작업에 따른 로보트-포지셔너 시스템의 최적 경로제어

전 의 식* 오 재 응**

* 천안공업전문대학 용접기술과 ** 한양대학교 정밀기계공학과

Task Oriented Optimal Trajectory Control of Robot-Posioner System

Euy-Sik Jeon* Jae-Eung Oh**

* Dept. of Welding Technology, Chunan National Junior Technical College

** Dept. of Precision Mechnical Eng., Hanyang University

ABSTRACT

Recently, due to the development of new technology and products , FA has been accelerating for obtaining high-quality and saving of resources and power. Introduction of automation to the field which has bad working condition is needed and welding is one of these field.

In this study, solving algorithm for down hand control which requires in the automatic arc welding system is proposed. For the verification of the algorithm, numerical examples are shown and visulization is carried out using developed graphic tools.

1. 서론

최근 신기술, 신제품 개발이 활발해 짐에 따라 자원 및 동력 절약, 고품질화를 위한 공장자동화가 가속화되고 있다. 이중 산업 전반에 널리 쓰이면서 작업조건이 좋지않은 분야에 자동화의 도입이 더욱 절실하며 이러한 대표적인 분야를 용접이라 할 수 있다.

용접자동화는 광학센서나 아크센서 등의 계측자동화로 부터 용접 파라미터를 입력시켜 이룰 수 있으며, 이를 위하여는 용접기구 (로보트-포지셔너)의 정확한 궤적제어가 수행되어야 하며 중력이 용접부의 금속용융과정을 도와주는 또 일정한 작업속도 유지 및 용접시임의 정확한 추적 등이 중요한 사항으로 요구되어진다.

본 연구에서는 자동아크용접시스템에서 요구되는 아래보기 자세 용접의 궤적제어를 위한 알고리즘을 제시하고자 한다. 이를 위하여 매니퓰레이터의 위치, 속도, 퍼지셔너 축에 대한 위치 벡터, 아래보기 용접자세에서의 포지셔너 간걸 속도에 대해 요구되는 운동학적 변환을 개산하면서 일정한 용접속도 제어가 이루어 지도록 변환 알고리즘을 유도하고자 한다. 작업특성에 따라 용접작업을 분석하며 작업 목적에 맞게 궤적의 최적제어를 하고, 그 타당성 검증을 위해 수치 예 및 그래픽 툴을 이용한 가시적 검증을 행하고자 한다.

2. 로보트-포지셔너 시스템의 기구학적 해석

아래보기 용접자세는 다른 자세에 비해 칠전물이 많으며 다층용접의 경우 pass의 수가 적어도 된다는 장점을 지니고 있다.

로보트와 포지셔너를 이용하여 자동용접을 수행할 때

(i) 로보트만 움직이는 경우

(ii) 포지셔너와 로보트가 동시에 제어되는 경우

의 두가지로 분류할 수 있으며 경우 (i)은 teaching pendant에 의해 교시가 쉽게 가능하지만 경우(ii)는 그렇기 못하다. 그러나 경우(i)은 작업영역이나 작업조건에 제한을 받게되므로 바람직하다고 볼 수 없으며 따라서 로보트와 포지셔너가 동시에 유지하면서 일정한 작업속도와 적당한 용접와이어 자세를 갖는 변환알고리즘을 유도하고자 한다.

대상의 시스템은 Fig.1과 같은 7자유도를 갖는 로보트-포지셔너 시스템이다. 로보트의 임의의 위치와 자세를 나타내는 변환 행렬은 다음 식과 같이 정의 한다.

$$A_J = [\,\underline{n}\ \ \underline{o}\ \ \underline{a}\ \ \underline{p}\,] \tag{1}$$

$$A_J = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

기준 좌표계에 대한 N개의 링크를 갖는 로보트의 손끝의 위치와 자세는 식(3)과 같이 정의할 수 있으며

$$[T_R(i)] = A_{R1}A_{R2}A_{R3}\cdots\cdots A_{RN} \tag{3}$$

같은 방법으로 M 자유도를 갖는 포지셔너는 다음과 같이 정의한다.

