴 가이드 툴의 중심축과 indicator rod 중심축이 이루는 각도를 에러각도로 정의하였으며, 아래의 (9)식을 통하여 구할 수 있다. 여기서 α 는 Fig. 12(c)와 같이 axial view에서의 각도 에러, β 는 Fig. 12(d)와 같이 lateral view에서의 각도 에러로 정의하였다.

$$\theta_{error} = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \quad (9)$$

3.3 실험결과

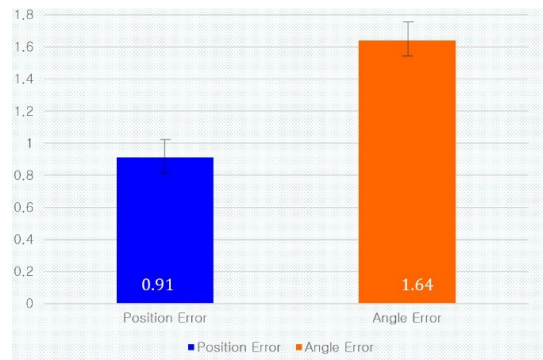
본 장에서는 3.2장에서 제시된 방법을 이용하여 로봇틱 가이드 시스템의 위치 정확도와 방향 정확도를 측정하였다. 초



[Fig. 13] Robotic Guidance System

[Table 2] Position error and angle error

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Avg ± STD
Position Error (mm)	0.74	0.83	1.20	0.94	0.82	0.91±0.18
Angle Error (°)	1.69	1.38	2.01	1.81	1.32	1.64±0.29



[Fig. 14] Position error and angle error

기 위치는 위치 100 mm 이상, 각도 40도 이상 떨어진 위치에서 시작하였으며, 총 5회 반복하였다. Fig. 13은 제안된 방법으로 정렬된 드릴 가이드 톨과 금속정의 위치관계 예시를 보여준다. 총 5회 동안의 실험에서 얻어진 결과는 Table 2와 같으며, 이는 Fig. 14와 같이 그림으로 표현되었다. Fig. 14와 같이 위치에러는 0.91 ± 0.18 mm로 측정되었고, 각도 에러는 $1.64 \pm 0.29^\circ$ 로 측정되었다. 본 논문에서 사용되는 금속정의 체결부 구멍의 직경은 5 mm이고 나사는 직경은 4.5 mm이다. 제시된 값은 기존의 논문들^[7]에서 제시된 정확도(2 mm 및 10° 이하)에 비하여 유사하거나 높은 결과로 나사 체결을 위해 충분한 정확도이다.

4. 결론

본 논문에서는 광학식측정장치를 이용하여 구멍의 위치, 금속정의 끝단 위치, 로봇의 끝단 위치를 측정하여, 금속정이 삽입된 상태에서도 나사체결 구멍의 위치를 계산할 수 있는 간단한 방법을 제시하였다. 이러한 정보를 이용하여 로봇 끝단에 장착된 드릴 가이드 톨을 나사체결 구멍 위치와 정렬시키는 알고리즘을 구현하였으며, 선형 속도 및 각속도를 제한하기 위한 방법을 제시하였다. 산업용 로봇을 이용하여 알고리즘을 검증하였으며, 0.91 mm의 위치오차와 1.64°의 각도오차를 가짐을 확인하였다.

얻어진 결과는 나사체결을 위해서는 충분한 정확도를 보여줬지만, 본 연구는 실제 뼈에 금속정을 삽입하지 않고, 일부만 삽입하여 금속정 구멍이 노출된 상태로 실험을 하였기에, 뼈와 금속정 사이의 상호작용에 의해 발생하는 변형에 기인하는 에러를 포함하지 못한다. 또한, 실제 수술 과정을 진행할 때 발생하는 예상하지 못하는 에러가 추가될 수 있기 때문에, 염소 다리와 같은 실제 뼈를 이용한 동물 실험 등을 통하여 추가 검증을 시도할 예정이다. 금속정 변형에 의한 에러가 발생할 경우, 이러한 에러를 쉽게 보상할 수 있는 메커니즘 또는 로봇 가이드 기술도 개발할 예정이다. 뿐만 아니라 에러를 측정하는 방법도 개선될 수 있다^[11]. 광학 측정 모듈을 부착된 Indicator rod와 로봇의 상대 위치를 측정하는 방법 등이 고려될 수 있다. 최종적으로 본 알고리즘은 현재 개발 중에 있는 골절 정복 수술용 로봇^[12]과 통합되어 정복 작업과 나사체결을 모두 수행할 수 있도록 개발될 예정이다.

