

초음파 센서기반 추적 알고리즘을 이용한 자동 수술 조명 로봇 시스템

최동걸¹, 이병주¹, 김영수²

¹한양대학교 공과대학 전자컴퓨터 공학부

²한양대학교 의과대학 의학과

(Received March 19, 2007. Accepted May 8, 2007)

Implementation of Auto Surgical Illumination Robotic System Using Ultrasonic Sensor-Based Tracking Algorithm

Dong Gul Choi¹, Byung-Ju Yi¹, Young Soo Kim²

¹School of Electrical Engineering and Computer Science, Hanyang Univ., Korea

²Department of Medicine, Hanyang Univ., Korea

Abstract

Most surgery illumination systems have been developed as passive systems. However, sometimes it is inconvenient to relocate the position of the illumination system whenever the surgeon changes his pose. To cope with such a problem, this study develops an auto-illumination system that is autonomously tracking the surgeon's movement. A 5-DOF serial type manipulator system that can control (X, Y, Z, Yaw, Pitch) position and secure enough workspace is developed. Using 3 ultrasonic sensors, the surgeon's position and orientation could be located. The measured data are sent to the main control system so that the robot can be auto-tracking the target. Finally, performance of the developed auto-illuminating system was verified through a preliminary experiment in the operating room environment.

Key words : index terms tracking, illumination robot, ultra sonar sensor

1. 연구 배경

수술방에서 중요한 요소 중에 하나는 조명등이다. 그래서 이것에 들어가는 모든 등을 무영등으로 구성할 만큼 그림자를 없애는 문제는 중요하다. 그러나 현재의 수술 조명등은 그림자를 확실하게 없애줄 수 없고 수동적이다. 그래서 수술하는 사람이 적절한 방향, 빛의 세기와 위치 등을 수술 중에 직접 조절 해 주어야 한다. 이런 과정은 수술하는 사람을 방해하고 수술에 집중 할 수 없게 한다. 최근에는 이러한 불편한 점을 개선하기 위해 많은 여유 자유도를 가지고, 빛의 세기와 초점을 간단한 버튼 조작만으로 컨트롤 할 수 있

는 새로운 조명 시스템들이 개발되었다. 이와 같은 시스템들은 많은 기능이 있는데 전구가 고장 날 때를 대비한 여분의 전구, 높은 열이 발산 하는 것을 막아주기 위한 필터, 카메라 시스템 등이다.[1]

그러나 이러한 새로운 시스템도 역시 수동적인 타입이다. 그래서 본 논문에서는 초음파 센서를 이용한 자동 추적 수술 로봇 시스템을 개발한다. 인체나 사물에 대한 자동 추적에 관해 많은 기술들이 개발 되고 있는데 스테레오 카메라를 이용한 비전 시스템[2-4]이나 레이저나 그 밖의 센서를 이용한 위치파악 기술 등이다. 본 논문에서는 초음파 센서를 이용해 추적 알고리즘을 구현한다. 자동 수술 조명 로봇은 5 자유도 직렬구조 시스템이며 (X, Y, Z, Yaw, Pitch) 위치를 제어할 수 있고 충분한 구동범위를 가진다. 그리고 사용자의 움직임을 측정하는 센서구성은 4개의 초음파 발신센서, 3개의 초음파 수신센서, 1개의 RF 동조기가 사용된다. 이 센서 퍼 키지는 타겟의 위치와 방향을 측정된 데이터로부터 얻는다. 측정된 데이터는 블루투스 모듈을 통해 메인 컨트롤러로 보내지게 되고 로봇이 자동으로 타겟을 추적할 수 있게 된다.

This research was supported by the "GRRC" project of Gyeonggi Provincial Government, Republic of Korea.

Corresponding Author : Byung-Ju Yi, Ph.D.

