

산업용 FANUC Robot의 빠른 역기구학에 관한 연구

°박 형준, 전 종욱, 이 쾌희
서강대학교 이공대학 전자공학과

A Fast Inverse Kinematic Analysis of Industrial FANUC Robot

°Hyoungh Jun Park, Jong Ook Jeon, Kwae Hi Lee
Dept. of EE, Sogang Univ.

Abstract

This paper deals with the solution of inverse kinematics of the industrial FANUC robot with IBM PC 386. The inverse kinematics of FANUC robot cannot be solved by the algebraical method, because arm matrix T_6 is very complex and 6-joint angles are associated with the position and the approach of end-effector. Instead we found other 5-joint angle by an algebraical method after finding θ_1 value by a numerical method.

I. 서론

현대 산업 사회의 고도화는 여러 분야에서의 자동화에 힘입어 더욱 가속화되고 있고 자동화의 중추적 역할을 하는 것은 다름아닌 로봇이다. 로봇은 고도의 정밀화 작업뿐만 아니라 불품의 검사, 고장의 발견 및 수리 등 인간의 일을 대신하게 되었고 나아가서 우주에서의 작업, 심해의 지질 조사 등 그 이용 범위가 인간이 할 수 없는 작업까지 확대되어가고 있다. 이와 같이 로봇의 사용 용도와 분야가 사회 전반에 걸쳐 광범위해짐에 따라 인간이 교시기구(Teach pendant)를 이용하여 로봇을 제어하는 단순한 play-back 방식에서 벗어나 스스로 판단하고 제어할 수 있는 지능을 가진 로봇이 필요하게 되었고 이러한 지능적이고 복잡한 작업의 실시간 처리가 요구되었다.

로봇의 운용은 로봇의 각 관절 각도가 주어졌을 때 end-effector의 위치와 접근 방향을 구해내는 기구학과 end-effector의 위치와 접근 방향이 주어졌을 때 로봇의

각 관절각도를 구하는 역기구학을 이용한다. 따라서 로봇으로 하여금 실시간 작업을 하게 하기 위해서는 기구학과 역기구학의 처리 시간을 줄여야만 한다.

교육용 로봇은 그 구조가 비교적 간단하여 기하학적 방법을 이용하여 각 관절의 대수적인 유일한 해를 구할 수 있으나 고도의 정밀 작업에 필요한 정밀도가 산업용 로봇에 비해 다소 떨어진다. 일반적인 산업용 로봇은 교육용 로봇에 비해서 더 큰 힘을 낼 수 있고 정밀하게 위치를 제어할 수 있는 반면에 구조적으로 매우 복잡하다는 단점이 있다. 이러한 단점 때문에 교육용 로봇과 같이 기하학적 방법으로는 대수적인 유일한 해를 구하기 어렵다.

본 논문은 일본 FANUC사의 산업용 로봇인 FANUC Arc Mate의 실시간 운용을 위해 inverse-kinematics의 해를 θ_1 만으로 이루어진 식으로부터 θ_1 을 구해내고 이것으로부터 나머지 θ 값들을 구하는 방법으로 그 처리 시간을 단축하였다.

II. 본론

1. FANUC ROBOT ARC Mate의 구조

본 논문에서는 산업용 로봇인 FANUC ROBOT ARC Mate (이하 FANUC 로봇)를 사용하여 실험을 하였다. FANUC 로봇은 6개의 관절로 구성되어 있는 자유도(degree of freedom)가 6인 다관절 로봇으로서 일반적인 교육용 로봇에 비하여 구조적으로 매우 복잡하고 큰 힘을 가지며 0.01° 까지의 관절각도와 0.01mm 까지의 위치를 제어할 수 있다 [1]. 그림 1에서 FANUC 로봇의 기하학적 구조를 보여주고 있다. FANUC 로봇은 작업 환경내에서 로봇에 직접 작업

을 시키면서 program하는 on-line 방식이며 teach pendant 를 사용하여 작업을 지시한 후 이를 반복 작업시키는 play-back 방식의 로봇이다.

산업용 FANUC 로봇을 이용하여 지능적인 작업을 수행하려면 먼저 end-effector의 위치와 접근 방향을 알아내는 기구학을 구하는 일과 가고자 하는 위치와 접근 방향으로 end-effector를 이동시킬 각 joint-angle을 구하는 역기구학의 문제를 해결해야 한다.