$$[T_P(i)] = A_{P1}A_{P2}A_{P3}\cdots\cdots A_{PN} \tag{4}$$

2.1 로보트-포지셔너 시스템의 역기구학적 해

로보트-포지셔너를 하나의 기구학적 모델로 구성하기 위

하여 포지셔너를 하나의 기구학적 모델로 구성하기 위하여 포지셔너 위의 기준좌표계로부터 로보트 손끝(end effector)까지 각 관절에 대하여 Danavit Hartenberg규칙에 의하여 좌표계를 Table 1과 Fig.1에 의해 각 좌표별 등차변환 행렬은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & -c_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} c_2 & 0 & -s_2 & a_2c_2 \\ s_2 & 0 & c_2 & a_2s_2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} c_3 & 0 & -s_3 & 0 \\ s_3 & 0 & c_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} s_4 & c_4 & 0 & a_4s_4 \\ -c_4 & s_4 & 0 & -a_4c_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} -s_5 & -c_5 & 0 & -a_5s_5 \\ c_5 & -s_5 & 0 & a_5c_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} c_6 & 0 & -s_6 & 0 \\ s_6 & 0 & c_6 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$A_7 = \begin{bmatrix} c_7 & -s_7 & 0 & 0 \\ s_7 & c_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서,

$s_i = \sin(\theta_i)$, $c_i = \cos(\theta_i)$

$s_{ij} = \sin(\theta_i+\theta_j)$, $c_{ij} = \cos(\theta_i+\theta_j)$

따라서 R-P시스템의 등차변환 행렬은 다음과 같으며,

$$T_7 = A_1A_2A_3A_4A_5A_6A_7 \quad (12)$$

Table 2와 같이 나타날 수 있다.

역기구학적 해를 구하기 위하여 식(12)로 부터

$$[A_2]^{-1}[A_1]^{-1}\,T_7 = A_3A_4A_5A_6A_7 \quad (13)$$

로 놓는다.

이때 식(13)의 좌변은

$$\begin{bmatrix} c_2(c_1n_x+s_1n_y)+s_2n_z & c_2(c_1o_x+s_1o_y)+s_2o_z \\ -s_1n_x+c_1n_y & -s_1o_x+c_1o_y \\ -s_2(c_1n_x+s_1n_y)+c_2n_z & -s_2(c_1o_x+s_1o_y)+c_2o_z \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} c_2(c_1a_x+s_1a_y)+s_2a_z & c_2(c_1p_x+s_1p_y)+s_2(p_z-d_1)-a_2 \\ -s_1a_x+c_1a_y & -s_1p_x+c_1p_y \\ -s_2(c_1a_x+s_1a_y)+c_2a_z & -s_2(c_1p_x+s_1p_y)+c_2(p_z-d_1) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

이때 우변은

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

우선 포지셔너의 회전각을 임의로 가정한다.

$$\theta_2 = C \quad (\text{임의의 각도}) \quad (16)$$

$$\frac{r_{24}}{r_{14}} = \frac{r_{34}}{r_{14}} \quad (17)$$

식(17)을 풀어 정리하면

$$c_1\{c_2(a_2p_x - a_2(p_z - d_1)) + a_2a_x\} + s_1\{c_2(a_2(p_z - d_1) - a_2p_x) - a_2a_z\} = c_2(p_xa_y - p_ya_x) \quad (18)$$

식 (18)을 3 각법에 의해 대치시키면

$$c_1A + s_1B = K \quad (19)$$

여기서

$A = c_2(a_2p_x - a_x(p_z - d_1)) + a_2a_x$

$B = c_2(a_x(p_z - d_1) - a_2p_x) - a_2a_z$

$K = c_2(p_xa_y - p_ya_x)$

$A = R\cos\phi$, $B = R\sin\phi$ 라 놓으면 식(19)는

$$s_1c + c_1s = \frac{K}{R} \quad (20)$$

$$s(\theta_1+\phi) = \frac{K}{R}$$

여기서 $R = \sqrt{A^2+B^2}$, $\phi = \tan^{-1}(\frac{B}{A})$ 이며

따라서,

$$c(\theta_1+\phi) = \sqrt{1-\frac{K^2}{R^2}}$$

그러므로

$$\theta_1 = -\tan^{-1}(\frac{B}{A}) + \tan^{-1}(\frac{K}{\sqrt{A^2+B^2-K^2}}) \quad (22)$$

θ_3 를 구하기 위하여

$$\frac{r_{24}}{r_{14}} = \frac{s_2}{c_2} \quad (23)$$

따라서

$$\theta_5 = \tan^{-1}\left[\frac{-S_1 P_x + C_1 P_y}{C_2(C_1 P_x + S_1 P_y) + S_2(P_z - d_1) - a_2}\right] \quad (24)$$

같은 방법으로 θ_i 를 구하면 Table 3과 같다.