School of Electrical Engineering and Computer Science Hanyang University Korea

Tel : 82-31-400-5218 / Fax : 82-31-416-6416

E-mail : bj@hanyang.ac.kr : http://robotics.hanyang.ac.kr

II. 본 론

A. 5자유도 직렬타입 로봇의 기구학

본 논문에서는 그림1 에서와 같이 조인트 5개와 링크 3개로 구성된 수술 조명 로봇 시스템을 제안한다. 2번째 조인트와 3번째 조인트는 서로 겹쳐있고 기구의 말단은 5번째 조인트에 붙어있다. 이 수술 조명 로봇은 3개의 위치와 2개의 방향을 제어한다.

B. 조명 로봇 시스템의 기구학

수술 조명 로봇의 정 기구학 식은 Denavit-Hartenberg 방식에 의해 구해진다

$${}^0_5T = Rot(Z, \theta_1) Trans(X, L_1) Rot(Z, \theta_2) Rot(Z, \theta_3) Trans(Z, -L_2) Rot(X, \theta_4) Trans(Z, -L_3) Rot(Y, \theta_5) \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_X \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_Y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0_5R & P_X \\ & P_Y \\ & P_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

여기서

$${}^0_5R = \begin{bmatrix} c_{12}c_5 - s_{12}s_{34}s_5 & -s_{12}c_{34} & c_{12}s_5 + s_{12}s_{34}c_5 \\ s_{12}c_5 + c_{12}s_{34}s_5 & c_{12}c_{34} & s_{12}s_5 - c_{12}s_{34}c_5 \\ -c_{34}s_5 & s_{34} & c_{34}c_5 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$P_X = -L_3 s_{12} s_{34} - L_2 s_{12} s_3 + L_1 c_1, \quad (3)$$

$$P_Y = L_3 c_{12} s_{34} + L_2 c_{12} s_3 + L_1 s_1, \quad (4)$$

그리고

$$P_Z = -L_3 c_{34} - L_2 c_3, \quad (5)$$

시스템의 역기구학을 찾기 위해서 Z-X-Y 오일러 각도 셀

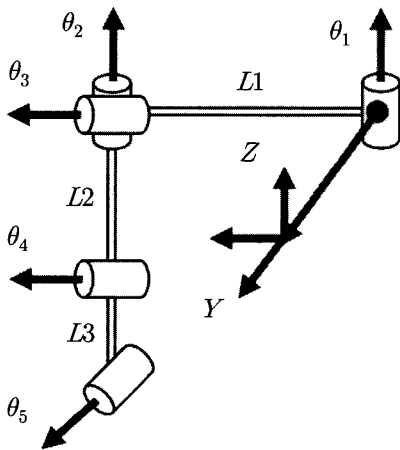


그림 1. 5자유도 수술 조명 로봇 모델
Fig. 1. 5-DOF surgical illumination robot model

B_7R 과 회전행렬 0_5R 이 비교된다. [5] 그리고 회전각도 α 와 β 를 유도해 낸다. 말단 프레임의 회전 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$${}^B_7R = [Rot(z, \gamma)][Rot(x, \alpha)][Rot(y, \beta)]$$

$${}^0_5R = \begin{bmatrix} -s_\gamma s_\alpha s_\beta + c_\gamma c_\beta & -s_\gamma c_\alpha & s_\gamma s_\alpha s_\beta + c_\gamma s_\beta \\ c_\gamma s_\alpha s_\beta + s_\gamma c_\beta & c_\gamma c_\alpha & -c_\gamma s_\alpha c_\beta + s_\gamma s_\beta \\ -c_\alpha s_\beta & s_\alpha & c_\alpha c_\beta \end{bmatrix}, \quad (6)$$

식 (2)와 (6)을 서로 비교하면

$$r_{32} = s_\alpha \quad \text{그리고} \quad r_{33} = c_\alpha c_\beta \quad (7)$$

그러므로

$$\alpha = \theta_3 + \theta_4 \quad \text{그리고} \quad \beta = \theta_5. \quad (8)$$

