

<論 文>

로봇과 포지셔너 시스템의 특이성 분석과 여유 자유도 제어

전의식* · 장재원** · 서일홍*** · 오재응**** · 염성하****

(1988년 4월 11일 접수)

Analysis of Singularity and Redundancy Control for Robot-Positioner System

Euy Sik Jeon, Jae Won Chang, Il Hong Suh, Jae Eung Oh and Sung Ha Yum

Key Words : System Performance(계의 성능), Degree of Freedom(자유도), Manipulability Measure(가조작성 측정), Kinematic Modelling Technique(기구학적 모델링 기법)

Abstract

Recently industrial robots together with positioners are often used to enhance the system performance for arc welding. In this paper, a redundancy control method is proposed to the robot-positioner system with seven degrees of freedom, where one kinematic modelling technique is employed. Also, manipulability measure using the Jacobian matrix is utilized to visualize the distributions of manipulability in the given cutting plane of the workspace. An algorithm maximizing the manipulability is applied to the robot and the positioner and the simulation results are shown for the task following a linear path.

1. 서 론

최근 산업이 고도로 발달됨에 따라 생산성 및 품질향상을 위하여 자동화기기를 포함한 여러가지 기능을 갖는 산업용 로봇이 생산현장에 투입되고 있다. 실제 산업현장에서는 산업용 로봇의 성능향상을 위한 방법으로 자유도수를 증가시키거나 보다 효율적인 작업을 위하여 포지셔너 등의 주변장치와 결합하여 사용하고 있다. 특히 용접작업과 같이 좋지 못한 작업환경에서는 포지셔너를 이용한 작업이 효과적이다. 이러한 성능향상의 방법으로 P.K. Khosla⁽¹⁾ 등은 직교좌표형 로봇과 포지셔너 시스템(이하 R-P 시스템이라 함)을 시임 추적(seam tracking)에 적용, 6자유도를 갖는 로봇으로 모델

링하여 해석하였으며, 참고문헌 (2)에서는 하나의 기구학적 모델을 이용한 로봇 시스템 제어방법에 대하여 제안하였다.

한편 로봇의 연속경로 제어에 있어서 카르테시안 공간(cartesian space)에서 기술된 경로와 관절공간(joint space)사이의 비선형 연속대응관계 때문에 카르테시안 공간상의 경로는 관절공간과 특이성(singularity)에 관련된 여러 가지 문제점을 안고 있다. 로봇의 구조적 특성은 로봇의 성능에 관계되며 이러한 성능의 평가기준으로 Yoshikawa, Uchiyama^(3,4) 등은 기구학적 가조작성 측정으로 Jacobian의 특이치(singular value)곱을 제안한 바 있다. 한편, 2자유도를 갖는 로봇 매니퓰레이터에 대한 성능평가 및 이의 가시화가 W. Homsup⁽¹⁰⁾ 등에 의해 연구된 바 있으나 일반 산업현장에서 사용되는 로봇은 장애물 회피 및 효율적 작업을 위해 더 많은 자유도가 요구되고 있다.

본 연구에서는 실제 산업현장에서 이용되고 있는 5자유도의 수직 다관절형 로봇과 2자유도의 포지셔

* 한양대학교 대학원

** 금성통신연구소

*** 한양대학교 공과대학 전자공학과

****정희원, 한양대학교 공과대학 정밀기계공학과

너를 하나의 기구학적 모델로 모델링하여 기구학적 해석을 하고 이때 발생하는 여유자유도 제어 및 그 타당성을 검토하고자 한다. 이를 위하여 먼저 역기구학적 해를 여유자유도인 포지셔너의 틸팅(tilting) 관절각을 고정한 후 6자유도의 로봇으로 모델링하여 해석적으로 구하는 방법을 제시하고, Jacobian 행렬을 통해 특이상태를 분석하고자 한다. 또한 여유자유도가 특이성회피를 목적으로 하는 R-P 시스템의 작업성능에 어떠한 영향을 미치는가를 알기 위해 역기구학적 해로부터 구한 각 관절각을 Jacobian 행렬을 이용하는 조작성지수식에 대입하여 조작성지수를 얻고, 이 조작성지수의 등고선그래프로부터 높은 작업성능을 갖는 여유자유도 각을 구하고자 한다. 아울러, 주작업 및 특이성회피를 목적으로 하는 부작업을 만족시키는 여유자유도 제어방법의 경우에 높은 작업성능을 갖는 방향으로 관절각이 변화하는지를 역기구학적 해만을 이용한 경우와 비교 검토하고자 한다.

2. R-P시스템의 기구학적 해석

R-P시스템은 5자유도를 갖는 수직 다관절형 로봇과 2자유도의 포지셔너로 구성되며 좌표계는 다음과 같은 방법으로 설정한다. R-P시스템의 작업은 포지셔너 위의 시험편에 대하여 수행되므로 포지셔너 위를 기준좌표계로 한다. 로봇과 포지셔너를 하나의 기구학적 모델로 구성하기 위하여 포지셔너 위의 기준좌표계로부터 로봇 손끝(end-effector)까지 각 관절에 대하여 Denavit-Hartenberg 규칙에 의하여 좌표계를 설정한다.

이상의 방법에 의하여 결정된 R-P시스템의 관절 매개변수와 좌표계를 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1과 Fig. 1에 의해 각 좌표별 등차변환행렬은 다음과 같이 구할 수 있다.