2.3 자코비안을 이용한 최적화

로보트-포지셔너 시스템에서 작업은 포지셔너의 마운팅(Mounting)좌표계로부터 서술되므로 포지셔너 상에서 서술되는 i번째 작업은 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$X(i) = f_i(\theta) \quad (25)$$

이를 실현하는 최적해는 의사역변환을 이용 다음과 같이 풀 수 있다.

$$d\theta = J^{+}(\theta)dX + (I - J^{+}(\theta)J(\theta))dP \quad (26)$$

여기서 $J^{+}(\theta)$: $J(\theta)$의 의사역변환
I : n × n 단위행렬
$(I - J^{+}(\theta)J(\theta))$: 사용작용소
dP : 임의의 미소 벡터

여기에서 P는 다시 성능지수로 다음과 같이 나타낼 수 있으며

$$P = H(\theta) \quad (27)$$

이 성능지수는 작업의 특성에 따라 결정할 수 있다.

3. 용접자세에 따른 경로 제어

아크용접은 다음과 같은 몇가지 중요한 사항이 요구된다.
(i) 임의의 위치에서 용접작업시 중력은 금속 용해 과정을 방해하기 보다 도와 주어야한다.
(ii) 용접부의 일정한 입열을 위하여 토치의 작업속도를 일정하게 해주어야한다.
(iii) 용접부를 따라 모든 점에서 적당한 용융을 확실히 하기 위하여 용접조인트를 정확히 추적하는 것이 필요하다.

3.1 아래보기 용접

Fig. 2(a)와 같이 용접선이 중력방향과 수직하지 않은 경우는 중력으로 인해 용융금속이 용접과정을 방해할 수 있다. 따라서 아래보기 용접자세를 취해야 할 필요가 있으며, 이는 Fig. 2(b)와 같이 함으로써 이룰 수 있다.

3.2 작업에 따른 경로 제어

포지셔너는 중력방향의 수직평면안에 용접선이 존재하도록 움직여야 하며, 이는 용접선의 단위 벡터 $n_s(i)$와 작업때문에 수직인 $n_g(i)$에 의해 다음과 같이 수식화할 수 있다.

$$n_s(i) = \frac{X(i) - X(i-1)}{\| X(i) - X(i-1) \|} \quad (28)$$

$$n_g(i) = \frac{a(i) - [n_s(i) \cdot a(i)]\, n_s(i)}{\| a(i) - [n_s(i) \cdot a(i)]\, n_s(i) \|} \quad (29)$$

$$f_g = n_g \times g \quad (30)$$

$$\|f_g\| \to 0 \text{ 이면 } n_g \to n_g \parallel g \quad (31)$$

4. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 및 고찰

아래보기 용접자세에서 2 차원 및 3차원 작업의 시뮬레이션을 위하여 Table 4와 같이 4가지로 시뮬레이션을 하였다. 작업 1은 1차원 직선 작업, 작업 2는 3차원 직선작업, 작업 3은 원작업, 작업 4는 sine 곡선을 나타낸다.

4.1 2차원 아래보기 용접작업

작업 1,2는 x-y 평면에서 이루어 지므로 포지셔너의 Tilting각이 움직이지않고 있음을 알 수 있다. 또, 포지셔너와 로보트가 서로 반대 위상으로 움직이면서 작업효율을 증대시킴을 알 수 있다. 포지셔너의 [illegible]를 고려하지 않으면 아래보기 용접자세에서 거의 singular에 가까울 수 있으나, 로보트가 45° 기울어져 있으므로 mobility가 별 어려움이 없이 잘 움직일 수 있음을 짐작할 수 있다. Fig.4, Fig.5는 2차원 작업이 잘 이루어지고 있음을 보이고 있다.

4.2 3차원 아래보기 용접 작업

3절에서 언급한 바와 같이 용접선이 중력장의 방향에 수직인 평면내에 있지 않은 경우를 Table 4의 작업3과 작업 4에서 보여주고 있다. 직선과 곡선 작업에서 모두 유연하게 포지셔너가 아래보기 용접자세를 위해 움직이면서 동시제어가 됨을 알 수 있다.

5. 결론

로보트-포지셔너 시스템의 아래보기 용접작업의 최적경로 제어를 연구한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 로보트-포지셔너 시스템의 아래보기 용접작업을 위한 역기구학적 해를 구하였다.
둘째, 복잡한 구조물의 아래보기 용접작업은 로보트-포지셔너의 동시제어에 의해 작업효율을 높일 수 있었다.

