

TOP-1로봇의 Inverse Jacobian의 해

우 상래 이 재섭 강 태희 김 형래

건국대학교 공과대학 전자공학과

A Study on the Solution of Inverse Jacobian for TOP-1

Sang-lae Woo, Chae-sub Lee, Tae-hee Kang and Hyung-lae Kim
Department of Electronics, Kon-kuk University

ABSTRACT

This paper is about the Inverse Jacobian for the TOP-1 robot. The robot Jacobian is used for the movement in accordance with differential changes. A Matrix and Homogeneous Transformation Matrix, Differential Motion Vector D are applied to Jacobian equation for the movement of the robot in accordance with the minut changes.

The solution of Jacobian equation is acquired and applied for the subtle movement of each arms of the tne robot. The interface with APPLE-II Micro-computer is searched out too.

The Software and the interface resulted from this paper are considered to be higly useful in the accurate control on the robot when they are linked with dynamics of robot.

I. 서 론

현대의 같이 고도로 발달된 복잡한 산업 사회에서는 시간, 공간상의 가변적 동작 및 작업형태, 방법, 작업 대상의 변화에 따른 신속한 대처 기능과 소량 다품종 생산에 유리하고 위험하거나 조악한 환경 속에서도 다양한 형태의 작업을 수행 할 수 있는 로봇의 도입이 절대 필요하게 되었다.

이에따라 로봇 제어에 관한 연구가 전자공학 분야의 기계공학

분야에서 활발히 이루어지고 있다. 또한 대부분의 산업용로봇은 인간의 팔과 손의 기능과 유사 하도록 설계 제작 되었기 때문에 다양한 동작 수행을 위해서는 다각적인 연구가 요구되고 있다. 이러한 동작 수행의 어제를 위한 방법으로는 Kinematics Control, Dynamics Control 등이 있다.

근래에 와서 로봇의 사용범위는 더욱 넓어져 종래의 Point to Point 방식과 같은 단순 작업에서 벗어나 Continuous Path 방법을 적용하여 용접, 조립, 페인팅, 그라인딩등에 실제 응용 되고 있다.

로봇이 이와같이 광범위 하거나 미세한 작업을 수행하기 위해서는 작은 변위에 대한 제어를 적절히 해 주어야한다. 이에 따라, 로봇 팔의 제어를 위하여 Kinematic과 Jacobian방정식을 각각 A Matrix와 Homogeneous Transformation Matrix, Differential

Motion Vector D 를 사용하여 유도하고 이 방정식의 해를 구하여 금성사 TOP-1로봇 팔의 각 관절에 적용하여 로봇 팔의 운동을 제어 하였으며 실험을 통하여 유도한 해가 정당함을 입증하였다.

또한 이를 위하여 APPLE-II 마이크로 컴퓨터와의 로봇 팔의 Interface 문제를 연구 하였다.

II-1. TOP-1로봇 시스템

본 논문에서 사용한 급성각 TOP-1로봇은 6축 5자유도의 손의 개폐 운동으로 구성되어 있고 기계적으로 Base, 몸체 상박, 하박, 손목 및 손으로 구성되어 있으며 이를 구동하기 위해서는 6개의 Step모터를 사용하였고 유연한 동작을 위하여 Wire로 구동력을 전달하고 있다.

사용된 TOP-1로봇은 Joint전부가 Revolute Joint로만 구성되어 있어서 장애물 넘어보 물체를 옮기는 데 편리한 장점을 갖고 있으며 그림1은 TOP-1로봇의 구조와 좌표계를 보여 주고 있다.

또 TOP-1로봇의 제어 부분은 Base내부에 지능 보드와 구동 보드로 구분되어 내장되어 있다.