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

$$A_2 = \begin{bmatrix} c_2 & 0 & -s_2 & a_2 c_2 \\ s_2 & 0 & c_2 & a_2 s_2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

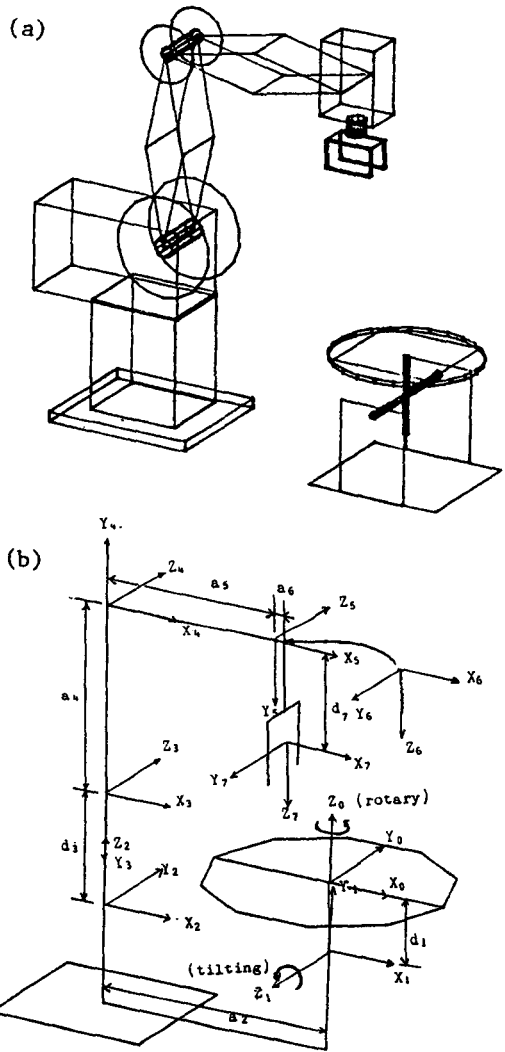


Fig. 1 A schematic drawing of Rhino-XR3 and rotary-tilting carousel
(a) Configuration of R-P system,
(b) Coordinate system of R-P system)

Table 1 Link parameters of R-P 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	$\theta_4 + 90^\circ$	0°	9.00	0
5	$\theta_5 - 90^\circ$	0°	9.00	0
6	θ_6	-90°	0.35	0
7	θ_7	0°	0	6.30

(unit : inch)

$$A_3 = \begin{bmatrix} c_3 & 0 & -s_3 & 0 \\ s_3 & 0 & c_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} s_4 & c_4 & 0 & a_4 s_4 \\ -c_4 & s_4 & 0 & -a_4 c_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} -s_5 & -c_5 & 0 & -a_5 s_5 \\ c_5 & -s_5 & 0 & a_5 c_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} c_6 & 0 & -s_6 & a_6 c_6 \\ s_6 & 0 & c_6 & a_6 s_6 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$A_7 = \begin{bmatrix} c_7 & -s_7 & 0 & 0 \\ s_7 & c_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서

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

따라서, R-P시스템의 등차변환행렬은 다음과 같으며,

$$T_7 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 A_7 \quad (8)$$

Table 2와 같이 나타낼 수 있다.

역기구학적 해를 구하기 위하여 식 (8)로부터

$$[A_2]^{-1} [A_1]^{-1} T_7 = A_3 A_4 A_5 A_6 A_7 \quad (9)$$

로 놓는다.

이때 식 (9)의 좌변은

$$\begin{bmatrix} c_2 (c_1 n_x + s_1 n_y) + s_2 n_z \\ -s_1 n_x + c_1 n_y \\ -s_2 (c_1 n_x + s_1 n_y) + c_2 n_z \\ 0 \\ c_2 (c_1 o_x + s_1 o_y) + s_2 o_z \\ -s_1 o_x + c_1 o_y \\ -s_2 (c_1 o_x + s_1 o_y) + c_2 o_z \\ 0 \\ c_2 (c_1 a_x + s_1 a_y) + s_2 a_z \\ -s_1 a_x + c_1 a_y \\ -s_2 (c_1 a_x + s_1 a_y) + c_2 a_z \\ 0 \\ c_2 (c_1 p_x + s_1 p_y) + s_2 (p_z - d_1) - a_2 \\ -s_1 p_x + c_1 p_y \\ -s_2 (c_1 p_x + s_1 p_y) + c_2 (p_z - d_1) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

이며 우변은

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

우선 포지셔너의 틸팅각을 임의로 가정한다.

$$\theta_2 = C \quad (\text{임의의 각도}) \quad (12)$$

$$\frac{r_{23}}{r_{13}} = \frac{r_{24}}{r_{14}} \quad (13)$$

식 (13)을 풀어 정리하면

$$c_1 \{s_2 (a_2 p_y - a_y (p_z - d_1))\}$$

Table 2 Direct kinematic solution for R-P system

$c_1 (c_2 r_{11} - s_2 r_{31}) - s_1 r_{21}$	$c_1 (c_2 r_{12} - s_2 r_{32}) - s_1 r_{22}$	$c_1 (c_2 r_{13} - s_2 r_{33}) - s_1 r_{23}$	$c_1 (c_2 r_{14} - s_2 r_{34} + c_2 a_2) - s_1 r_{24}$
$s_1 (c_2 r_{11} - s_2 r_{31}) - c_1 r_{21}$	$s_1 (c_2 r_{12} - s_2 r_{32}) + c_1 r_{22}$	$s_1 (c_2 r_{13} - s_2 r_{33}) + c_1 r_{23}$	$s_1 (c_2 r_{14} - s_2 r_{34} + c_2 a_2) + c_1 r_{24}$
$s_2 r_{11} + c_2 r_{31}$	$s_2 r_{12} + c_2 r_{32}$	$s_2 r_{13} + c_2 r_{33}$	$s_2 (r_{14} + a_2) + c_2 r_{34} + d_1$
0	0	0	1

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

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_3 c_{456} c_7 + s_3 s_7 & -c_3 c_{456} s_7 + s_3 c_7 & -c_3 s_{456} & c_3 (-d_7 s_{456} + a_6 c_{456} + a_5 c_{45} + a_4 s_4) \\ s_3 c_{456} c_7 - c_3 s_7 & -s_3 c_{456} s_7 - c_3 c_7 & -s_3 s_{456} & s_3 (-d_7 s_{456} + a_6 c_{456} + a_5 c_{45} + a_4 s_4) \\ -s_{456} c_7 & s_{456} s_7 & -c_{456} & -d_7 c_{456} - a_6 s_{456} - a_5 s_{45} + a_4 c_4 + d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$+ a_2 a_y \} + s_1 \{ s_2 (a_x (p_z - d_1) - a_2 p_x) - a_2 a_x \} = c_2 (p_x a_y - p_y a_x) \quad (14)$$

이다.