향후 용접조건 (용접 전류, 전압, 와이어 이송 등)에 관한 연구가 더 병행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] Cook, George E.,"Robotic Arc Welding:Research in Sensory Feedback Control.",IEEE Trans.on Industrial Electronics, Vol.IE-30, No.3 PP.252-268,August.1983

[2] Richardson,R.W.,Farson,D.F.,Jones,C.S.and Rogers, P.F.,"A Vision Based Adaptive Welding System for Aerospace,"Proc.of 1985 American Welding Society Conv.,PP.110-111, April 29 May 3, 1985

[3] Denavit,J.and Hartenberg,R.S.,"A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices," Journal

of Applied Mechanics, ASME Transactions, June 1955, PP.215-221

[4] Whitney, D.E., "Resolved Motion Rate Control of Manipulators and Human Prostheses," IEEE Transactions on Man-Machine Systems, Vol.MMS-10, No.2, June 1969, PP.47-53

[5] Shigeo Matsuura and Yoshinori Tanimoto, "The Recent Nendestructure Testing by X-rays", 비파괴 검사, 제 35 권 10 호, PP.704-711, 소화 61

[6] Shimon Y.Nof, "Handbook of Industrial Robotics", John Wiley & Sons, 1985

[7] Kamal Youcef-Toumi, Harubiko Asada, "The Design of Open-loop Manipulator Arms with Decoupled and Configration-Invarient Inertia Tensors", IEEE International Conference on Robotics and Automation, PP. 2018-2026, 1985

[8] Masaru Uchiyama, Kunitoshi Shimizu and Kyojiro Hakomer, "Performance Evaluation of Manipulators using the Jacobian and its Application to Trajectory Planning", 2nd Robotics Research, MIT Press, PP.447-454, 1984

[9] Yoshikawa T, "Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy", Robotics Reasearch 1st ed, PP.735-748, 1984

[10] Klein, C.A., "Use of Redundancy in the Design of Robotic System", 2nd Robotics Research, 1984

[11] 전이석, 장재원, 석일홍, 조재웅, 엄성하, "로봇과 프리셔터 시스템의 특이성 분석과 여유 자유도 제어", 대한기계학회 논문집 제 12 권 제 6 호 PP.1252-1264, 1988

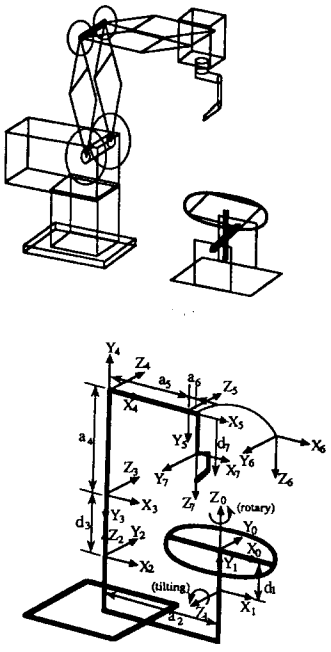
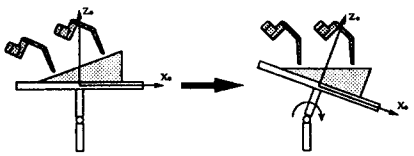


Fig.1 A schematic drawing of robot positioner system



(a) (b)

