두개골 천공을 위한 NeuroMate 로봇의 경로 제어

정연찬*

(Manuscript received: Jan, 7, 2013 / Revised: Feb, 18, 2013 / Accepted: Feb, 20, 2013)

Path Control for NeuroMate Robot in a Skull Drilling System

Yun-Chan Chung*

Abstract

This paper presents a linear path control algorithm for NeuroMate robot in a skull drilling system. For the path control inverse kinematics of the robot is analyzed and a linear interpolation algorithm is presented. A geometric approach is used for solving inverse kinematic equations for the robot. Four feasible solutions are found through the approach. The approach gives geometric insights for selecting the best solution from the feasible solutions. The presented linear interpolation algorithm computes a next position considering current velocity and remaining distance to the target position. Presented algorithm is implemented and tested in a skull drilling system.

Key Words : Skull drilling(두개골 천공), NeuroMate robot(뉴로메이트 로봇), Inverse kinematics(역기구학), Path control(경로 제어), Linear interpolation(선형 보간)

1. 서론

뇌 속의 종양 제거 등과 같은 뇌 수술을 위해 인체의 두개골에 구멍을 뚫는 일이 필요하다. 이 논문은 두개골 천공 로봇 시스템 개발⁽¹⁾을 위해 고안한 로봇의 경로 제어 방법을 소개한다. 로봇의 경로 제어를 위해 로봇의 역기구학을 도식적으로 해석하고 로봇의 동작을 선형으로 보간하는 방법을 고안하였다.

일반적으로 다관절 로봇의 동작은 관절각(joint angles)으로 제어된다. 로봇의 관절을 특정한 각도만큼 회전했을 때 직교좌표계에서 로봇 말단장치(end-effector)의 위치는 단순한 행렬의 곱으로 쉽게 계산할 수 있다. 그러나 말단장치를 어떤 특정한 위치로 움직이고 싶을 때 로봇의 각 관절을 얼마나 회전해야 하는지 계산하는 것은 간단하지 않다. 삼각함수의 곱으로

이루어진 비선형 연립 방정식을 풀어야 하기 때문이다. 이 문제를 해결하는 것을 역기구학(inverse kinematics) 해석이라 하는데 역기구학 해석 방법은 크게 수치적인 방법과 해석적 방법(analytic)이 있다. 수치적인 방법은 반복적인 계산을 수행하기 때문에 일반적으로 해석적 방법에 비해 계산량이 많다. 해석적 방법에는 대수적(algebraic) 방법과 도식적(geometric) 방법이 있다⁽²⁾.

두개골 천공 시스템에 사용된 NeuroMate 로봇을 사용하는 기존의 다른 시스템들은 대수적인 방법으로 역기구학을 해석하고 있었다. 이 방법은 16개의 가능 해를 얻고 관절의 한계 값과 현재 값 등을 고려해서 해를 선택한다. 기존의 시스템들은 주로 사람이 개입하는 추종 동작(compliance motion) 방법으로 NeuroMate 로봇을 사용하였기 때문에 역기구학 해석이 크

* 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉로 232

✉ Corresponding Author E-mail: ychung@seoultech.ac.kr

게 중요하지 않았다. 그러나 이 방법은 도식적 방법에 비해 로봇의 기하학적인 자세와 작업 대상물의 위치 등을 고려하기 어려워 부적절한 해를 선택할 가능성이 크다. 이 연구에서는 로봇의 기하학적인 이해와 직관적인 해의 선택을 위해 도식적인 방법으로 NeuroMate 로봇의 역기구학을 해석하였다.

로봇의 동작을 제어하는 방식은 크게 지점간(point-to-point) 제어와 경로(path) 제어로 나눌 수 있다⁽³⁾. 지점간 제어는 목표점까지 이동 궤적을 제어하지 않는다. 수술에 사용되는 로봇 시스템은 안전을 위해 항상 모든 동작이 예측 가능해야 한다. 이 연구에서는 지점간 동작 명령을 선형 보간해서 직선 경로로 제어하는 방법을 제시하였다.