식 (14)를 3각법에 의해 대치시키면

$$c_1 A + s_1 B = K \quad (15)$$

여기서

$$\begin{aligned} A &= s_2 (a_2 p_y - a_y (p_z - d_1)) + a_2 a_y \\ B &= s_2 (a_x (p_z - d_1) - a_2 p_x) - a_2 a_x \\ K &= c_2 (p_x a_y - p_y a_x) \end{aligned}$$

$A = R \cos \phi$, $B = R \sin \phi$ 라 놓으면 식 (15)는

$$\begin{aligned} s_1 c_\phi + c_1 s_\phi &= \frac{K}{R} \\ s(\theta_1 + \phi) &= \frac{K}{R} \end{aligned} \quad (16)$$

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

따라서,

$$c(\theta_1 + \phi) = \sqrt{1 - \frac{K^2}{R^2}} \quad (17)$$

그러므로

$$\theta_1 = -\tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right)$$

Table 3 Inverse kinematic solution for R-P system

Joint coordinate	Analytical expression
θ_1	$-\tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{K}{\sqrt{A^2 + B^2 - K^2}}\right)$
θ_2	Arbitrary 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	$\tan^{-1}\left[\frac{\alpha a_6 c_5 + \beta (a_4 - a_6 s_5)}{\beta a_6 c_5 - \alpha (a_4 - a_6 s_5)}\right]$
θ_5	$\sin^{-1}\left[\frac{a^2 + \beta^2 - a_4^2 - a_5^2}{2a_4 a_5}\right]$
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 : $\theta_{456} = \cos^{-1}[s_2 (c_1 a_x + s_1 a_y) - c_2 a_z]$
 $\alpha = d_3 - d_7 c_{456} - a_6 s_{456} + s_2 (c_1 p_x + s_1 p_y) - c_2 (p_z - d_1)$
 $\beta = c_3 \{c_2 (c_1 p_x + s_1 p_y) + s_2 (p_z - d_1) - a_2\} + s_3 (-s_1 p_x + c_1 p_y) + d_7 s_{456} - a_6 c_{456}$
 $A = s_2 (a_2 p_y - a_y (p_z - d_1)) + a_2 a_y$
 $B = s_2 (a_x (p_z - d_1) - a_2 p_x) - a_2 a_x$
 $K = c_2 (p_x a_y - p_y a_x)$

$$+ \tan^{-1}\left(\frac{K}{\sqrt{A^2 + B^2 - K^2}}\right) \quad (18)$$

θ_3 를 구하기 위하여

$$\frac{r_{24}}{r_{14}} = \frac{s_3}{c_3} \quad (19)$$

따라서

$$\theta_3 = \tan^{-1}\left[\frac{-s_1 p_x + c_1 p_y}{c_2 (c_1 p_x + s_1 p_y) + s_2 (p_z - d_1) - a_2}\right] \quad (20)$$

같은 방법으로 θ_1 를 구하면 Table 3과 같다.

3. R-P시스템의 성능평가

3.1 조작성능의 평가를 위한 성능지수

n 자유도를 갖는 로봇의 관절변수를 $\theta_i (i=1, 2, \dots, n)$ 라 하고, 원하는 작업, X 를 m 개의 변수로 서술할 수 있다고 가정한다. θ 와 X 는 다음과 같은 관계식으로 주어진다.

$$X = f(\theta) \quad (21)$$

여기서

$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$ 는 관절각 벡터
 $X = [X_1, X_2, \dots, X_m]^T$ 는 카르테시안 공간상의 벡터

로봇의 작업을 서술하는 변수 X 를 조작변수라고 하며 식 (21)은 비선형방정식이므로 이를 선형화한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$dX = J(\theta) d\theta \quad (22)$$

여기서 dX : X 의 미분량 $\in R^m$

$d\theta$: θ 의 미분량 $\in R^n$

$J(\theta) = \partial f(\theta) / \partial \theta$: Jacobian행렬 $\in R^{m \times n}$

Yoshikawa, Uchiyama 등은 임의의 θ 혹은 $d\theta$ 에 대하여 작업수행을 위한 X 및 dX 를 실현할 수 있는가 하는 의미로 조작성능을 설명하였으며 이를 평가하기 위한 기준으로 자코비안 행렬의 이용을 제안하였다^(3,4). 이것은 로봇의 조작성능을 정량화한 것으로 조작성지수(manipulability measure)라고 한다.

조작성지수는 다음과 같이 정의한다.