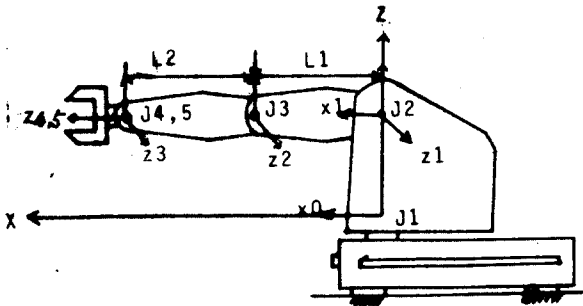


그림1. TOP-1로봇의 구조 및 좌표계

II-2. TOP-1로봇의 Kinematic과

Inverse Kinematic의 해

본 논문에서 사용한 TOP-1로봇의 각 링크의 좌표계는 그림1에 나타내었고 4개의 링크 계수는 표1에 나타내었다.

표1. TOP-1로봇의 링크 계수

Link	Variable	α	a	d	$\cos \alpha$	$\sin \alpha$
1	θ_1	90°	0	0	0	1
2	θ_2	0°	180	0	1	0
3	θ_3	0°	180	0	1	0
4	θ_4	90°	0	0	0	1
5	θ_5	0°	0	0	1	0

각 관절의 Transfer Matrix를 구하면 다음과 같다. (3)

$$A_1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1) \quad A_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & C_2 L_1 \\ S_2 & C_2 & 0 & S_2 L_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & C_3 L_2 \\ S_3 & C_3 & 0 & S_3 L_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3) \quad A_4 = \begin{bmatrix} -S_4 & 0 & -C_4 & 0 \\ C_4 & 0 & -S_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} C_5 & -S_5 & 0 & 0 \\ S_5 & C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5) \quad \text{여기서 } S_i = \sin \theta_i, \quad C_i = \cos \theta_i$$

링크 1번째 부터 링크 5번째 까지의 Transformation T_5 는 각각 다음과 같다.

$$T_1 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5$$

$$A_1^{-1} \cdot T_1 = A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 = {}^1T_5$$

$$A_2^{-1} \cdot A_1^{-1} \cdot T_1 = A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 = {}^2T_5$$

$$A_3^{-1} \cdot A_2^{-1} \cdot A_1^{-1} \cdot T_1 = A_4 \cdot A_5 = {}^3T_5$$

$$A_4^{-1} \cdot A_3^{-1} \cdot A_2^{-1} \cdot A_1^{-1} \cdot T_1 = A_5 = {}^4T_5$$

$${}^1T_5 = \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & \phi & \phi \\ S_1 & C_1 & \phi & \phi \\ \phi & \phi & 1 & \phi \\ \phi & \phi & \phi & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^2T_5 = \begin{bmatrix} -S_1 C_2 & S_1 S_2 & C_1 & \phi \\ C_1 C_2 & -C_1 S_2 & S_1 & \phi \\ S_1 & C_1 & \phi & \phi \\ \phi & \phi & \phi & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$${}^3T_5 = \begin{bmatrix} -S_2 C_3 & S_2 S_3 & C_2 & C_2 L_2 \\ C_2 C_3 & -C_2 S_3 & S_2 & S_2 L_2 \\ S_2 & C_2 & \phi & \phi \\ \phi & \phi & \phi & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} -S_{22}C_1 & S_{22}S_1 & C_{22} & C_{22}l_2 + C_1d_1 \\ C_{22} & -C_{22}S_1 & S_{22} & S_{22}l_2 + S_1d_1 \\ S_1 & C_1 & \phi & \phi \\ \phi & \phi & \phi & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} -C_1S_{22}C_1 + S_1S_1 & C_1S_{22}S_1 + S_1C_1 & C_1C_{22} \\ -S_1S_{22}C_1 - C_1S_1 & S_1S_{22}S_1 - C_1C_1 & S_1C_{22} \\ C_{22}C_1 & -C_{22}S_1 & S_{22} \\ \phi & \phi & \phi \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} C_1(C_{22}l_2 + C_1d_1) \\ S_1(C_{22}l_2 + C_1d_1) \\ S_{22}l_2 + S_1d_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & 0 & a & p_x \\ n_y & 0 & a & p_y \\ n_z & 0 & a & p_z \\ \phi & \phi & \phi & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