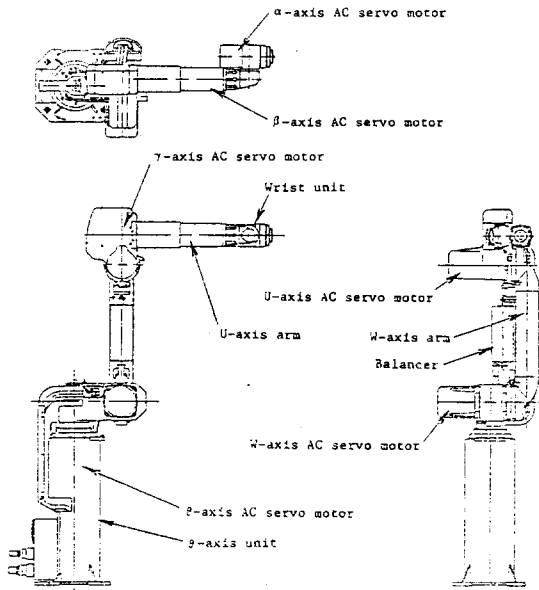


그림 1. FANUC 로봇의 기구학적인 구조

2. 기구학

로봇 arm의 각 관절 각도가 주어졌을 때 end-effector의 위치와 접근방향을 구해내는 것을 기구학이라 하며 여기에는 여러가지 방법이 있으나[2] 본 논문에서는 가장 일반적인 Denavit-Hartenberg 방법에 의한 기구학을 사용하였다 [3]. FANUC 로봇의 각 6개의 link 좌표계는 그림 2와 같이 결정하였고, 각 관절의 동작 범위는 그림 3과 같고 link 좌표변수(link coordinate parameter)는 $\theta_i, \alpha_i, d_i, a_i$ 를 사용하였으며, 좌표계 사이의 변환은 homogeneous transformation인 matrix를 사용하였다. θ 와 α 는 각도로 나타내고 d, a 는 길이로 나타낸다. 6개의 관절에는 각각의 좌표계를 갖고 있으며 각각의 좌표계는 XYZ₀ ~ XYZ₅로 표시하고 임의의 관절을 i로 표시하여 link 좌표변수를 정의하면 표 1과 같다.

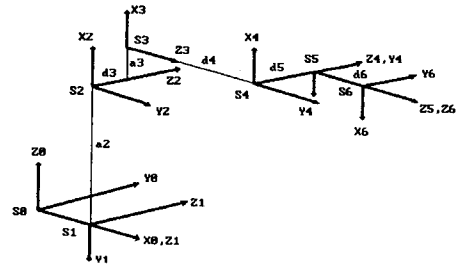


그림 2. FANUC 로봇의 좌표축 지정.

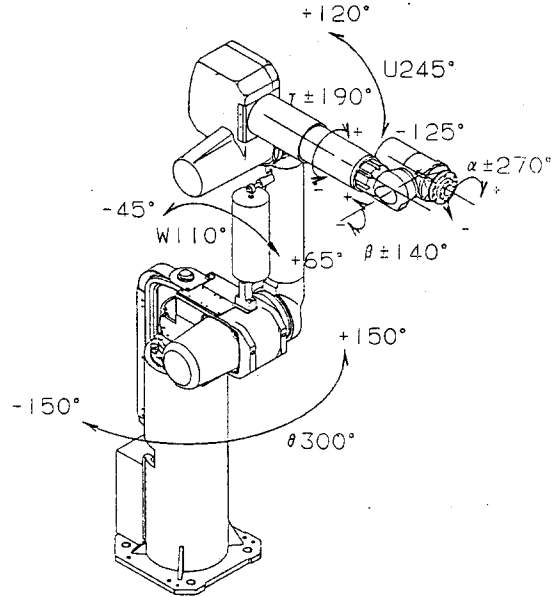


그림 3. FANUC 로봇의 동작 범위.