$m = n$ 인 경우

$$\omega(\theta) = |\det J(\theta)| \quad (23)$$

$m < n$ 인 경우

$$\omega(\theta) = \sqrt{\det(J(\theta) J^T(\theta))} \quad (24)$$

$m \leq n$ 인 경우

$\text{rank } J(\theta) = m$ 이면

로봇의 여유자유도는 $(n - m)$ 이 된다.

rank $J(\theta) < m$ 이면

조작성지수 $\omega(\theta)$ 는 0이 되며 dX 에 해당하는 $d\theta$ 를 구할 수 없게 되어 특이상태에 놓이게 된다. 이러한 상태에서는 로봇은 몇개의 자유도를 상실하게 되며 여유자유도를 갖는 로봇은 여분의 자유도가 특이성회피에 활용된다.

$$\begin{bmatrix} -r_{24}g_{11} + r_{21}g_{14} & -r_{11}r_{34} + r_{31}(r_{14} + a_2) & J_{11}S_7 & -J_{12}C_7 & J_{13}C_7 & -d_7C_7 & 0 \\ -r_{24}g_{12} + r_{22}g_{14} & -r_{12}r_{34} + r_{32}(r_{14} + a_2) & J_{11}C_7 & J_{12}S_7 & J_{13}S_7 & d_7S_7 & 0 \\ -r_{24}g_{13} + r_{23}g_{14} & -r_{13}r_{34} + r_{33}(r_{14} + a_2) & 0 & -a_4S_{56} + a_5C_6 + a_6 & a_5C_6 + a_6 & a_6 & 0 \\ S_2r_{11} + C_2r_{31} & -r_{21} & r_{31} & -S_7 & -S_7 & -S_7 & 0 \\ S_2r_{12} + C_2r_{32} & -r_{22} & r_{32} & -C_7 & -C_7 & -C_7 & 0 \\ S_2r_{13} + C_2r_{33} & -r_{23} & r_{33} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$J_{11} = -r_{14}/C_3 \quad J_{12} = J_{13} - a_4C_{56} \quad J_{13} = d_7 - a_5S_6$$

$$g_{11} = C_2r_{11} - S_2r_{31} \quad g_{12} = C_2r_{12} - S_2r_{32} \quad g_{13} = C_2r_{13} - S_2r_{33} \quad g_{14} = C_2r_{14} - S_2r_{34} + a_2C_2$$
(25)

R-P시스템은 전체 7개의 관절을 가지므로 순계산 방법으로 조작성지수 값을 구하기는 쉽지 않기 때문에 자코비안 행렬의 랭크(rank)를 조사하는 방법으로 본 시스템의 특이상태를 조사한다.

우선 5관절형 로봇만의 자코비안 행렬은 식 (25)의 3열부터 7열까지 5개의 열로 구성한다. 이들 열을 관찰하면

상태 1) $S_{456} = 0, J_{11} = 0$
 $\theta_4 + \theta_5 + \theta_6 = 0^\circ, a_6 + a_5C_6 - a_4S_{56} = 0$ (26)

이때 3번째 열과 7번째 열이 같아져 로봇은 특이상태에 있게 된다.

한편 로봇이 포지셔너와 하나의 기구학적 모델이 되었을 경우의 자코비안 행렬은 전체 7개의 열로 구성되고 이의 랭크 수를 조사해 보면

상태 2) $S_{456} = 0, s_2 = 0, s_3 = 0$ (27)

일 때 자코비안 행렬의 4번째, 5번째 행은 독립적이지 않아 시스템은 특이상태에 놓인다.

상태 3) $s_{456} = s_2, s_3 = 0,$
 $[C_2(r_{14} + a_2) - S_2r_{34}] = 0$ (28)

이때 자코비안 행렬의 1번째 열이 7번째 열과 동일하며 시스템은 특이상태에 있게 된다.

3.3 작업공간내의 조작성지수 분포

로봇의 조작성능은 조작성지수에 의하여 평가되며 작업공간내에 조작성지수가 분포되어 있는 양상을 통하여 로봇의 전반적인 구조적 특성을 알 수 있다. 따라서 로봇의 설계나 제어에 조작성지수를 적용하기 위해서는 그것의 계산 및 시각화가 근본적인 문제이다. 그러나 일반적인 로봇의 자코비안

3.2 R-P시스템의 특이상태

로봇 손끝의 미소변화는 자코비안 행렬을 통하여 관절 좌표의 미소변화와 관련된다. R-P시스템의 자코비안 행렬은 다음과 같다.

행렬은 6개의 자유도로 서술되므로 전체 작업공간에 대하여 조작성지수의 분포를 나타내기란 어렵다. 이러한 문제점 때문에 작업공간 또는 관절공간상의 몇개의 자유도를 고정하여 주어진 작업단면에 대한 조작성지수의 계산 및 등고선 그래프를 이용한 시각화 방법을 논하고자 한다.

작업단면이란 작업공간상의 좌표 X, Y, Z 축 중에서 어느 자유도 하나가 고정된 평면을 말하며 이러한 작업평면상에서 로봇의 조작성능은 로봇 손끝의 자세를 고정하여 나타낸다.

n 개의 자유도를 갖는 로봇의 관절각 벡터는 다음과 같다.

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$$
 (29)

작업공간 좌표는 위치와 자세로 나타내며 카르테시안 좌표에 대한 로봇 손끝의 변화 및 미소변화를 Fig. 2에 나타내었다. 작업공간 좌표상에서 로봇 손끝의 위치와 자세의 벡터는 다음과 같다.