다음엔, 식 (5)를 이용해서 θ_3 을 찾는다. P_Z 은 입력 값 이므로, 우리는 이 식에서 C_3 하나만 모르게 된다. 그러므로 아래 두 식에서 θ_3 값을 얻게 된다.

$$C_3 \frac{P_Z + L_3 C_{34}}{-L_2}, S_3 = \pm \sqrt{1 - C_3^2}. \quad (9)$$

$$\theta_3 \tan^4 \left(\frac{S_3}{C_3} \right) \quad (10)$$

θ_4 는 아래와 같다.

$$\theta_4 = \alpha - \theta_3 \quad (11)$$

θ_2 값을 찾기 위해 말단의 위치 P_X P_Y 값을 각각 제공해서 서로 더하면

$$P_X^2 + P_Y^2 = (L_3 S_{34} + L_2 S_3)^2 + L_1^2 - 2(L_3 S_{34} + L_2 S_3)L_1 S_2. \quad (12)$$

윗 식에서 $(L_3 S_{34} + L_2 S_3)$ 를 a 라 놓고, S_2 와 C_3 는 아래와 같이 정의된다.

$$S_2 \frac{P_X^2 + P_Y^2 - a^2 - L_1^2}{-2aL_1}, C_2 = \pm \sqrt{1 - S_2^2}, \quad (13)$$

마지막으로,

$$\theta_2 = \tan^4 \left(\frac{S_2}{C_2} \right) \quad (14)$$

ac_2 를 A 라 놓고 $L_1 - as_2$ 를 B 라 놓자. 그렇다면

$$P_X = -A \sin \theta_1 + B \cos \theta_1 \quad \text{그리고}$$

$P_Y = B \sin \theta_1 + A \cos \theta_1$ 이다. P_X 와 $P_Y \left(\frac{A}{B} \right)$ 을 서로 더해서 S_1 부분을 없애면

$$P_X + P_Y \left(\frac{A}{B} \right) = C_1 \left(B + \frac{A^2}{B} \right) \quad (15)$$

이다. 그래서, θ_1 은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$C_1 = \frac{P_X + P_Y \left(\frac{A}{B} \right)}{\left(B + \frac{A^2}{B} \right)}, S_1 = \pm \sqrt{1 - C_1^2}, \quad (16)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{S_1}{C_1} \right). \quad (17)$$

C. 자동 추적을 위한 초음파 센서

로봇 움직임의 자동 추적을 위해서 위치 인식은 매우 중요하다. 자동 수술 조명 시스템에서는 의사 머리에 의해서 생기는 그림자를 제거하기 위해 전역 좌표계에 대한 수술자의 머리 위치와 회전 각도를 얻어야 한다. 이러한 위치 정보를 얻는 방법이 많이 개발되었다. 그중 가장 많이 사용되는 기술은 스테레오 카메라를 이용한 3D 이미지 프로세싱이다. 그러나 이것은 매우 비싸고 적용하기 힘들다. 따라서 본 논문에서는 보다 싸고 사용하기 쉬운 초음파 센서를 이용한다.

U-SAT사에서 만든 초음파 센서는 그림 2 에서와 같이 4개의 초음파 발신센서와 3개의 초음파 수신센서, 1개의 RF 동조 신호기로 구성된다. 초음파 발신센서들과 RF 동조 신호기는 수술방에 고정되어 있으며 초음파 수신센서들은 위치 정보를 얻고 싶은 위치에 부착시킨다.

그림 3은 수술 조명 시스템에 센서들의 위치, 전역 좌표계와 지역 좌표계들을 표시한 그림이다. 발신위성들은 수술방의 네 모서리에 위치하게 된다. 그리고 수신센서는 수술자의 머리에 부착한다. 수신센서는 발신센서로부터 초음파의 도착시간을 측정해 자신의 위치를 계산한다. {U}는 전역 좌표계를 표시하고, {R}는 로봇 좌표계, {E}는 로봇의 말단에 대한 좌표계, {B}는 수술자의 머리 대한 좌표계이다.