단, $C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$, $S_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$, $\theta_{22} = \theta_{21} + \theta_1$
 식(6)-식(10)을 이용하여 Inverse Kinematic으로 Link의 변수를 구하면 다음과 같다.

$$A_1^{-1} \cdot T_2 = \begin{bmatrix} f_{11}(n) & f_{11}(o) & f_{11}(a) & f_{11}(p) \\ f_{12}(n) & f_{12}(o) & f_{12}(a) & f_{12}(p) \\ f_{13}(n) & f_{13}(o) & f_{13}(a) & f_{13}(p) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서,

$$f_{11} = C_1 \cdot x + S_1 \cdot y \quad (11)$$

$$f_{12} = z \quad (12)$$

$$f_{13} = -S_1 \cdot x + C_1 \cdot y \quad (13)$$

$$-S_1 p_x + C_1 p_y = 0 \text{ 에서 } S_1 p_x = C_1 p_y \text{ 이므로}$$

$$\therefore \theta_1 = \tan^{-1} \frac{p_y}{p_x} \quad (-90^\circ \leq \theta_1 \leq 90^\circ) \quad (14)$$

같은 방법으로 각 관절의 θ_2 를 구하면 다음과 같다

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{(C_2 L_2 + L_1) p_y' - S_2 L_2 p_x'}{(C_2 L_2 + L_1) p_x' + S_2 L_2 p_y'} \quad (-30^\circ \leq \theta_2 \leq 120^\circ) \quad (15)$$

$$p_x' = C_1 p_x + S_1 p_y = C_{22} L_2 + C_2 L_1, \quad p_y' = S_{22} L_2 + S_2 L_1 = p_z$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} \frac{S_2}{C_2} \quad (-105^\circ \leq \theta_3 \leq 60^\circ) \quad (16)$$

$$\theta_4 = \tan^{-1} \frac{-S_{22}(C_1 a_x + S_1 a_y) + C_{22} a_z}{C_{22}(C_1 a_x + S_1 a_y) + S_{22} a_z} \quad (-90^\circ \leq \theta_4 \leq 90^\circ)$$

$$\theta_5 = \tan^{-1} \frac{S_2 a_x - C_2 a_y}{S_1 a_x - C_1 a_y} \quad (-180^\circ \leq \theta_5 \leq 180^\circ) \quad (18)$$

II-3.TOP-1로봇의 Jacobian과

Inverse Jacobian

본 논문에서는 Differential Motion Vector DMatrix를 사용하여 Direct Jacobian을 유도하였고 식(6)-식(10)의 Inverse Kinematic방정식을 미분하여 Inverse Jacobian을 구하였다.

로봇의 일반적인 미세변화에 대한 Transforgraph

를 그림 2에 나타 내었다.

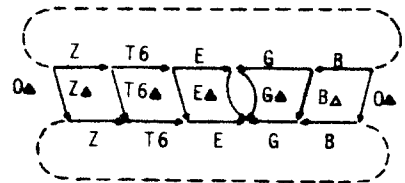


그림 2. 미세 변환의 Transforgraph

II-3-1.Direct Jacobian방정식과 해

Object에서 Differential Translation과 Rotation을 T_d, T_δ 라하면 이는 6×5 로서 나타낼수 있다.