표 1. FANUC 로봇의 link 좌표 변수 [1] 단위 [cm]

joint i	θ_i	α_i	d_i	a_i	동작 범위
1	0°	-90°	20	0	-150° ⇔ 150°
2	-90°	0°	60	0	-45° ⇔ 65°
3	0°	-90°	13	3	-125° ⇔ 120°
4	0°	90°	0	55	-190° ⇔ 190°
5	180°	90°	0	10	-140° ⇔ 140°
6	0°	0°	0	25	-270° ⇔ 270°

θ_i : Z_i축에 대해 X_{i-1}축이 X_i축으로 회전하는 데 필요한 각도

α : X_i축에 대해 Z_{i-1}축이 Z_i축으로 회전하는 데 필요한 각도

d : X_i축 방향으로 Z_{i-1}축과 X_i축의 교점에서 i축의 원점까지의 거리

a : Z_{i-1} 축 방향으로 $i-1$ 축의 원점에서 Z_{i-1} 축과 X_i 축의 교점까지의 거리

각 좌표계는 기준좌표(base coordinate)에 대한 관절 좌표의 표시이며 Z 축을 다음 link의 방향으로 지정하였다. $n-1$ 번째 link의 좌표계에서 n 번째 link의 좌표계로의 homogeneous transformation 관계를 A_n matrix로 표현하며 이들간의 관계는 4×4 행렬로 나타낸다. 일반적인 식으로 표시하면 식(1)과 같다.

$$A_n = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta c\alpha & s\theta s\alpha & ac\theta \\ s\theta & c\theta c\alpha & -c\theta s\alpha & as\theta \\ 0 & s\alpha & c\alpha & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $s\theta = \sin\theta$ $c\theta = \cos\theta$
 $s\alpha = \sin\alpha$ $c\alpha = \cos\alpha$

$n-1$ 번째 좌표계에 대한 end-effector 좌표계의 관계는 U_n 으로 나타낸다 [4].

$$U_n = A_n * A_{n-1} * \dots * A_6 \quad (2)$$

로봇트 arm의 기준 좌표계에 대한 end-effector의 변환 관계는 U_1 이며 이는 arm matrix T_6 로 표현된다.

$$T_6 = U_1 = A_1 * A_2 * A_3 * A_4 * A_5 * A_6 \quad (3)$$

FANUC 로봇트의 6개 link 사이의 homogeneous transformation matrix는 식(4) ~ 식(9)와 같으며 원하는 FANUC 로봇트 arm matrix T_6 는 식(10) ~ 식(14)의 과정을 통하여 식(15)의 형태로 얻어진다 [5].

$$A_1 = \begin{bmatrix} c1 & 0 & -s1 & 20c1 \\ s1 & 0 & c1 & 20s1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} c2 & -s2 & 0 & 60c2 \\ s2 & c2 & 0 & 60s2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} c3 & 0 & -s3 & 13c3 \\ s3 & 0 & c3 & 13s3 \\ 0 & -1 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_4 = \begin{bmatrix} c4 & 0 & s4 & 0 \\ s4 & 0 & -c4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 55 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} c5 & 0 & s5 & 0 \\ s5 & 0 & -c5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_6 = \begin{bmatrix} c6 & -s6 & 0 & 0 \\ s6 & c6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$U_6 = A_6 \quad (10)$$

$$U_5 = A_5 * A_6 \quad (11)$$

$$U_4 = A_4 * A_5 * A_6 \quad (12)$$

$$U_3 = A_3 * A_4 * A_5 * A_6 \quad (13)$$

$$U_2 = A_2 * A_3 * A_4 * A_5 * A_6 \quad (14)$$

$$U_1 = A_1 * A_2 * A_3 * A_4 * A_5 * A_6$$

$$= T_6 = \begin{bmatrix} N_x & O_x & A_x & P_x \\ N_y & O_y & A_y & P_y \\ N_z & O_z & A_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

T_6 의 요소들의 물리적 의미는 N_{xyz} , O_{xyz} , A_{xyz} , P_{xyz} 는 각각 end-effector의 수직, 방향, 접근 그리고 위치의 벡터 성분이다. 식(15)로부터 FANUC 로봇트의 기구학을 구해낼 수 있고 그것을 식(16)~식(27)에 나타내었다.