역기구학 해석은 다양한 연구가 있으며 이론적으로 잘 정립된 방법이 있다. Tutunea-Fatan과 Feng은 두 개의 회전축으로 구성된 5축 가공기에 대해 일반화된 좌표변환 관계를 제시하였다⁽⁴⁾. Lee와 She는 대표적인 세 종류의 5축 가공기 모델의 역기구학 방정식을 제시하였다⁽⁵⁾. 그러나 5축 다관절 로봇인 NeuroMate의 경우 널리 사용되는 로봇이 아니라 도식적 방법의 역기구학 해석을 찾을 수 없었다.

로봇의 경로 제어와 선형 보간 제어도 다양한 연구가 있었다. 정원지 등은 3축 SCARA 로봇의 이중 모션을 제어하는 알고리즘을 제시하였다⁽³⁾. Shpitalni 등은 CNC 공작기계의 실시간 곡선 보간 방법을 제시하였다⁽⁶⁾. 장치의 최대 속도와 최대 가감속도를 고려해서 사다리꼴의 속도 선도를 만들고 속도 선도를 따라 위치를 제어하는 것이 일반적인 방법이다. 그러나 이 연구에서 사용하는 NeuroMate의 경우 말단 장치에서 요구되는 속도와 가감속도에 상응하는 관절의 회전 속도 및 가감속도를 얻기 어려운 경우가 많았다.

이 연구에서는 NeuroMate 로봇의 역기구학을 도식적인 방법으로 해석하고 그것을 이용해서 공구 경로를 선형으로 제어하는 방법을 제시한다. 다음 절에서는 사용된 NeuroMate 로봇과 전체적인 시스템의 제어 흐름을 설명한다. 이후에 역기구학 해석과 선형 경로 제어 방법을 제시한다.

2. 두개골 천공 로봇 개요

2.1 두개골 천공 로봇 시스템

이 연구에서 개발하려는 두개골 천공 로봇 시스템은 로봇이 자동으로 두개골에 구멍을 뚫는다. 로봇의 공구 경로는 수술 전 계획(preoperative planning)에서 미리 만들어진다. 공구 경로는 공구가 움직여 갈 각 지점의 위치와 공구의 자세로 정의된다. 수술 중에는 사람의 개입을 최소화하여 로봇이 자동으로 미리 계획된 경로를 움직여 두개골에 구멍을 뚫는다. 전체적인 두개골 천공 로봇 시스템은 저자의 논문⁽¹⁾에서 찾아볼 수 있다.

두개골 천공 로봇 시스템의 제어 소프트웨어 시스템은 Fig.

1에서 보듯이 Robot Task, Control Task, Main Task로 구성된다. 전체적인 시스템 구성은 Xia 등의 연구⁽⁷⁾에서 사용한 것과 유사하지만 공구 경로 제어를 위해 역기구학 해석과 선형보간 제어 등을 새로 개발하였다. Robot task는 Controller Area Network (CAN) bus⁽⁸⁾를 통해 로봇과 통신을 담당한다. 로봇의 관절각 신호를 주고 받으며 로봇을 관절각 수준에서 제어한다. Control task는 로봇을 명령어 차원에서 제어한다. 직교좌표계의 특정 위치로 로봇을 움직이거나, 힘 센서 인터페이스를 통한 추종 동작(compliance motion)을 제어한다. Robot task와 Control task는 실시간으로 제어된다. Main task는 GUI를 처리해서 Control task에 보낼 명령어를 생성한다.

구현된 제어 소프트웨어 시스템은 공개 소프트웨어인 cisstr 라이브러리⁽⁹⁾를 사용한다. 시스템은 리눅스 운영체제에서 실행되며, 실시간 응용프로그램 인터페이스인 RTAI⁽¹⁰⁾를 사용하여 실시간 제어를 구현하였다. GUI는 FLTK⁽¹¹⁾를 사용해서 구현되었다.

2.2 두개골 천공을 위한 경로 제어

두개골 천공을 위한 로봇의 경로 제어 흐름은 Fig. 2와 같다. 두개골 천공을 위한 공구 경로 파일을 읽어서 움직여 갈 다음 목표점 P_g 를 정한다. 로봇 말단에 장착된 공구의 끝점을 현재점 P_c 에서 목표점 P_g 로 직선으로 이동한다. 공구 끝점을 직선 이동하기 위해 로봇의 동작을 연속적으로 제어한다. 연속적인 동작 제어를 위해 매 제어 사이클 시점에 경유할 지점을 지령한다. 다음 제어 사이클 시점에 경유할 지점 P_i 는 현재점 P_c 와 목표점 P_g 를 선형 보간 해서 얻는다. 역기구학 식으로 공구 끝점 P_i 를 로봇의 관절각 J 로 변환하고, 제어 사이클 시점이 되면 로봇의 관절각을 J 로 지령한다. 목표점 P_g 에 도달할 때까지 경유점 계산과 지령을 반복한다.