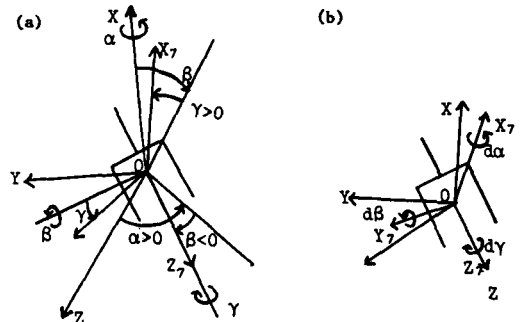


Fig. 2 Definition of the hand orientation angles and their differential change

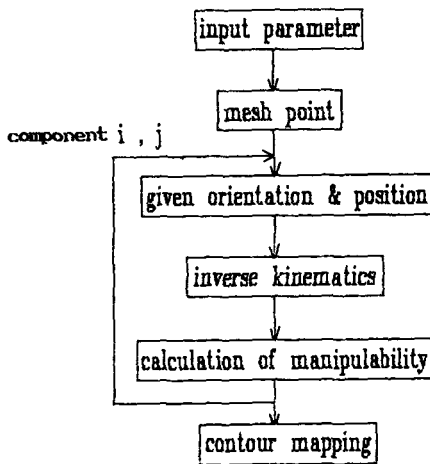


Fig. 3 Flow chart of the contour map for the distribution of manipulability

$$X = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]^T \quad (30)$$

여기서 X, Y, Z 는 기준 좌표에 대한 로봇 손끝의 위치 벡터이며 α, β, γ 는 자세를 나타내는 Euler 각이다.

이상의 정의를 토대로 작업공간 상에 분포된 조작성 지수를 등고선 그래프를 이용하여 시각화하는 방법을 Fig. 3의 흐름도에 나타내었다.

우선 조사하고자 하는 작업단면을 설정한 후 조사하고자 하는 위치를 적절히 분할한다. 각 분할점의 해당되는 위치에 대하여 역기구학적 해를 이용한 관절각도를 구한 후 자코비안 행렬을 결정한다. 그리고 자코비안 행렬을 이용하여 식 (23), (24)의 조작성지수를 수치적으로 계산한다. 다음 이들의 값을 연결하여 등고선 그래프로 나타낸다.

4. 여유자유도를 이용한 R-P시스템의 조작성지수제어

본 절에서는 R-P시스템에 여유자유도 제어방법의 적용이 가능함을 검토하고 R-P시스템이 갖는 여유자유도를 이용하여 조작성지수를 제어하는 방법에 대하여 논한다.

의사 역변환을 이용하여 선형 대수 방정식 (2)의 일반해를 구하면 다음과 같다.

$$d\theta = J^+(\theta) dX + (I - J^+(\theta)J(\theta)) dP \quad (31)$$

여기서 $J^+(\theta) : J(\theta)$ 의 의사 역변환

$I = n \times n$: 단위 행렬

$(I - J^+(\theta)J(\theta))$: 사용작용소

(projection operator) ρ

dP : 임의의 미소 벡터

본 절에서는 성능지수를 최대화하는 문제의 일환으로 조작성지수를 최대화하도록 여유자유도를 이용한다. 식 (31)에서 $(I - J^+(\theta)J(\theta)) dP$ 항은 로봇 손끝이 원하는 주작업을 수행한 후 여유분(redundancy)을 나타내고 있으며 성능지수 P 를 최대화하는데 이용된다.

성능지수 P 는 다음과 같이 선정한다.

$$P = H(\theta) \quad (32)$$

P 의 미소량 dP 는 다음과 같이 주어진다.

$$dP = \xi k, \quad \xi = \frac{\partial H(\theta)}{\partial \theta} \quad (33)$$

여기서 k 는 상수이다.

부차적인 작업의 성능지수를 다음과 같이 설정한다.

$$H(\theta) = k_1 \omega(\theta) \quad (34)$$

여기서 k_1 은 각 관절 모터의 최대 허용각속도의 범위를 넘지 않도록 다음과 같이 선정하였다.

$$k_1 = \left[\frac{d\theta_{\max} - J^+(\theta) dX}{(I - J^+(\theta)J(\theta)) \xi} \right] \quad (35)$$

이상에서 설명한 성능지수를 최대화하는 알고리즘의 흐름도를 Fig. 4에 나타내었다.

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

5.1 작업공간내의 조작성 지수 분포

R-P시스템의 작업은 포지셔너 위의 시험편에 대하여 수행되므로 포지셔너 위를 작업공간으로 한정한다.

각 경우에 대한 고정된 자유도를 Table 4에 나타내었다.

Fig. 5에서 Fig. 8은 Table 4에 나타낸 각 경우에 대한 작업 단면상의 조작성지수 분포 양상을 등고선 그래프를 이용하여 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 경우 1에 대한 것으로 Y 좌표가 0인치(inch)가 되는 위치에서 시스템은 특이상태에 있게 된다. 이것은 식 (27)의 특이상태 2)에 해당됨을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 경우 2에 대한 등고선 그래프로 경우 1의 특이상태가 존재하는 $Y=0$ 인치인 위치의 $X-Z$ 작업단면상이 등고선 그래프이다. Fig. 5(b)에서 알 수 있듯이 전영역에서 0에 가까운 조작성지수값을 보이므로 틸팅 관절이 0° 이며 로봇 손끝이 수직한 자세로는 Y 좌표가 0인치인 $X-Z$ 작업평면의 모든