$$N_x = c1c23(c4c5c6+s4s6)-c1s23s5s6+s1(s4c5c6-c4c6) \quad (16)$$

$$N_y = s1c23(c4c5c6+s4s6)-s1s23c5c6-c1(s4c5c6-c4s6) \quad (17)$$

$$N_z = -s23(c4c5c6+s4s6)-c23s5c6 \quad (18)$$

$$O_x = -c1c23(c4c5s6-s4c6)-s1(s4c5s6+c4c6)+c1s23s5s6 \quad (19)$$

$$O_y = -s1c23(c4c5s6-s4c6)+c1(s4c5s6+c4c6)+s1s23s5s6 \quad (20)$$

$$O_z = s23(c4c5s6-s4c6)+c23s5s6 \quad (21)$$

$$A_x = c1(c23c4s5+s23c5)+c23s5s6 \quad (22)$$

$$A_y = s1(c23c4s5+s23c5)-c1s4s5 \quad (23)$$

$$A_z = c23c5-s23c4s5 \quad (24)$$

$$P_x = 25A_x+c1[c23(10s4+13)-55s23+60c2+20]-s1(10c4+3) \quad (25)$$

$$P_y = 25A_y+s1[c23(10s4+13)-55s23+60c2+20]+c1(10c4+3) \quad (26)$$

$$P_z = 25A_z-s23(10s4+13)-55c23-60s2 \quad (27)$$

3. 역기구학

역기구학은 작업 대상의 위치와 접근 방향이 주어졌을 때 end-effector가 주어진 접근 방향과 위치로 움직일 수 있는 각 관절각도의 값을 구하는 것을 말하며, 일반적으로는 기하학적 방법, 반복 계산법과 대수적 방법을 사용한다.

기하학적 방법은 로봇트 arm의 각 link 사이의 기하학적 구조에서 임의의 위치와 접근 방향에 대한 각 관절각도를 계산해 내는 방법으로 구조가 간단한 교육용 로봇트에 주로 이용되며, 대수적 방법은 arm matrix T_6 와 이를 구하는데 사용된 homogeneous transformation matrix A_n 의 역행렬을 사용하여 식(10) ~ 식(14)의 식들과 다음의 식들을 비교하여 수

학적으로 해를 구해내는 방법이다. 대수적인 방법은 구해진 해가 정확한 반면에 많은 식들 중에서 주어진 로봇 arm의 형태에 맞는 해를 찾아내기 위한 식들을 선택하는 것이 매우 어려우며 반복 계산법은 시간이 너무 많이 걸린다는 단점이 있다.

$$A_1^{-1} * T_6 = U_2 \quad (28)$$

$$A_2^{-1} * A_1^{-1} * T_6 = U_3 \quad (29)$$

$$A_3^{-1} * A_2^{-1} * A_1^{-1} * T_6 = U_4 \quad (30)$$

$$A_4^{-1} * A_3^{-1} * A_2^{-1} * A_1^{-1} * T_6 = U_5 \quad (31)$$

$$A_5^{-1} * A_4^{-1} * A_3^{-1} * A_2^{-1} * A_1^{-1} * T_6 = U_6 \quad (32)$$

산업용 FANUC 로봇의 역기구학의 해를 구하는데 있어 기하학적 해석은 FANUC 로봇의 γ , β , α 축이 end-effector의 위치와 접근 방향에 관계되는 기하학적인 특성 때문에 해를 찾기가 불가능하다 (그림 3).

또한 일반적인 교육용 로봇과는 달리 FANUC 로봇의 6개 모든 관절각도가 end-effector의 위치와 접근 방향에 관계되기 때문에 arm matrix T_6 가 매우 복잡하며 따라서 대수적 방법으로는 각각의 관절각도의 함수로 표현되므로 6개의 해를 유일하게 구할 수 없고 어느 하나의 관절각도의 값을 알아야 한다. 식(33) ~ 식(37)은 θ_4 가 주어져 있을 때 나머지 5 개의 관절각도를 얻을 수 있는 대수적 방법의 결과이다.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left[\frac{\pm \sqrt{(Px-25Ax)^2 + (Py-25Ay)^2 - (10c4+3)^2}}{10c4 + 3} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{Px-25Ax}{Py-25Ay} \right] \quad (33)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left[\frac{\pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{C} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{B}{A} \right] \quad (34)$$