Fig. 1 Overview of the control system

Fig. 2 Path control loop

2.3 NeuroMate 로봇

이 연구에 사용된 NeuroMate 로봇의 외형은 Fig. 3과 같으며 5개의 회전 관절을 가진다. NeuroMate 로봇 시스템은 뇌 혹은 신경 수술에서 수술 도구의 방향과 위치를 정교하게 맞추는 정위절차(stereotactic procedure)를 위해 고안되었으며, FDA가 수술실에서 사용을 승인한 영상유도(image-guided) 로봇 시스템이다. 이 로봇은 기계적인 강성과 정확도가 좋으며, 두개골 수술에 편리한 작업 영역을 제공한다. NeuroMate는 프랑스 Grenoble 대학에서 개발되었으나 최근에는 영국 Renishaw사에서 취급하고 있다⁽¹²⁾.

로봇을 해석할 때 Denavit-Hartenberg의 방법⁽¹³⁾을 많이 쓴다. 이 연구에서도 이 방법을 해석에 사용하였다. NeuroMate

Fig. 3 NeuroMate robot

Fig. 4 Link structure of NeuroMate

Table 1 DH parameters of NeuroMate

i	θ_i	a_i	α_i
1	0	0	$-\pi/2$
2	$-\pi/2$	125.501	0
3	$\pi/2$	0	$\pi/2$
4	$\pi/2$	355.670	0
5	0	349.018	0

로봇의 링크 구조와 각 관절의 프레임을 간략하게 표현하면 Fig. 4와 같다. 그림에서 $[X_0, Y_0, Z_0, P_0]$ 는 기저 좌표계(base coordinate system)이다. NeuroMate의 DH parameter를 구하면 Table 1과 같다.

3. 역기구학 해석

3.1 정기구학식

NeuroMate 로봇의 정기구학식은 식 (1)과 같다.

$$T = {}^0_5T = [X_5 Y_5 Z_5 P_5] = \begin{pmatrix} c\theta_{12}c\theta_{345} & -c\theta_{12}s\theta_{345} & s\theta_{12} & -Ac\theta_{12} + a_2s\theta_1 \\ s\theta_{345} & c\theta_{345} & 0 & a_5c\theta_{34} + a_4c\theta_3 \\ -s\theta_{12}c\theta_{345} & s\theta_{12}s\theta_{345} & c\theta_{12} & As\theta_{12} + a_2c\theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

이때,

$$A = a_5s\theta_{34} + a_4s\theta_3 \quad (2)$$

$$\theta_{12} = \theta_1 + \theta_2 \quad (3)$$

$$\theta_{345} = \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 \quad (4)$$

여기서, θ_i 는 i 번째 관절의 회전 각도이며, a_i 는 DH 파라미터에서 정의된 값이다. 그리고 $c\theta_i$ 와 $s\theta_i$ 는 각각 $\cos\theta_i$ 와 $\sin\theta_i$ 를 간략히 표시한 것이다.

식 (1)의 정기구학식은 마지막 관절인 5번째 관절의 프레임을 기저 프레임에서 기술한 것이다. 결국 식 (1)을 통해 5개 관절의 회전 각도가 주어지면 최종 관절의 자세와 위치를 알 수 있다.

3.2 도식적 방법의 역기구학 해석

말단 장치의 자세와 위치에 상응하는 로봇의 관절각을 구해보자. 말단 장치의 자세와 위치가 주어지면 마지막 관절의 프레임을 알 수 있다. 즉 식 (1)에서 $[X_5 Y_5 Z_5 P_5]$ 가 주어질 때 로봇의 관절각 $J = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$ 를 구해보자.