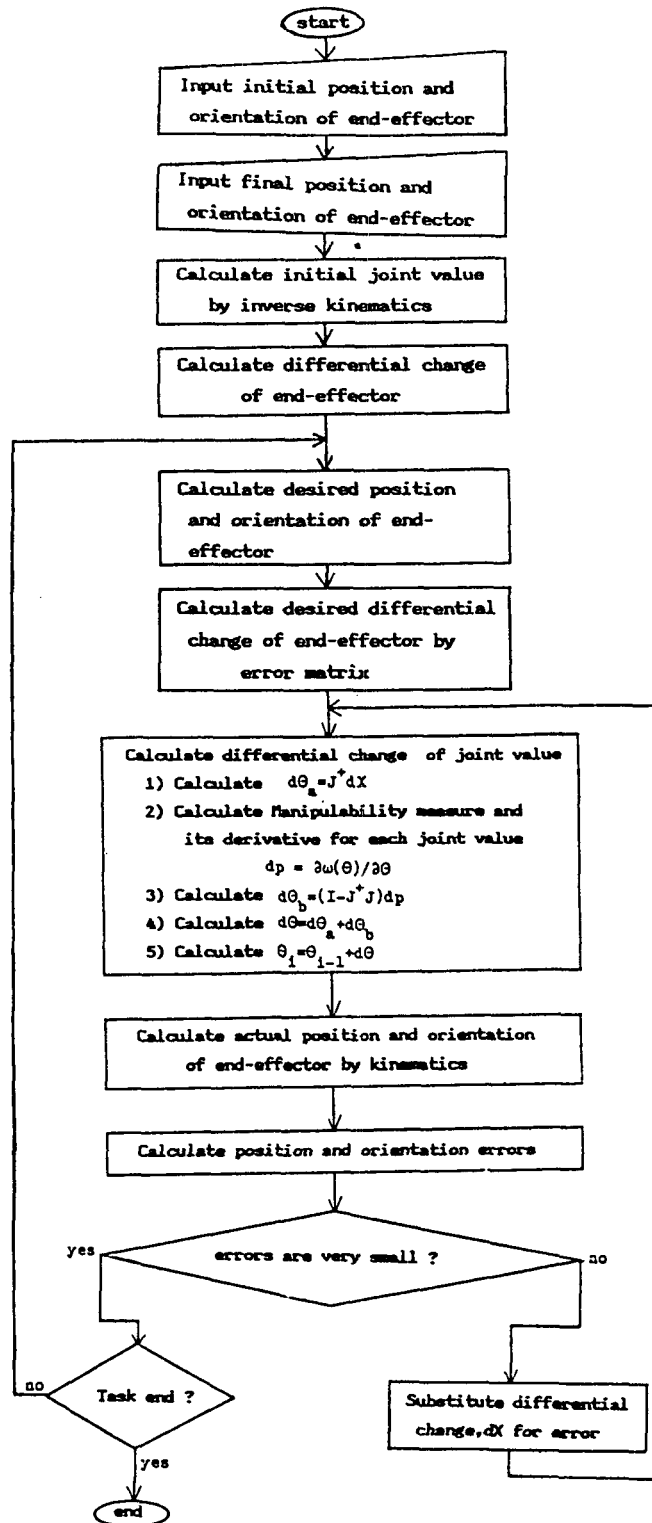


Fig. 4 Flow chart of the algorithm which maximize manipulability measure

Table 4 Fixed degree of freedom for each case study

Case	Hand orientation			Tilting joint	Hand position	Cutting plane
	α	β	γ			
1	0°	0°	0°	0°	Z=3.6	X, Y
2	0°	0°	0°	0°	Y=0	X, Z
3	0°	0°	0°	-15°	Z=3.6	X, Y
4	0°	0°	0°	-15°	Y=0	X, Z
5	0°	-90°	0°	0°	Z=3.6	X, Y
6	0°	-90°	0°	0°	Y=0	X, Z
7	0°	-90°	0°	-15°	Z=3.6	X, Y
8	0°	-90°	0°	-15°	Y=0	X, Z

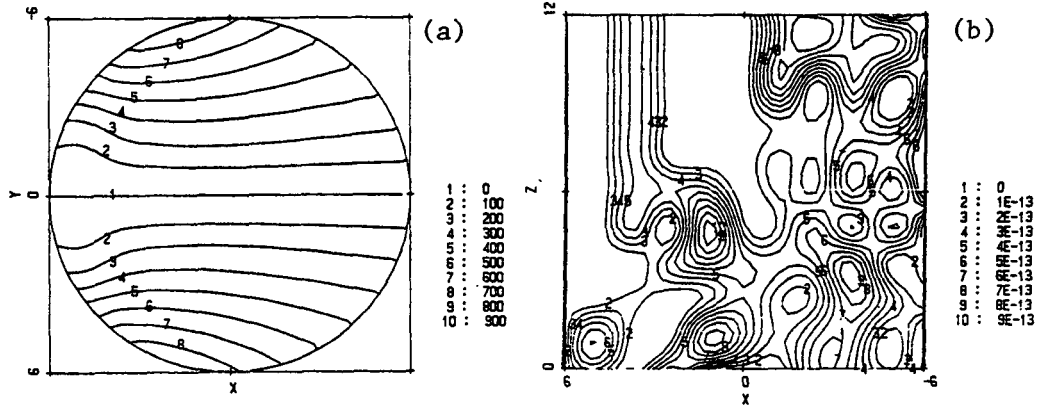


Fig. 5 Distribution of manipulability in the work space for Case 1,2

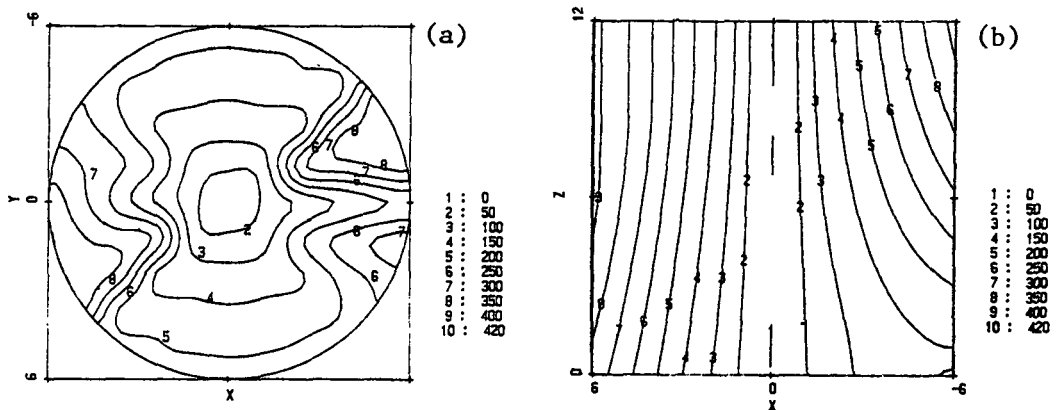


Fig. 6 Distribution of manipulability in the work space for Case 3,4

점들은 특이점이 됨을 알 수 있다.