여기서 $A = (Px-25Ax)c1 + (Py-25Ay) - 20$

$B = Pz - 25Az$

$C = [A^2 + B^2 - (10s4+13)^2 + 60^2 - 55^2] / 120$

$$\theta_3 = \tan^{-1} \left[\frac{\pm \sqrt{(10s4+13)^2 + 55^2 - D^2}}{D} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{55}{10s4+13} \right] \quad (35)$$

여기서 $D = Ac2 - Bs2 - 60$

$$\theta_5 = \tan^{-1} \left[\frac{[(Axc1+Ays1)c23-Azs23]c4 + (Axs1-Ayc1)s4}{(Axc1+Ays1)s23 + Azc23} \right] \quad (36)$$

$$\theta_6 = \tan^{-1} \left[\frac{[(Nxc1+Nys1)c23-Nzs23]s4 - (Nxs1-Nyc1)s4}{[(Oxc1+Oys1)c23-Ozs23]s4 - (Oxs1-Oyc1)c4} \right] \quad (37)$$

이상과 같이 FANUC 로봇은 구조적으로 매우 복잡하므로 일반적인 역기구학 해법으로는 그 해를 찾기가 불가능하다.

반복법을 사용하여 해를 구해낼 수는 있으나 시간이 너무 오래 걸려서 실용적이지 못하였다. 따라서 θ_4 의 전 구간 ($-190^\circ \sim 190^\circ$)에서 이분법을 사용하여 θ_4 를 결정한 후 식(33)~(37)을 이용하여 역기구학의 해를 구하였다. 하지만 이방법 역시 역기구학의 해를 구하는 시간이 평균 3.3초 정도이어서 FANUC 로봇을 실시간 제어할 수는 없었다. 이에 본 논문에서는 입력으로 T_6 행렬이 주어졌을 때 FANUC 로봇의 기하학적인 구조를 이용하여 θ_1 이 존재할 수 있는 범위를 구한 후에 θ_1 을 결정하여 이 θ_1 으로부터 나머지의 값들을 구하였다.

3.1 θ_1 의 결정

3.1.1 θ_1 의 범위 결정

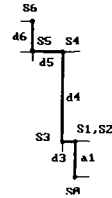


그림 4. Z=0 평면으로의 투사도

FANUC 로봇의 역기구학의 해를 구하기 위해 θ_1 의 전체 범위 ($-150^\circ \sim 150^\circ$)에서 주어진 입력 T_6 matrix로부터 θ_1 이 존재할 범위를 기하학적인 방법으로 결정하여 그 범위 안에서 해를 구하는 방법이다.

FANUC 로봇의 closed form equation은 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_5, \theta_6$ 에 대하여 존재하며 θ_4 를 알 때 나머지 근들을 구할 수 있다. 따라서 θ_4 의 범위를 구하는 것이 더욱 직접적인 방법이 될 것이지만 FANUC 로봇의 기하학적 특성상 θ_4 의 범위를 구하기가 불가능하였으므로 다음과 같은 방법으로 θ_1 의 범위를 결정하였다.

FANUC 로봇의 좌표축은 그림 2와 같다. 그러면 로봇이 home position일 때의 좌표축을 Z=0 평면에 투사한 그림은 그림 4와 같다.

여기서 S6는 gripper의 좌표축이다. 그런데 position vector와 approach vector를 이용하여 S5의 position을 구할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} S5x &= Px - d6 Ax \\ S5y &= Py - d6 Ay \\ S5z &= Pz - d6 Az \end{aligned} \quad (38)$$

이렇게 주어진 S5의 position을 중심으로 하고 반경 d5인 원을 그리면 이 구 표면의 한 점이 S4의 위치가 된다.

여기서 S4의 위치를 unique하게 결정할 수 있다면 즉시 θ_1 을 구할 수가 있으나 그것이 불가능하였으므로 아래와 같은 방법으로 θ_1 의 범위를 구하였다.

그림 4의 gripper를 없애고 접선을 그리면 다음과 같다.

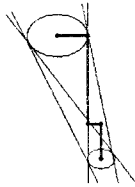


그림 5.