References

- [1] S. Warisawa, T. Ishizuka, M. Mitsuishi, K. Yonenobu, N. Sugano, and T. Nakazawa, "Development of a femur fracture reduction robot," *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, New Orleans, LA, April, pp. 3999-4004, 2004.
- [2] P. Patka, "Damaged control and intramedullary nailing for long bone fractures in polytrauma patients," *Injury*, vol. 48, no. supplement 1, pp. s7-s9, June, 2017.
- [3] G.Y. Zheng, X. Zhang, D. Haschtmann, P. Gedet, X. Dong, and L.-P. Nolte, "A Robust and Accurate Two-Stage Approach for Automatic Recovery of Distal Locking Holes in Computer-Assisted Intramedullary Nailing of Femoral Shaft Fractures," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 27, no. 2, pp. 171-187, Feb, 2008.
- [4] M. Oszwald, R. Westphal, R. Stier, R. Gaulke, A. Calafi, C.W. Müller, F. Wahl, C. Krettek, and T. Gösling, "Hands-on robotic distal interlocking in intramedullary nail fixation of femoral shaft fractures," *Technology and Health Care*, vol. 18, no. 4-5, pp. 325-334, Nov, 2010.
- [5] R.K. Soni, S.M. Mehta, B. Awasthi, J.L. Singh, A. Kumar, L. Thakur, and S.K. Tripathy, "Radiation-free Insertion of Distal Interlocking Screw in Tibial and Femur Nailing: A Simple Technique," *Journal of Surgical Technique & Case Report*, vol. 4, no.1, pp. 15-18, 2012.
- [6] Distalock, Llc, [Online], <http://distalock.com/wp/wp-content/uploads/2012/MM03RevFTechnique.pdf>, pp. 19-21, Accessed: May 12, 2017.
- [7] T.H. Wong, T.K. Chung, T.W. Liu, H.-J. Chu, W. Hsu, P.-C. Yeh, C.-C. Chen, M.-S. Lee, and Y.-S. Yang, "Electromagnetic/Magnetic-Coupled Targeting System for Screw-Hole Locating in Intramedullary Interlocking-Nail Surgery," *IEEE Sensor Journal*, vol. 14, no. 12, pp. 4402-4410, Dec, 2014.
- [8] G. Antonini, W. Stuflesser, C. Crippa, and G. Touloupakis, "A distal-lock electromagnetic targeting device for intramedullary nailing: Suggestions and clinical experience," *Chinese Journal of Traumatology*, vol. 19, no. 6, pp. 358-361, Dec, 2016.
- [9] B. Darwish, A. Lotfy, and S. Younes, "Accurate Determination of the Sites of the Distal Hole of the Humeral Interlocking Intramedullary Nail Using Monofilament Solid Core Optical Fiber," *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*, vol. 23, no. 2, pp. 111-122, 2015.
- [10] J.J. Craig, "Introduction to Robotics Mechanics and Control," Third Ed., Pearson Prentice Hall, pp. 46-48, 2005.
- [11] E. Maki, N. Hiroshi, and H. Yutaka, "Fracture surgery support system with robustness for bones by using eddy current," *IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics*, pp. 1907-1912, 2007.
- [12] W.Y. Kim, S.Y. Ko, J.O. Park, and S. Park, "6-DOF force feedback control of robot-assisted bone fracture reduction system using double F/T sensors and adjustable admittances to protect bones against damage," *Mechatronics*, vol. 35, pp. 136-147, 2016.



An Liming

2013 연변대학 과학기술학원(공학사)
2014~현재 전남대학교 기계공학부 대학원 석사과정

관심분야: 관심분야: 의료용 로봇제어



김 우 영

2000 전남대학교 물질화학공학과(공학사)
2002 전남대학교 메카트로닉스협동과정 (공학석사)
2017 전남대학교 기계공학과(공학박사)
2017~현재 전남대학교 기계공학과 Meric Lab 연구원

관심분야: HRI, Medical Robotics, Advanced Control



고 성 영

2000 KAIST 기계공학과(공학사)
2002 동 대학원 (공학석사)
2008 동 대학원 (공학박사)
2008 KAIST 전기공학부 박사후 연구원
2009~2011 Imperial College London UK, Mechatronics-In-Medicine Lab에서 연구원
2011~현재 전남대학교 기계공학부 조교수/부교수

관심분야: 의료용 로봇, 지능형 제어, HRI