Fig. 6(a)는 경우 3에 대한 등고선 그래프로 X좌표와 Y좌표가 0인치인 지점에서 특이점이 존재하게 된다. 이것은 식 (28)의 특이상태 3)에 해당된다.

Fig. 6(b)는 경우 4에 대한 등고선 그래프로, 경우 3의 Y축 좌표가 0인치인 지점에서 X-Z좌표평면상의 조작성지수 분포도이다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)를 종합해 보면 로봇의 손끝이 수직인 자세를 취하

며, 기준 좌표계 원점의 Z축상에 놓이게 됨을 의미한다. Fig. 7(a)는 경우 5에 대한 등고선 그래프로 전반적으로 큰 조작성지수값이 포지셔너테이블의 전영역에 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7(b)는 경우 6에 대한 것으로 특이성 영역은 존재하지 않지만 X좌표 -5인치와 Z좌표 3.5인치 부근에서 다소 낮은 조작성지수 분포를 보이고 있다. Fig. 8(a)는 경우 7의 등고선 그래프이며 경우 5와 비슷한 분포 양상을 갖는다. 그러나 Y좌표가 0인치인 지점의 X-Z작업단면에 대한 등고선 그래프, Fig. 8(b)를 살펴보면 경우 6과 비교해 볼 때 낮은 조작성지수의 등고선이 위로 이동되어 있는 것을 알 수 있다. 이것은 틸팅 관절이 -15° 움직

임에 따라 발생하는 것이며 큰 조작성지수값을 갖기 위한 틸팅 관절과 로봇 손끝의 자세의 변화에 따른 조작성지수값을 알아보기 위하여 Fig. 9와 같이 $\beta-\theta_2$ 평면으로 조작성지수값을 나타내었다. 이때 위치는 임의의 한점으로 선택하였다. Fig. 9로부터 틸팅 관절 각도는 -90° 에서 양의 방향으로 움직일수록 그리고 로봇 손끝 자세는 수직인 자세에서 수평한 자세로 움직일수록 조작성지수가 증가됨을 알 수 있다.