식 (1)로부터 S5의 위치를 구하였으므로 이 점을 중심으로 구를 그리면 다음의 식과 같고

$$(X - S5x)^2 + (Y - S5y)^2 + (Z - S5z)^2 = d5^2 \quad (39)$$

T6의 approach vector에 수직이고 S6를 포함하는 평면은 다음과 같다.

$$Ax(X - S5x) + Ay(Y - S5y) + Az(Z - S5z) = 0 \quad (40)$$

그리고, 평면

$$Z = S5z \quad (41)$$

위의 세 개의 식 (39), (40), (41)의 교점을 구하면 S5를 사이에 두고 양쪽에 두 개의 point를 결정할 수가 있다.

이 두 point로부터 원점을 중심으로 하고 반경 d3인 원에 접선을 그린다. 이 때 각각의 point에 대하여 두개의 접선 t_1, t_2 가 생기는데 FANUC 로봇의 형태를 고려하여 불

때 두 접선 중에서 왼쪽의 접선의 접선이 올바른 것이므로 왼쪽의 접선을 택하여 이 접선의 기울기를 구하면 θ_1 의 범위를 구할 수 있다. 이러한 방법으로 구해진 θ_1 의 범위 내에서 θ_1 만으로 이루어진 $f(\theta_1) = 0$ 의 식을 이용하여 θ_1 을 결정한 후 나머지 5개의 역기구학의 해를 구한다.

3.1.2 θ_1 의 결정

위의 방법으로 구해진 범위 안에서 올바른 θ_1 을 구하기 위하여 θ_1 만으로 이루어진 방정식을 만들었다

Denavit-Hatemberg의 matrix 표현식의 rotation term에서 동일한 행이나 열의 3개의 식 중 하나는 나머지 2개의 식에 종속적이므로 역기구학의 해를 구해내기 위해서는 같은 행이나 열에서 2개까지만 식을 취해야 한다. 또한 총 12개의 식 중에서 실제로는 rotation term에서 3개, position term에서 3개의 식만이 서로 독립이므로 얻을 수 있는 식은 rotation 부분과 position 부분에서 각각 3개로 한정되어 있다.

위와 같은 조건들을 고려하여 식 (42)로부터 rotation term에서는 다음과 같은 2개의 식만을 취하였다.

$$A_1 A_2 A_3 A_4 = T_6 A_6^{-1} A_5^{-1} \quad (42)$$

좌변과 우변의 1행 3열을 비교하고 2행 3열을 비교하면 (43), (44)식과 같다.

$$-c4s1 + c1c23s4 = 0xc6 + Nxs6 \quad (43)$$

$$c4s1 + s1c23s4 = 0yc6 + Nys6 \quad (44)$$

그리고 position term에서도 2행 4열, 3행 4열로부터 (45), (46)의 2개의 식만을 취하였다.

$$\begin{aligned} 3c1 + 20s1 + 60c2s1 + 13c23 - 55s1s23 \\ = -25Ay + Py - 10(0yc6 + Nys6) \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} -55c23 - 60s2 - 13s23 \\ = -25Az + Pz - 10(0zc6 + Nzs6) \end{aligned} \quad (46)$$

그리고 식 (14), (28)로부터 (47)을 얻는다.

$$c4 = \frac{(25Ax - Px) + (Py - 25Ay)c1 - 3}{10} \quad (47)$$

위의 식 (43)~(47)의 5개 식으로부터 다음과 같은 방법으로 θ_1 의 방정식을 구한 후 이 식으로부터 역기구학의 해가

되는 θ_1 을 결정한다.

STEP 1 : 식 (43), (44)에서 $c23s4$ 를 소거하여 식 (48)을 얻고 $c6, s6$ 를 θ_1 과 θ_4 에 대하여 풀 수 있다.

$$c6(0y1 - 0x1) + s6(Ny1 - Nx1) = c4 \quad (48)$$

STEP 2 : 위에서 얻은 $c6, s6$ 를 이용하여 식 (43)으로부터 $c23$ 를 θ_1, θ_4 에 대하여 풀 수 있다.

$$c23 = \frac{(0xc6 + Nx6 + c4s1)}{c1s4}$$

$$s23 = \sqrt{1 - c23^2} \quad (49)$$

STEP 3 : 식 (45), (46)에 식(48), (49)를 대입하여 $c2, s2$ 를 얻고 여기서 θ_1, θ_4 에 관한 식을 얻을 수 있으며, θ_4 는 식 (47)에 θ_1 으로 나타내어지므로 θ_1 만의 식을 얻을 수 있다. 따라서 $f(\theta_1)$ 은 다음과 같다.