$$\begin{bmatrix} T_{d_x} \\ T_{d_y} \\ T_{d_z} \\ T_{\delta_x} \\ T_{\delta_y} \\ T_{\delta_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{d_{1x}} & T_{d_{1y}} & \dots & T_{d_{1z}} \\ T_{d_{2x}} & T_{d_{2y}} & \dots & T_{d_{2z}} \\ T_{d_{3x}} & T_{d_{3y}} & \dots & T_{d_{3z}} \\ T_{\delta_{1x}} & T_{\delta_{1y}} & \dots & T_{\delta_{1z}} \\ T_{\delta_{2x}} & T_{\delta_{2y}} & \dots & T_{\delta_{2z}} \\ T_{\delta_{3x}} & T_{\delta_{3y}} & \dots & T_{\delta_{3z}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \\ d\theta_3 \\ d\theta_4 \\ d\theta_5 \end{bmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} T_{d_x} &= n \cdot ((\delta \times p) + d) \\ T_{d_y} &= o \cdot ((\delta \times p) + d) \\ T_{d_z} &= a \cdot ((\delta \times p) + d) \\ T_{\delta_x} &= n \cdot \delta \\ T_{\delta_y} &= o \cdot \delta \\ T_{\delta_z} &= a \cdot \delta \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

여기에서 TOP-1의 경우 모든 Joint는 Revolute Joint이므로 $d=0$ 이다. 따라서 식(19)를 다음과 같은 식으로 된다.

$$\begin{aligned}
 T_{d_x} &= n \cdot (\delta \times p) \\
 T_{d_y} &= o \cdot (\delta \times p) \\
 T_{d_z} &= a \cdot (\delta \times p) \\
 T_{\delta_x} &= n \cdot \delta \\
 T_{\delta_y} &= o \cdot \delta \\
 T_{\delta_z} &= a \cdot \delta
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

또한 TOP-1은 Rotation Differential이므로

$\delta = \phi_i + \phi_j + 1k$ 은 다음과 같다.

$$\delta \times p = \begin{bmatrix} i & j & k \\ \phi & \phi & 1 \\ p_x & p_y & p_z \end{bmatrix} = -p_y i + p_x j + ok
 \tag{21}$$

그러므로 식(22)와 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 T_{d_x} &= n \cdot (\delta \times p) = -n_p p_x + n_p p_x \\
 T_{d_y} &= o \cdot (\delta \times p) = -o_p p_x + o_p p_x \\
 T_{d_z} &= a \cdot (\delta \times p) = -a_p p_x + a_p p_x \\
 T_{\delta_x} &= n \cdot \delta = n_x \\
 T_{\delta_y} &= o \cdot \delta = o_x \\
 T_{\delta_z} &= a \cdot \delta = a_x
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

그러므로 TOP-1의 Differential Transformation Id는 다음과 같다.

$$\therefore T_d = (-n_p p_x + n_p p_x) i + (-o_p p_x + o_p p_x) j + (-a_p p_x + a_p p_x) k
 \tag{23}$$

TOP-1의 경우 다섯개의 미세변화 $d\theta_1, d\theta_2, d\theta_3, d\theta_4, d\theta_5$ 에 부합 하는 Differential Coordinate Transformation ${}^1T_2, {}^2T_3, {}^3T_4, {}^4T_5$ 가 필요하다.

이에 따라 Direct Jacobian방정식의 각각의 Element를 구한다.

1) 1st Column (1T_2)

$$\begin{aligned}
 T_{1d_{1x}} &= n_x p_x + n_x p_x \\
 &= (c_1 s_{23} c_3 - s_1 s_3) s_1 (c_{23} \ell_2 + c_3 \ell_1) - \\
 &\quad (s_1 s_{23} c_3 + c_1 s_3) c_1 (c_{23} \ell_2 + c_3 \ell_1) \\
 T_{1d_{1y}} &= -o_x p_x + o_x p_x \\
 &= -(c_1 s_{23} s_3 + s_1 c_3) s_1 (c_{23} \ell_2 + c_3 \ell_1) + \\
 &\quad (s_1 s_{23} s_3 - c_1 c_3) c_1 (c_{23} \ell_2 + c_3 \ell_1) \\
 T_{1d_{1z}} &= a_x p_x + a_x p_x \\
 &= -c_1 c_{23} s_1 (c_{23} \ell_2 + c_3 \ell_1) s_1 c_3 c_1 (c_{23} \ell_2 + c_3 \ell_1)
 \end{aligned}$$