Table 1 은 수신위성의 특성을 나타낸다. 수신센서의 숫자는 측

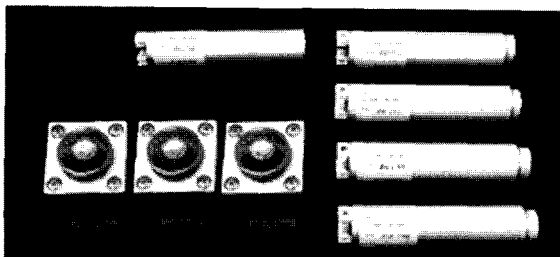


그림 2. 초음파 센서들의 구성

Table 1. 수신위성의 특성

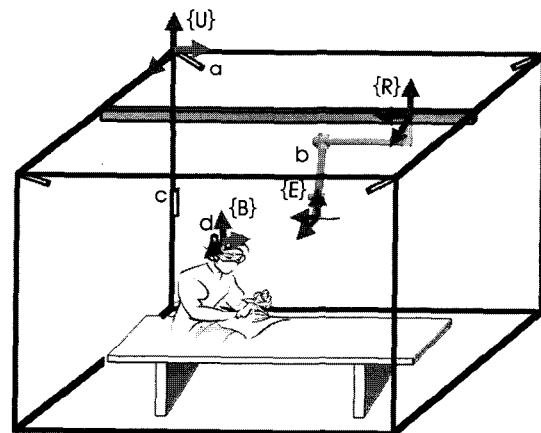
Voltage	9V
Current	100mA Typ. 150mA Max
Interface	RS-232 D-SUB 9P
Baud Rate	115.2K
Cover Territory	7m×7m
Output data	ASCII Distance to transmitter satellite, X,Y,Z Coordinates
Input Trigger	10us

정 가능한 자유도와 관계가 있다. 이 논문에서는 수술자 머리의 3개 회전 각도를 측정하기 위해 3개의 수신위성을 사용했다. 이 세 개의 수신위성들은 그림 4에서와 같이 정삼각형 모양으로 의사의 머리에 위치한다. 마지막으로 우리는 전역 좌표계 {U}에 대한 삼각 좌표계 {B}의 회전행렬을 계산한다.

전역 좌표계 {U}는 발신위성의 좌표계이다. 전역 좌표계의 점 O는 첫 번째 발신위성의 위치이고 시스템의 원점이다. 세 개의 수신위성들은 삼각형의 꼭지점인 A_1, A_2 그리고 A_3 위치에 있고, 각각 자신의 위치를 계산한다. 그리고 세 개의 단위 벡터로 이루어져 있는 삼각 좌표계의 회전행렬 ${}^U_B R$ 이 계산된다.

$${}^U_B R = \begin{bmatrix} u & v & w \\ u_1 & v_1 & w_1 \\ u_2 & v_2 & w_2 \\ u_3 & v_3 & w_3 \end{bmatrix} \quad (18)$$

각각의 벡터 u, v, w 의 값들은 다음과 같다.