$$f(\theta_1) = c2^2 + s2^2 - 3600s1^2 = 0 \quad (50)$$

STEP 4 : 3.1.2에서 구한 θ_1 의 범위 안에서 최소값부터 최대값까지 θ_1 을 0.01° 씩 식 (50)에 대입하여 그 결과가 정해진 임계값보다 작은 θ_1 을 역기구학의 해로 선택한 후 나머지 역기구학의 해를 구한다.

Ⅲ. 실험 결과 및 결론

FANUC 로봇의 역기구학의 해를 θ_1 의 범위를 결정한 후, 그 범위안에서 θ_1 만으로 이루어진 방정식에 의해 구해보았다. 실험에 사용한 T_6 행렬을 표 2에 나타내었다. 그리고 이 입력에 의한 θ_1 의 범위를 표 3에 나타내었다. 이 범위안에서 수행된 역기구학의 결과와 시간을 표 4에 나타내었다. 표 4에서 알 수 있듯이 해를 구하는 평균시간이 0.9초가 걸렸다. 이전의 반복법이나 이분법에 의한 계산보다는 시간이 많이 단축되긴 하였으나 로봇을 실시간으로 운용하기에는 아직도 미흡하다. 하지만 전용 DSP chip을 함께 사용한다면 실시간으로 역기구학의 해를 구할 수 있으며 실시간 경로 계획에도 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] "FANUC ROBOT Arc Mate User's Manual", Fanuc Ltd., 1987
- [2] C. S. G. Lee, R. C. Gonzalez, and K. S. Fu, "Tutorial on Robotics" IEEE Computer Society, 1986.
- [3] C. S. G. Lee, "Robot arm kinematics, dynamics, and control", vol. 15, no. 12, pp. 62-80, Dec. 1982.
- [4] R. P. Paul, B. Shimano, and G. E. Mayer, "kinematics control equations for simple manipulators", IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics, vol. SMC-11, no. 6, pp. 449-455, June 1981.

- [5] M. Vukobratovic and M. Kircanski, "Kinematics and trajectory synthesis of manipulation robots", Scientific Fundamentals of Robotics, vol. 3, pp. 138-155, 1986.

표 2. 실험에 사용한 T_6 행렬

입 력 T_6 [단위 cm]				
	Nx Ny Nz	Ox Oy Oz	Ax Ay Az	Px Py Pz
1	0.0000 0.0000 1.0000	0.0000 1.0000 0.0000	1.0000 0.0000 0.0000	99.99999 12.99999 72.99999
2	-0.73682 0.48687 -0.46907	0.56613 0.82359 -0.03444	0.36955 -0.29094 -0.88248	101.16490 7.21863 7.84125
3	-0.02305 0.76313 0.64582	0.95868 0.20008 -0.20221	-0.28353 0.61447 -0.73622	44.27525 78.26967 39.21584
4	0.92909 -0.23283 0.28735	-0.27637 -0.95339 0.12107	0.24577 -0.19190 -0.95014	66.56961 74.21296 12.09231
5	-0.05313 0.49899 0.86497	0.11194 -0.85776 0.50170	0.99229 0.12348 -0.01028	16.68515 93.76852 31.24058

표 3. T_6 입력에 대한 θ_1 의 범위

θ_1 의 범위	
1	$-0.43^\circ \sim 15.57^\circ$
2	$-0.89^\circ \sim 15.11^\circ$
3	$29.12^\circ \sim 45.12^\circ$
4	$42.71^\circ \sim 58.71^\circ$
5	$85.22^\circ \sim 101.22^\circ$

표 4. 역기구학의 수행 결과

출력 각도 [단위 $^\circ$]						
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.80	22.52	-35.51	30.71	-36.31	-57.91
3	43.83	1.94	-22.57	-158.34	-60.88	-104.91
4	45.46	25.64	-28.83	20.81	24.55	-35.90
5	93.37	21.15	-29.49	91.32	-66.47	96.90
평균 수행 시간 1초						