Fig.2 Robot positioner system with down hand control

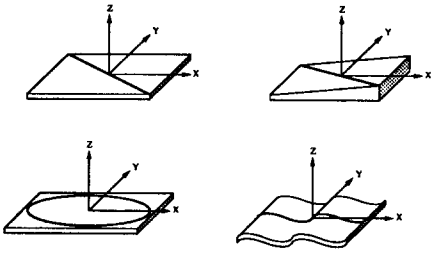


Fig.3 Various type of tasks

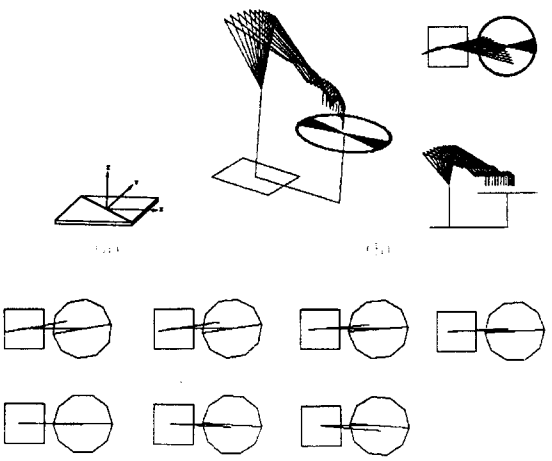


Fig.4 Graphic simulation for task 1

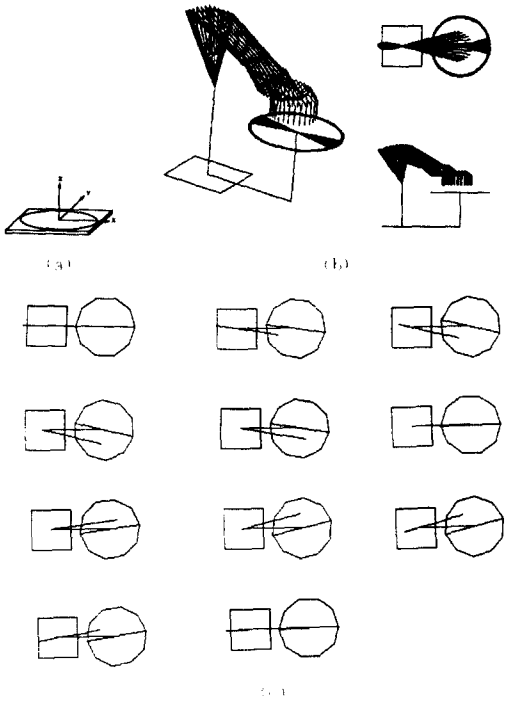


Fig.5 Graphic simulation for task 2

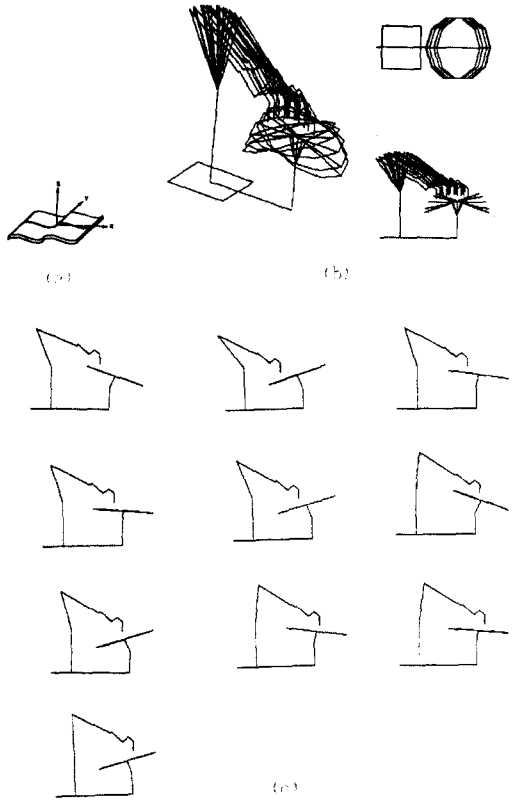


Fig.7 Graphic simulation for task 4

Table 1 Link parameters of robot positioner system

Link	θ_i	α_i	a_i	d_i
1	θ_1	90°	0	-3.03
2	θ_2	-90°	-11.80	0
3	θ_3	-90°	0	5.04
4	θ_4+90°	0°	9.00	0
5	θ_5 -90°	0°	9.00	0
6	θ_6	-90°	0.35	0
7	θ_7	0°	0	6.30

(unit : inch)