3.2.1 θ_1 의 해

θ_1 과 θ_2 는 마지막 관절의 Z축 방향과 XZ평면의 위치를 결정한다. 먼저 θ_1 을 구해보자. θ_1 은 Fig. 5에서 보듯이 P_2 의 위치를 결정한다. 그래서 P_2 의 위치를 알면 θ_1 을 알 수 있다. Fig. 5에서 P_2 는 반경이 a_2 인 원과 두 번째 관절의 Y축인 Y_2 의 교점이므로,

$$P_2 = P_0 + mZ_5 \pm dY_2 \quad (5) \quad \text{이때,}$$

이때,

$$m = P_5 \cdot Z_5 \quad (6)$$

$$d = \sqrt{a_2^2 - m^2} \quad (7)$$

식에서 a_2 는 첫 번째 관절에서 두 번째 관절까지의 링크 길이이다. Z_5 와 P_5 는 주어진 값이다. 그리고 두 번째 관절의 Y축인 Y_2 는 XZ평면과 평행하며 Z_5 와 항상 수직이므로,

$$Y_2 = Y_0 \times Z_5 / |Y_0 \times Z_5| \quad (8)$$

식 (5-8)을 통해 P_2 가 완전히 정의되었다. θ_1 은 P_2 를 이용해서 다음과 같이 정의된다.

$$\theta_1 = \text{atan2}(P_2.x, P_2.z) \quad (9)$$

3.2.2 θ_2 의 해

θ_1 이 정해지면 X_1 이 정해진다. 그런데 Fig. 5에서 보듯이 NeuroMate는 링크 구조에 때문에 마지막 세 관절의 Z축, Z_3 , Z_4 , Z_5 가 서로 평행하며, Z_3 는 X_2 와 일치한다. 결과적으로 X_1 과 X_2 의 사이각이 θ_2 이므로,

$$\theta_2 = \text{atan2}(s, c) \quad (10)$$

Fig. 5 Diagram for the joints 1 and 2 in X_0Y_0 view

$$s = \text{SIGN}(X_1 \times Z_5) |X_1 \times Z_5| \quad (11)$$

$$c = X_1 \cdot Z_5 \quad (12)$$

3.2.3 $\theta_3, \theta_4, \theta_5$ 의 해

이제 $\theta_3, \theta_4, \theta_5$ 를 구해보자. 마지막 세 관절의 Z축, Z_3, Z_4, Z_5 가 서로 평행하고, 기본 프레임의 Y축인 Y_0 와 수직하기 때문에 Fig. 6에서 보듯이 θ_{345} 는 식 (13)와 같이 정의됨을 알 수 있다.

$$\theta_{345} = \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 = \text{atan2}(X_5.y, Y_5.y) \quad (13)$$

Y_0 는 Z_3 와 수직으로 교차하기 때문에 Fig. 7에서 보듯이 θ_{34} 는 식 (14)와 같다.

$$\theta_{34} = \theta_3 + \theta_4 = \text{atan2}(h, P_5.y) \quad (14)$$

이때,

$$h = (P_2 - P_5) \cdot Y_2 \quad (15)$$

그리고 Y_2 는 식 (8)에서 얻어진 값을 사용한다. Fig. 7의 A와 B는 코사인 법칙⁽¹⁴⁾을 적용하면,

$$A = \text{acos}[(a_4^2 + a_{45}^2 - a_5^2) / (2a_4a_{45})] \quad (16)$$

$$B = \text{acos}[(a_5^2 + a_{45}^2 - a_4^2) / (2a_5a_{45})]$$

Fig. 6 Coordinate frames for the joints 3, 4, and 5

이제 Fig. 7에서 보듯이 θ_{34} 에서 A를 빼면 θ_3 을 구할 수 있다. 즉,

$$\theta_3 = \theta_{34} \pm A \quad (17)$$

그리고,

$$\theta_4 = \theta_{34} - \theta_3 \quad (18)$$

최종적으로

$$\theta_5 = \theta_{345} - \theta_{34} \quad (19)$$

3.3 가능한 해의 개수

도식적 역기구학 해석에서는 θ_1 과 θ_3 가 각각 두 개의 해를 갖는다. 식 (5)와 Fig. 5에서 보듯이 P_2 의 해가 두 가지이므로 θ_1 이 두 가지 해를 갖는다. 또 식 (17)과 Fig. 7에서 θ_3 의 두 가지 가능 해를 알 수 있다. 결국 4가지 해가 가능함을 알 수 있다. 로봇 말단의 위치와 자세가 정해지면 그에 상응하는 관절 각을 계산할 수 있다.