$$T_{1\delta_{1x}} = n_x = c_{23} c_3$$

$$T_{1\delta_{1y}} = o_x = -c_{23} s_3$$

$$T_{1\delta_{1z}} = a_x = s_{23}$$

2) 2nd Column (1T_3)

$$\begin{aligned}
 T_{1d_{2x}} &= -n_x p_y + n_x p_x \\
 &= s_{23} c_1 (s_{23} \ell_2 + s_3 \ell_1) + c_{23} c_3 (c_{23} \ell_2 + c_3 \ell_1) \\
 T_{1d_{2y}} &= -o_x p_y + o_x p_x \\
 &= -s_{23} s_1 (s_{23} \ell_2 + s_3 \ell_1) - c_{23} s_3 (c_{23} \ell_2 + c_3 \ell_1) \\
 T_{1d_{2z}} &= -a_x p_y + a_x p_x \\
 &= -c_{23} (s_{23} \ell_2 + s_3 \ell_1) + s_{23} (c_{23} \ell_2 + c_3 \ell_1) \\
 T_{1\delta_{2x}} &= n_x = s_3 \\
 T_{1\delta_{2y}} &= o_x = c_3 \\
 T_{1\delta_{2z}} &= a_x = \phi
 \end{aligned}$$

3) 3rd column (1T_4)

$$\begin{aligned}
 T_{1d_{3x}} &= s_{3x} c_{13} \ell_2 + c_{3x} c_3 \ell_2 \\
 T_{1d_{3y}} &= -s_{3y} s_{13} \ell_2 - c_{3y} s_3 \ell_2 \\
 T_{1d_{3z}} &= -c_{3z} s_{13} \ell_2 + s_{3z} c_3 \ell_2 \\
 T_{1\delta_{3x}} &= n_x = s_3 \\
 T_{1\delta_{3y}} &= o_x = c_3 \\
 T_{1\delta_{3z}} &= o
 \end{aligned}$$

4) 4th column (3T_4)

3T_4 에서 $p_x = p_y = p_z = 0$ 이므로

$$\begin{aligned}
 T_{1d_{4x}} &= T_{1d_{4y}} = T_{1d_{4z}} = 0 \\
 T_{1\delta_{4x}} &= n_x = s_3 \\
 T_{1\delta_{4y}} &= o_x = c_3 \\
 T_{1\delta_{4z}} &= 0
 \end{aligned}$$

5) 5th column (4T_5)

4T_5 에서 $p_x = p_y = p_z = 0$ 이므로

$$\begin{aligned}
 T_{1d_{5x}} &= T_{1d_{5y}} = T_{1d_{5z}} = 0 \\
 T_{1\delta_{5x}} &= n_x = 0 \\
 T_{1\delta_{5y}} &= o_x = 0 \\
 T_{1\delta_{5z}} &= a_x = 1
 \end{aligned}$$

1) ~ 5)를 종합해서 나열하면 6×5 Matrix인 Jacobian이 된다.

II-3-2. Inverse Jacobian방정식과 해

미세 이동과 회전 Id, T δ 이 주어진 경우 로봇에서 미세 변화는 Inverse Jacobian에 의해 구해진다.

여기에서 이 6x5 Matrix의 Inverse Matrix 구하는 작업은 용이하지 않다. 따라서 본 논문에서는 각 관절의 Inverse Kinematic 방정식을 미분하여 각 관절의 미세 변화 $d\theta_i$ 를 구하였다.