(a) 초음파 발신센서
(b) 수술조명로봇
(c) RF 동기신호발생기
(d) 초음파 수신센서

그림 3. 자동추적 수술조명을 적용한 수술방의 환경
Fig. 3. Operating room with auto-tracking equipment

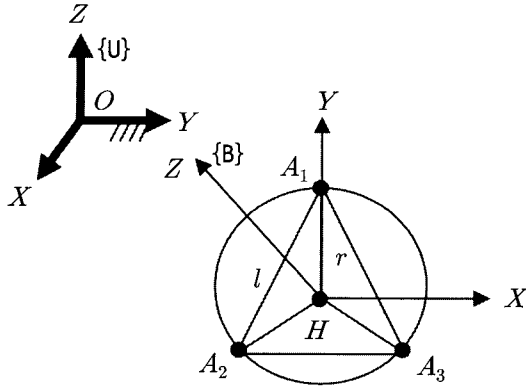


그림 4. 전역좌표계와 삼각좌표계
Fig. 4. Global and local coordinates

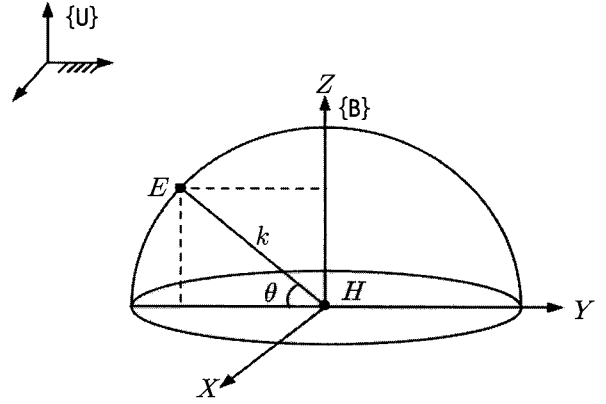


그림 5. 수술조명등의 최적 위치
Fig. 5. Optimal position of surgical illuminating light

$$\begin{aligned} \underline{u} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(A_3 - A_2), \\ \underline{v} &= \frac{1}{r}(A_1 - H), \\ \underline{w} &= \underline{u} \times \underline{v}. \end{aligned} \tag{19}$$

삼각형의 가운데 위치는 다음의 식으로부터 얻어진다.

$$H = \frac{1}{3}(A_1 + A_2 + A_3). \tag{20}$$

말단 프레임 회전행렬 ${}^t_b R$ 는 $X-Y-Z$ fixed angles에 의해 나오게 된다.

$$\begin{aligned} {}^t_b R &= [Rot(x, \gamma)][Rot(y, \alpha)][Rot(z, \beta)] \\ &= \begin{bmatrix} c_\alpha c_\beta & c_\alpha s_\beta s_\gamma - s_\alpha c_\gamma & c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma \\ s_\alpha c_\beta & s_\alpha s_\beta s_\gamma + c_\alpha c_\gamma & s_\alpha s_\beta c_\gamma - c_\alpha s_\gamma \\ -s_\beta & c_\alpha s_\gamma & c_\beta c_\gamma \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{21}$$

말단 프레임 회전행렬 ${}^t_b R$ 는 삼각 좌표계의 회전행렬 ${}^U_B R$ 와 같다는 것으로부터 세 개의 고정각도 α, β, γ 는 아래와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} s_\beta &= -u_3, c_\beta = \sqrt{1 - s_\beta^2} \\ \beta &= \tan^{-1}\left(\frac{s_\beta}{c_\beta}\right), \end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned} s_\gamma &= \frac{v_3}{c_\beta}, c_\gamma = \frac{w_3}{c_\beta}, \\ \gamma &= \tan^{-1}\left(\frac{s_\gamma}{c_\gamma}\right), \end{aligned} \tag{23}$$

$$\begin{aligned} s_\alpha &= \frac{u_2}{c_\beta}, c_\alpha = \frac{u_1}{c_\beta}, \\ \alpha &= \tan^{-1}\left(\frac{s_\alpha}{c_\alpha}\right). \end{aligned} \tag{24}$$

그리고

그림 4에서의 정의된 좌표시스템의 페 루프 관계는 다음과 같이 표현된다.

$${}^U_B R = {}^U_A R {}^A_E R {}^E_B R. \tag{25}$$

${}^U_B R, {}^U_A R, {}^A_E R$, 들은 측정된 값으로부터 얻을 수 있으며 로봇의 말단 좌표계 {E}로부터 삼각 좌표계 {B}까지의 변환행렬 ${}^E_B R$ 은 다음과 같이 표현된다.