4. 선형 보간 경로 제어

이 절에서는 현재점에서 목표점까지 선형으로 로봇의 경로를 제어하는 방법을 설명한다. 장치의 최대 속도와 최대 가감속도를 고려해서 사다리꼴의 속도 선도를 만들고 속도 선도를 따라 위치를 제어하는 것이 일반적인 방법이다. 그러나 이 연구에서 사용하는 NeuroMate의 경우 말단 장치에서 요구되는 속도와 가감속도에 상응하는 관절의 회전 속도 및 가감속도를 얻기 어려운 경우가 많았다. 결국 말단 장치의 속도 선도를 매번의 제어 시점에 새로 구하고 경유점을 계산하였다.

이 연구에서는 제어 시점에 현재 속도와 남은 거리를 고려해서 경유점의 위치를 계산한다. 현재 시점에서 로봇 말단의 위치

는 P_c 이고 현재 속도는 V_0 로 가정하자. 목표점이 P_g 이면 남은 거리 S 는 다음과 같다.

$$S = |P_g - P_c| \quad (20)$$

목표점까지 남은 거리가 S 이고 현재 속도가 V_0 인 경우 목표점까지 속도 선도는 Fig. 8에서 보듯이 크게 두 가지로 구분된다. Fig. 8 (a)의 경우는 남은 거리가 충분하여 가속을 해서 최고 속도로 일정한 시간을 움직인 후 감속해서 최종 목표점에 도달한다. 그림의 (b)는 남은 거리가 충분하지 않아 가속하다 곧장 감속하는 경우다. 가속 없이 곧장 등속 운동을 하는 경우는 (a)의 특수한 경우이고, 가속 없이 곧장 감속하는 경우는 (b)의 특수한 경우로 분류하자.

Fig. 8 (a)의 경우 가속시간 t_a 와 감속시간 t_d 는 다음과 같이 계산된다.

$$t_a = \frac{V_m - V_0}{a} \quad (21)$$

$$t_d = \frac{V_m}{d} \quad (22)$$

속도선도에서 면적이 전체 이동 거리이므로,

$$S = V_0 t_a + \frac{1}{2} a t_a^2 + V_m t_c + \frac{1}{2} d t_d^2 \quad (23)$$

(a) $t_c > 0$

(b) $t_c \leq 0$

Fig. 8 Velocity diagrams

Fig. 7 Diagrams for the joints 3, 4, and 5

식 (21)과 식 (22)를 식 (23)에 대입한 후 정속시간 t_c 에 대해 풀면,

$$t_c = K/V_m, \quad K > 0 \quad (24)$$

이때,

$$K = S - (V_m^2 - V_0^2)/2a - V_m^2/2d \quad (25)$$

식 (24)에서 K 가 0보다 작은 경우는 Fig. 8의 (b)에 해당한다. 이 경우는 다음 두 식을 만족한다.

$$S = V_0 t_a + \frac{1}{2} a t_a^2 + \frac{1}{2} d t_d^2 \quad (26)$$

$$V_0 + a t_a = d t_d \quad (27)$$

식 (27)을 t_d 에 대해서 풀면,

$$t_d = (V_0 + a t_a)/d \quad (28)$$

식 (26)에 식 (28)을 대입한 후 정리하면,

$$t_a = (-V_0 + \sqrt{V_0^2 - M})/a, \quad M < 0 \quad (29)$$

이때,

$$M = (a V_0^2 - 2 a d S)/(a + d) \quad (30)$$

식 (29)에서 M 이 0보다 크면 가속 없이 곧장 감속해야 목표 점에서 멈출 수 있다.

이제 현재 시점에서 제어 사이클 시간 t 이후의 경유점 P_i 는 식 (31)과 같이 계산된다. 식에서 k 는 시간 t 동안 이동할 거리를 의미한다.

$$P_i = P(t) = P_c + k(P_g - P_c)/S \quad (31)$$

이때,

$$\begin{aligned} k &= V_0 t + a t^2/2, \quad t < t_a \\ &= V_0 t_a + a t_a^2/2 + V_m(t - t_a), \quad t < t_a + t_c \\ &= S - d(t_a + t_c + t_d - t)^2/2, \quad t < t_a + t_c + t_d \\ &= S, \quad \text{otherwise.} \end{aligned}$$

5. 적용 및 결과

이 연구에서 제안한 역기구학 해석과 선형 보간 경로 제어 방법을 프로그램으로 구현하였다. 제안된 방법을 검증하기 위해 Fig. 9의 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 경로를 검증하였으며 실제 로봇으로도 동작을 확인하였다. 시뮬레이션과 실제 동작 검증에서 모두 공구 경로가 직선 보간으로 제어됨을 확인하였다.