$$\begin{cases} ds_1 = c_1 d\theta_1 \\ dc_1 = -s_1 d\theta_1 \end{cases} \quad (25)$$

$$\tan \theta_1 = \frac{N \sin \theta_1}{N \cos \theta_1}$$

$$\frac{d \tan \theta}{d \theta} = \frac{(N \sin \theta)^2 + (N \cos \theta)^2}{(N \cos \theta)^2}$$

$$d \tan \theta = \frac{N \cos \theta d(N \sin \theta) - N \sin \theta d(N \cos \theta)}{(N \cos \theta)^2}$$

$$\begin{aligned} \therefore d\theta &= \frac{(N \cos \theta)^2}{(N \sin \theta)^2 + (N \cos \theta)^2} \times \\ &\quad \frac{N \cos \theta d(N \sin \theta) - N \sin \theta d(N \cos \theta)}{(N \cos \theta)^2} \\ &= \frac{N \cos \theta d(N \sin \theta) - N \sin \theta d(N \cos \theta)}{(N \sin \theta)^2 + (N \cos \theta)^2} \end{aligned} \quad (26)$$

1) $d\theta_1$

식 $f_{111} = s_1 - c_1$ 에서

$$f_{111,1} = s_1 p_1 - c_1 p_1 = 0$$

여기서 식(25)을 이용하면

$$\begin{aligned} df_{111,1} &= c_1 p_1 d\theta_1 + s_1 d p_1 + s_1 p_1 d\theta_1 - c_1 d p_1 \\ &= (c_1 p_1 + s_1 p_1) d\theta_1 + s_1 d p_1 - c_1 d p_1 \end{aligned}$$

여기에서 $df_{111,1} = 0$ 이므로

$$\therefore d\theta_1 = \frac{-c_1 d p_1 - s_1 d p_1}{c_1 p_1 + s_1 p_1} \quad (27)$$

2) $d\theta_2$

식 $s_2 = s_1 n_2 - c_1 n_2$, $c_2 = s_1 o_2 - c_1 o_2$ 에서

$$Ns_2 = s_2 = s_1 n_2 - c_1 n_2 \quad (28)$$

$$Nc_2 = c_2 = s_1 o_2 - c_1 o_2 \quad (29)$$

$$d(Ns_2) = ds_1 n_2 + s_1 dn_2 - dc_1 n_2 - c_1 dn_2 \quad (30)$$

$$d(Nc_2) = ds_1 o_2 + s_1 do_2 - dc_1 o_2 - c_1 do_2 \quad (31)$$

식(28)-식(31)을 식(26)에 대입하면

$$\begin{aligned} d\theta_2 &= \frac{c_2 d(s_2) - s_2 d(c_2)}{s_2^2 + c_2^2} = c_2 d(s_2) - s_2 d(c_2) \\ &= (s_1 o_2 - c_1 o_2) (ds_1 n_2 + s_1 dn_2 - dc_1 n_2 - c_1 dn_2) \\ &\quad - (s_1 n_2 - c_1 n_2) (ds_1 o_2 + s_1 do_2 - dc_1 o_2 \\ &\quad - c_1 do_2) \end{aligned} \quad (32)$$

3) $d\theta_3$

식 $c_3 p_3 + s_3 p_3 = c_{23} \ell_3 + c_2 \ell_3 = p'_3$

$p_3 = s_{23} \ell_3 + s_2 \ell_3 = p'_3$ 에서

$$p'_3 = c_3 p_3 + s_3 p_3 \quad \therefore dp'_3 = dc_3 p_3 + c_3 dp_3 + ds_3 p_3 + s_3 dp_3$$

$$p'_3 = p_3 \quad \therefore dp'_3 = dp_3 \quad (33)$$

$$c_3 = \frac{p'_3{}^2 + p_3{}^2 - \ell_1{}^2 - \ell_2{}^2}{2\ell_1 \ell_2} \quad \text{에서}$$

$$\therefore dc_3 = \frac{2p'_3 dp'_3 + 2p_3 dp_3}{2\ell_1 \ell_2} \quad (34)$$

여기서 ℓ_1, ℓ_2 는 Link 길이로 Constant이다.