$${}^E_B R = {}^U_B R {}^U_A R^{-1} {}^A_E R^{-1}. \tag{26}$$

변환행렬 ${}^A_E R$ 와 ${}^U_B R$ 는 식 (2)와 식 (21)과 같고, 전역 좌표계부터 로봇 좌표계까지의 회전행렬은 다음과 같이 주어진다.

$${}^U_A R = \begin{bmatrix} \cos(-90^\circ) & -\sin(-90^\circ) & 0 \\ \sin(-90^\circ) & \cos(-90^\circ) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{27}$$

초음파 센서들로부터 측정된 데이터들을 블루투스 모듈을 통해 주 제어기에 전해지면 위의 알고리즘과 역 기구학식 (6) ~ (17)을 거쳐서 수술자의 머리 위치, 각도 정보들과 조명 로봇의 각도 값들을 구할 수 있다.

D. 수술조명등의 이상적인 위치

본 절에서는 수술 조명 로봇의 최적의 위치에 대하여 논하고자

한다. 가장 중요한 것은 수술자의 안전이다. 안전을 유지하기 위해, 로봇은 어떤 경우에도 수술자의 머리와 부딪치지 않는 위치에 있어야 한다. 그러기 위해 로봇 말단은 수술자의 머리로부터 항상 일정한 거리를 유지해야만 한다. 또한 가장 최적의 조명을 비추기 위해 적절한 각도를 유지해야 한다. 그림 5는 로봇 말단 E가 의사의 머리를 중심으로 하는 반구를 보여준다. 만약 로봇의 위치가 이 반구 안으로 들어가면 들어간 거리에 비례해서 로봇에 반발력이 작용하게 한다. 따라서 로봇 말단은 언제나 반구의 표면에 위치를 유지하게 된다.

수술자의 머리 중심의 위치를 H라고 정의하고 수술조명의 말단을 E라고 정의하자. 그리고 수술자 머리 좌표계 {B}에 대한 각각의 위치를 $[{}^B X_H, {}^B Y_H, {}^B Z_H]$ 와 $[{}^B X_E, {}^B Y_E, {}^B Z_E]$ 로 한다. H의 위치에 대한 E의 위치는

$$\begin{aligned} {}^B X_E &= {}^B X_H \\ {}^B Y_E &= {}^B Y_H - k \cos \theta \\ {}^B Z_E &= {}^B Z_H - k \sin \theta \end{aligned} \quad (28)$$

여기서 거리 k는 두 가지 요소들로 인해 결정된다. 첫 번째 요인은 로봇의 속도이다. 로봇의 속도가 0.1m/s 이고 수술자의 반응속도가 약 10초 라고 가정하면, k는 1m가 된다. 두 번째 요소는 빛의 세기이다. k가 클수록 빛의 세기가 줄어든다. 그러므로, 시스템 적용 전에 적절한 빛의 세기를 결정해야 한다. 수술자의 머리 좌표계에 대한 수술 조명 말단의 위치가

$${}^B E = \begin{bmatrix} X_E \\ Y_E \\ Z_E \end{bmatrix} \quad (29)$$

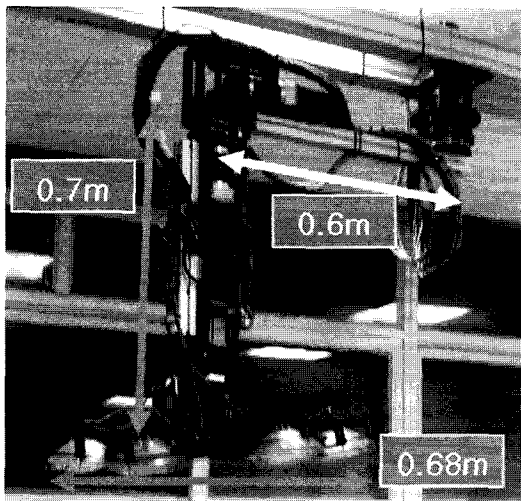


그림 6. 5자유도 직렬타입 수술조명 로봇
Fig. 6. 5-DOF serial type surgical illuminating robot



Fig. 7. Bluetooth module (Promi SD202)

일 때, 전역 좌표계에 대한 수술조명 말단의 위치는이다.