Fig. 10은 로봇의 실시간 위치를 파일로 출력한 결과를 직선 경로와 비교한 것이다. 확대한 그림에서 약간의 오차가 보이는데 오차의 크기는 대략 0.002mm 정도다. 이러한 오차는 보간 알고리즘보다 역기구학 등의 계산에서 발생하는 실수 연산 오류(floating-point error)일 것으로 추정된다. 실험에서 로봇의 제어 주기는 18.2ms이고 공구 끝단의 최대 속도는 5mm/sec였다.

6. 결론

이 연구에서는 두개골 천공 로봇 시스템 개발을 위해 NeuroMate 로봇의 역기구학을 도식적인 방법으로 해석하고 그것을 이용해서 공구 경로를 선형으로 제어하는 방법을 제시하였다. 도식적 방법의 역기구학 해석을 통해 4개의 가능 해를

Fig. 9 NeuroMate Simulation

Fig. 10 Comparison between a line and the real paths

얻었고 해의 기하학적 의미를 파악할 수 있었다. 이를 통해 안정적으로 로봇을 제어할 수 있었다. 여러 차례에 걸친 로봇 동작 시험을 통해 이 논문에서 제시한 방법으로 로봇의 공구 경로를 제어할 수 있음을 확인할 수 있었다.

이 연구에서 제안한 선형 보간 경로 제어는 말단 장치의 최대 선속도와 가감속도를 일정하게 제어할 수 없는 다관절 로봇의 경우에 적합한 방법이다. 이 연구에서 사용한 역기구학 해석 방법은 이미 잘 정립된 기술이므로 이 연구가 역기구학 해석에 이론적으로 기여한 바는 없다. 실제 시스템 개발에 필요한 문제를 해결하였다는 점에서 이 논문의 의미가 있다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교의 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- (1) Chung, Y. C., 2012, "Prototype Development of a Robotic System for Skull Drilling," *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 17, No. 3, pp. 198~207.
- (2) Craig, J., 1995, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, Addison-Wesley Publishing, New York, pp. 122~144.
- (3) Chung, W.J., Ju, J. H., and Lee, K. S., 2009, "Hybrid Motion Blending Algorithm of 3-Axis SCARA Robot based on Labview using Parametric Interpolation," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 18, No. 2, pp. 154~161.
- (4) Tutunea-Fatan, O. R., and Feng, H. Y., 2004, "Configuration analysis of five-axis machine tools using a generic kinematic model," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, No. 11, pp. 1235~1243.
- (5) Lee, R. S., and She, S. H., 1997, "Developing a postprocessor for three types of five-axis machine tools," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 13, pp. 658~665.
- (6) Shpitalni, M., Koren, Y., and Lo, C. C., 1994, "Realtime curve interpolators," *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 11, pp. 832~838.
- (7) Xia, T, Baird, C., Jallo, G., Hayes, K., Nakajima, N., Hata, N., and Kazanzides, P., 2008, "An Integrated System for Planning, Navigation and Robotic Assistance for Skull Base Surgery," *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, Vol. 4, No. 4, pp. 321~330.
- (8) Wikipedia, n.d., viewed 6 January 2013, CAN bus, <http://en.wikipedia.org/wiki/CAN_bus>.
- (9) cisst library, n.d., viewed 6 January 2013, <<https://trac.lcsr.jhu.edu/cisst>>
- (10) Real Time Application Interface, n.d., viewed 6 January 2013, <<http://www.rtai.org>>
- (11) Fast Light Toolkit, n.d., viewed 6. January 2013, <<http://www.fltk.org>>
- (12) Renishaw, n.d., viewed 6 January 2013, Stereotactic Neurological Systems, <<http://www.renishaw.com>>
- (13) Craig, J. J., 1995, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, Addison-Wesley Publishing, New York, pp. 72~82.
- (14) Spiegel, M. R., 1968, *Mathematical Handbook of Formulas and Tables*, Schaum's Outline Series, McGraw-Hill Publishing, New York, p19.