식 $s_3 = \pm \sqrt{1 - c_3^2}$ 에서

$$s_3 = \pm \sqrt{1 - c_3^2} = \pm (1 - c_3^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore ds_3 = \pm \frac{1}{2} (1 - c_3^2)^{-\frac{1}{2}} (-2c_3 dc_3)$$

$$= \mp \frac{c_3 dc_3}{\sqrt{1 - c_3^2}} \quad (35)$$

식(33)-식(35)를 식(26)에 대입 하면

$$d\theta_3 = \frac{c_3 ds_3 - s_3 dc_3}{s_3^2 + c_3^2} = c_3 ds_3 - s_3 dc_3 \quad (36)$$

4) $d\theta_4$

$$S_4 = \frac{(c_2 \ell_2 + \ell_1) p'_4 - s_2 \ell_2 p'_4}{(c_2 \ell_2 + \ell_1)^2 + s_2^2 \ell_2^2} \quad \text{에서}$$

$$= \frac{\ell (c_2 + 1) p'_4 - s_2 \ell p'_4}{\ell^2 (c_2 + 1)^2 + s_2^2 \ell^2}$$

$$= \frac{(c_2 + 1) p'_4 - s_2 p'_4}{\ell (c_2^2 + 2c_2 + 1) + s_2^2 \ell}$$

$$= \frac{(c_2 + 1) p'_4 - s_2 p'_4}{\ell (c_2^2 + s_2^2) + \ell (2c_2 + 1)}$$

$$= \frac{(c_2 + 1) p'_4 - s_2 p'_4}{2\ell (c_2 + 1)} \quad (37)$$

$$ds_4 = \frac{2\ell (c_2 + 1) (ds_2 p'_4 + (c_2 + 1) dp'_4}{[2\ell (c_2 + 1)]^2}$$

$$- ds_2 p'_4 - s_2 dp'_4 - [(c_2 + 1) p'_4 - s_2 p'_4] 2\ell dc_2 \quad (38)$$

$$c_4 = \frac{(c_2 \ell_2 + \ell_1) p'_4 + s_2 \ell_2 p'_4}{(c_2 \ell_2 + \ell_1)^2 + s_2^2 \ell_2^2} \quad \text{에서}$$

$$= \frac{(c_2 + 1) p'_4 + s_2 p'_4}{2\ell (c_2 + 1)} \quad (39)$$

$$dc_2 = \frac{2\ell(c_3+1)(dc_3p'_3 + (c_3+1)dp'_3 + ds_3p'_3 + s_3dp'_3)}{[2\ell(c_3+1)]^2}$$

$$-[(c_3+1)p'_3 + s_3p'_3]2\ell dc_3 \quad (40)$$

식(37)-식(40)를 식(26)에 대입 하면

$$d\theta_2 = \frac{c_1 ds_2 - s_1 dc_2}{s_1^2 + c_1^2} = c_1 ds_2 - s_1 dc_2 \quad (41)$$

5) $d\theta_1$

$$f_{21}(a) = c_1 = c_{11}(c_1 a_1 + s_1 a_2) + (s_{11}) a_3 \quad (42)$$

여기서 $c_{11} = N_{11}, c_1 a_1 + s_1 a_2 = N_{11} a_1$

$s_{11} = N_{12}$ 이라 하면

$$dN_{11} = dc_{11} = d(c_1 c_2 - s_1 s_2) \\ = dc_1 c_2 + c_1 dc_2 - ds_1 s_2 - s_1 ds_2 \quad (43)$$

$$dN_{12} = dc_{12} = d(c_1 d a_2 + ds_1 a_3 + s_1 da_3) \quad (44)$$

$$dN_{13} = d(s_2 c_2 + s_3 c_2)$$

$$= ds_2 c_2 + s_2 dc_2 + ds_3 c_2 + s_3 dc_2 \quad (45)$$

$$d c_1 = dN_{11} N_{11} + N_{11} dN_{11} + dN_{12} a_1 + N_{12} da_1 \quad (46)$$