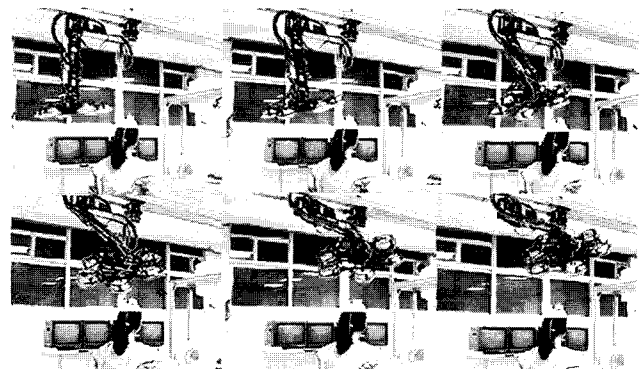
$${}^U E = {}^U P_{EORG} + {}^U R^B E \quad (30)$$

마지막으로 각도 θ 는 의사 머리로 인해 그림자가 생기지 않는 각도로 결정되어야 한다. 따라서 θ 는 수술자와 수술 환경에 따라 바뀔 수 있다.

III. 기구의 구현

A. 5자유도 직렬타입 수술 조명 로봇

그림 6은 5자유도 조명로봇의 개발된 모습을 보여준다. 조명 로봇은 천장에 설치된 레일에 매달려 수술자의 머리 위에 위치한다. 측정된 수술자 머리 위치와 각도에 따라 로봇이 수술자의 움직임



(a) 수술자가 수술대의 모서리 부분에 위치



(b) 수술자가 수술대의 가운데 부분에 위치

그림 8. 각각의 위치에서의 수술조명의 움직임
Fig. 8. Motion of illuminating robot

을 추적한다. 로봇이 움직일 때는 수술자의 안전을 위해 항상 일정한 거리를 유지한다.

그림 7은 수술자의 머리에 있는 센서로부터 얻어진 데이터를 메인 콘트롤 부로 보내주는 블루투스 모듈이다.

B. 조명 로봇의 실험

우리는 초음파 센서를 사용해서 자동 추적 수술 조명 로봇 시스템에 대한 실험을 수행했다. 그림 8은 의사의 움직임에 따라서 조명 로봇이 성공적으로 위치와 각도를 바꾸는 것을 보여준다.

IV. 결 과

이 연구의 목적은 수술자가 수술 중에 움직임으로 인해서 생기는 그림자를 효과적으로 제거해 주기 위한 조명 로봇의 개발이다. 본 연구에서는 초음파 센서에 의한 위치정보를 활용해서 의사의 머리를 자동으로 추적하는 5자유도 직렬 구조 조명 로봇을 개발하였고, 모의 수술환경에서 성공적으로 실험을 수행하였다.

참고문헌

- [1] S.G. Lee, *Integrated Software Development & Surgical Environment Automation For Computer-Integrated Surgery system*, Seoul, Korea: Hanyang Univ, pp. 40-52, 2005.
- [2] J.W. Malefijt, "Image_guided surgery of the spine," *Medical Mundi*, vol. 42, pp. 38-43, 1998.
- [3] K. Kurihara, S. Hoshino, K. Yamane, and Y. Nakamura, "Optical motion capture system with pan-tilt camera tracking and real time data processing," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1241-1248, May 2002.
- [4] S.L. Dockstader, and A.M. Tekalp, Multiple camera tracking of interacting and occluded human motion, *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no, 10, pp. 1441-1455, 2001.
- [5] J.J. Craig, *Introduction to Robotics Mechanics and Control*, Addison - Wesley Publishing Company, pp. 442-444, 1955.