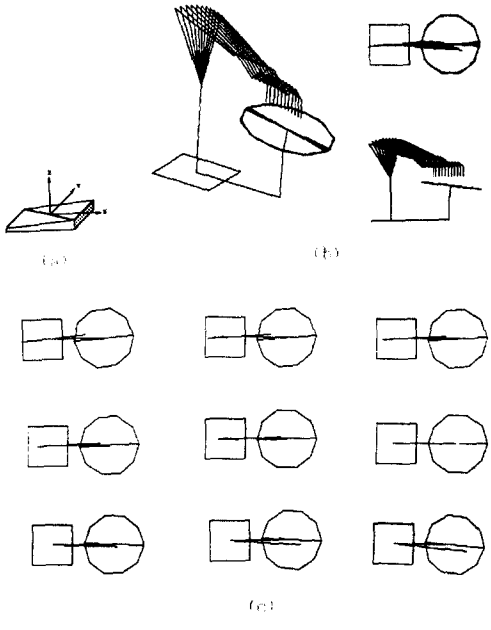


Fig.6 Graphic simulation for task 3

Table 2 Direct kinematic solution for robot positioner system

$$
\begin{bmatrix}
c_1(c_2r_{11}-s_2r_{21})-s_1r_{31} & c_1(c_2r_{12}-s_2r_{22})-s_1r_{32} & c_1(c_2r_{13}-s_2r_{23})-s_1r_{33} & c_1(c_2r_{14}-s_2r_{24}+c_2a_2)-s_1r_{34} \\
s_1(c_2r_{11}-s_2r_{21})+c_1r_{31} & s_1(c_2r_{12}-s_2r_{22})+c_1r_{32} & s_1(c_2r_{13}-s_2r_{23})+c_1r_{33} & s_1(c_2r_{14}-s_2r_{24}+c_2a_2)+c_1r_{34} \\
s_2r_{11}+c_2r_{21} & s_2r_{12}+c_2r_{22} & s_2r_{13}+c_2r_{23} & s_2(r_{14}+a_2)+c_2r_{24}+d_1 \\
0 & 0 & 0 & 1
\end{bmatrix}
$$

Note: $s_i=\sin(\theta_i)$, $c_i=\cos(\theta_i)$, $s_{ij}=\sin(\theta_i+\theta_j)$, $c_{ij}=\cos(\theta_i+\theta_j)$

$$
\begin{bmatrix}
r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\
r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\
r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\
0 & 0 & 0 & 1
\end{bmatrix}
$$

$$
=\begin{bmatrix}
c_1c_{456}c_7+s_1s_7 & -c_1c_{456}s_7+s_1c_7 & -c_1s_{456} & c_1(-d_7s_{456}+a_6c_{456}+a_5c_{45}+a_4s_4) \\
s_1c_{456}c_7-c_1s_7 & -s_1c_{456}s_7-c_1c_7 & -s_1s_{456} & s_1(-d_7s_{456}+a_6c_{456}+a_5c_{45}+a_4s_4) \\
-s_{456}c_7 & s_{456}s_7 & -c_{456} & -d_7c_{456}-a_6s_{456}-a_5s_{45}+a_4c_4-d_1 \\
0 & 0 & 0 & 1
\end{bmatrix}
$$

Table 3 Inverse kinematic solution of robot positioner system

Joint coordinate	Analytical expression
θ_1	$-\tan^{-1}(\frac{B}{A})+\tan^{-1}(\frac{K}{\sqrt{A^2+B^2-K^2}})$
θ_2	Arbitary Constant
θ_3	$\tan^{-1}\left[\frac{-s_1 p_x+c_1 p_y}{c_2(c_1 p_x+s_1 p_y)+s_2(p_z-d_1)-a_2}\right]$
θ_4	$\tan^{-1}\left[\frac{\alpha a_3 c_5+\beta(a_4-a_5 s_5)}{\beta a_3 c_5-\alpha(a_4-a_5 s_5)}\right]$
θ_5	$\sin^{-1}\left[\frac{\alpha^2+\beta^2-a_3^2-a_5^2}{2a_3 a_5}\right]$
θ_6	$\theta_{456}-\theta_4-\theta_5$
θ_7	$\tan^{-1}\left[\frac{-s_2(c_1 o_x+s_1 o_y)+c_2 o_z}{-s_2(c_1 n_x+s_1 n_y)+c_2 n_z}\right]$

Note : $\theta_{456}=\cos^{-1}[s_2(c_1 a_x+s_1 a_y)-c_2 a_z]$

$\alpha = d_7-d_7 c_{456}-a_6 s_{456}+s_2(c_1 p_x+s_1 p_y)$
$-c_2(p_z-d_1)$

$\beta = c_3\{c_2(c_1 p_x+s_1 p_y)+s_2(p_z-d_1)-a_2\}$
$+s_3(-s_1 p_x+c_1 p_y)+d_7 s_{456}-a_6 c_{456}$

$A = s_2(a_z p_y-a_y(p_z-d_1))+a_2 a_y$

$B = s_2(a_x(p_z-d_1)-a_z p_x)-a_2 a_x$

$K = c_2(p_x a_y-p_y a_x)$

Table 4. Task Specification

unit (inch)

Task	Initial point			Final point			Hand orientation			
	x_i	y_i	z_i	x_f	y_f	z_f	α	β	γ	
1	-3	3	1	3	-3	1	0°	-90°	0°	2D Line
2	-3	0	1	-3	0	1	0°	-90°	0°	Circle
3	-3	1	2	3	-1	3	0°	-90°	0°	3D Line
4	-3	0	1	3	0	1	0°	-90°	0°	Sine Curve