$$s_1 = -s_{11}(c_1 a_1 + s_1 a_2) + (s_{11}) a_3 \quad (47)$$

여기에서 $s_{11} = \mu_{11}, c_{11} = \mu_{12}$ 라 하면

$$s_1 = -\mu_{11} N_{12} + \mu_{12} a_3$$

$$d\mu_{11} = ds_{11} = d(s_2 c_2 + s_3 c_2) \\ = ds_2 c_2 + s_2 dc_2 + ds_3 c_2 + s_3 dc_2 \quad (48)$$

$$d\mu_{12} = d(c_1 c_2 - s_1 s_2) \\ = dc_1 c_2 + c_1 dc_2 - ds_1 s_2 - s_1 ds_2 \quad (49)$$

$$\therefore ds_1 = -d\mu_{11} N_{12} - \mu_{11} dN_{12} + d\mu_{12} a_3 + \mu_{12} da_3 \quad (50)$$

식(42)-식(50)을 식(26)에 대입 하면

$$\therefore d\theta_1 = \frac{c_1 ds_1 - s_1 dc_1}{s_1^2 + c_1^2} \\ = c_1 ds_1 - s_1 dc_1 \quad (51)$$

II-4. Interface 설계

APPLE-II 컴퓨터에서 계산된 Data를 로봇의 지능 보드로 전송해 주기 위하여 그림3과 같은 Interface 회로를 설계 제작 하였다.

이 회로는 Memory-mapped I/O 방식으로 설계 되었고 Parallel 전송 방식을 사용하였다. 이때 Data는 ASCII Code로 출력하여 Intellegince 보드의

Z-80 마이크로프로세서에서 해석하여 대동한 Data를 출력

시켰다.

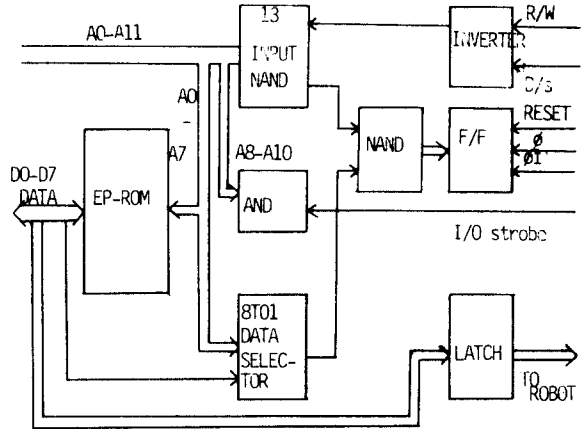


그림3. Interface 회로

III. 결론

본 논문에서는 Kinematic과 Inverse Jacobian을 이용하여 로봇 팔의 운동을 제어하고 이를 위하여 마이크로 컴퓨터와의 인터페이스 회로를 연구 하였다.

Inverse Jacobian은 작은 범위에서의 운동이므로 로봇가 정밀 작업 즉 용접, 조립등 에 이러한 미세 변화를 따져 주어야만 가능할 것이다. 또한 위치 정보들을 받는 로봇은 오차에대한 보장을 위해서도 필요 할 것으로 시료 된다.

본 논문의 실험은 직선의 경로를 추적하여 본 결과 TOP-1로봇의 경우 각 Segment의 길이를 1-3mm 정도로 한 경우 주어진 경로를 잘 추적 하였다. 그리고 이결과로 정밀 분야에 충분히 이용 될 수 있으리라 생각 된다. 또한 여기서 연구된 Software는 로봇 Dynamics와 결합되면 더욱 훌륭한 로봇 제어에 기여 될 것이다.

참고 문헌

1. R. Paul "Robot Manipulators Mathematics, Programing, and Control" The MIT Press. 1982.
2. Artwick "Micro computer Interfacing" Prentice-Hall
3. 이 재섭 "로봇 Inverse Kinematic 제어와 도형 인식에 관한 연구" 건국대학원. 1984.
4. "Z-80 Technical Manual" Zilog