5.2 연속 경로 작업시 조작성지수의 최대화

4장에서 논의되었던 성능지수를 최대화하는 알고리즘을 R-P시스템에 적용하고 3차원 그래픽 시뮬

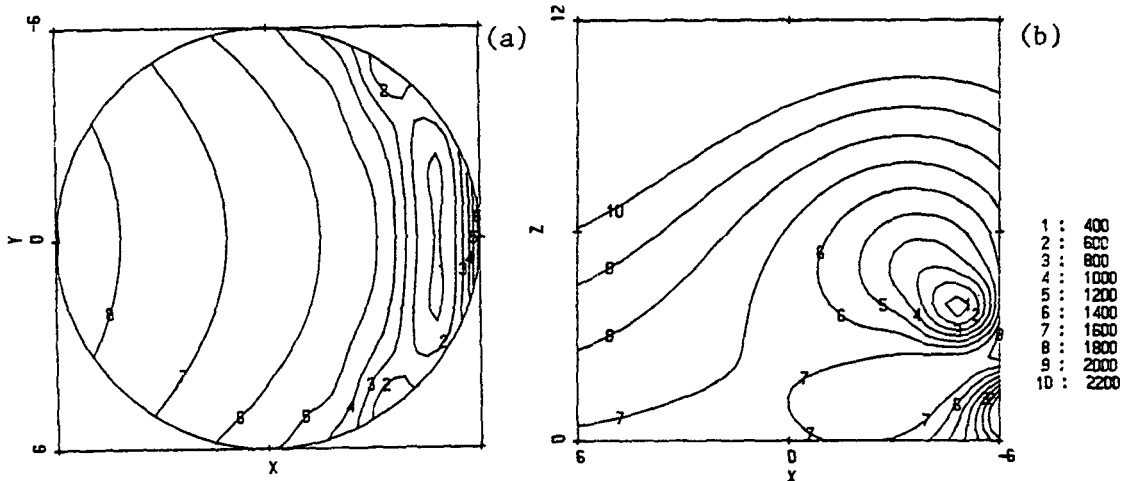


Fig. 7 Distribution of manipulability in the work space for Case 5,6

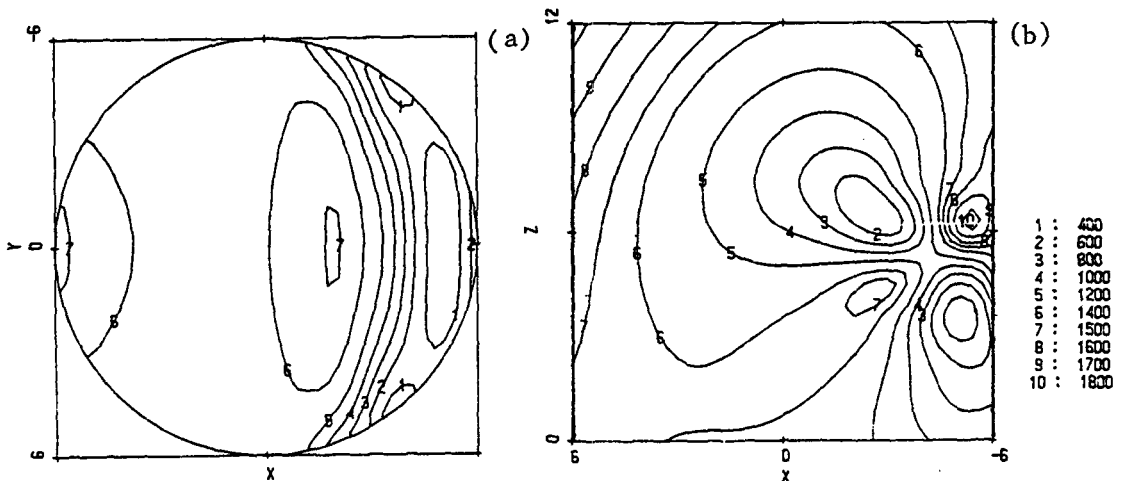


Fig. 8 Distribution of manipulability in the work space for Case 7,8

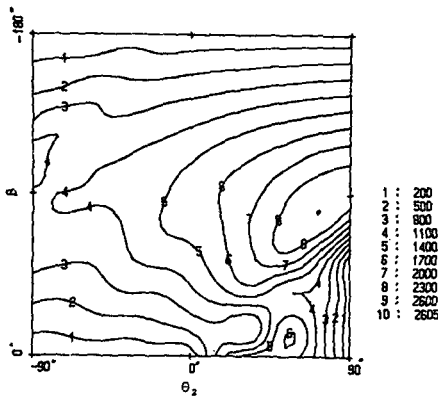


Fig. 9 Manipulability due to the change of tilting joint and end-effector motion

레이션을 통하여 그 타당성을 검토하고자 한다. R-P시스템의 외양 및 관절 매개변수는 2장에서 보였으며 자코비안 행렬을 3.2장에 제시되었다. 작업은 로봇의 손끝이 직선 경로를 추적하도록 하였다.

예제 1) 연속 경로 추적시 특이성의 회피

앞 장에서 논의되었던 R-P시스템의 특이점을 회피하는 시뮬레이션으로 R-P시스템의 작업은 초기 위치 및 자세 $X_i = [4\text{인치}, 4\text{인치}, 2\text{인치}, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]^T$ 에서 최종 위치 및 자세 $X_f = [4\text{인치}, -4\text{인치}, 2\text{인치}, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]^T$ 까지의 직선 경로를 추적하도록 하였다. 초기 틸팅 각도는 0° 이다.

Fig. 10은 직선 경로 추적시 조작성지수의 궤적을 나타내고 있다. 여기서 실선은 조작성지수를 최대화하는 알고리즘에 의한 것이며 점선은 식 (31)의 $dP=0$ 으로 제어했을 경우이다. 따라서 조작성지수를 최대화하는 알고리즘을 사용한 경우는 특이성이 발생할 경우도 원하는 위치와 자세를 취하는 주작업 이외에 특이성을 회피하는 부작업을 수행하여 전

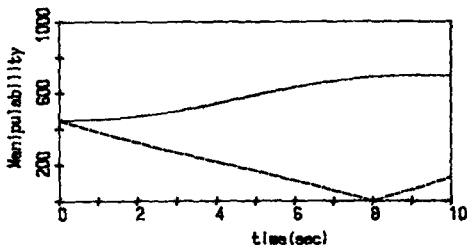


Fig. 10 Comparison of manipulability for straight line task

(..... : Control algorithm $dP=0$ in eq. (31)
 : Control algorithm eq. (31)~(35))

체적인 작업을 원활히 수행할 수 있음을 보여준다.

Fig. 11은 시뮬레이션 결과를 그래픽 시뮬레이터로 나타낸 것이다. $dP=0$ 으로 제어한 경우는 경로 추적시 시스템의 3번째 관절이 0° 일 때를 통과하게 되어 특이상태에 놓이게 되지만 조작성지수를 최대화하도록 제어한 경우는 시스템의 3번째 관절이 거의 움직이지 않으며 나머지 관절의 운동으로 작업을 수행하고 있어 특이상태를 회피하고 있음을 알 수 있다.

예제 2) 포지셔너의 틸팅 관절의 운동에 의한 조작성지수의 최대화

R-P시스템의 초기 위치 및 자세 $X_i = [4\text{인치}, 4\text{인치}, 2\text{인치}, 0^\circ, -45^\circ, 0^\circ]^T$ 에서 최종 위치 및 자세 $X_f = [4\text{인치}, -4\text{인치}, 2\text{인치}, 0^\circ, -45^\circ, 0^\circ]^T$ 까지의 직선 경로를 추적하도록 하였다. 초기 틸팅 각도는 -15° 로 하였다.

Fig. 12는 시뮬레이션 결과 얻어진 조작성지수의 궤적이다. 작업수행시 조작성지수가 증가됨을 알 수 있으며 Fig. 13의 그래픽 시뮬레이션 결과 포지셔너의 틸팅 관절각은 양의 방향으로 움직이고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

로봇의 성능향상을 위한 방법으로 기존의 5관절형 로봇과 2관절의 포지셔너를 결합한 로봇-포지셔너 시스템에 대한 기구학적인 분석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 로봇-포지셔너 시스템에 대한 역기구학적 해를 해석적으로 구하였다.

(2) 성능평가지수의 등고선그래프를 이용하여 로봇-포지셔너 시스템의 작업성능을 높일 수 있는 로봇 손끝과 포지셔너 틸팅 관절의 자세를 구할 수 있었다.

(3) 또한 로봇-포지셔너 시스템의 여유자유도 제어를 통하여, 특이상태를 통과하는 운동에 대하여도 작업을 원활히 수행할 수 있음을 수치예를 통하여 보였다.

앞으로 등고선 그래프와 같은 시각화 방법이 로봇시스템의 CAD화에 이용될 수 있으리라 생각되며, 3차원 작업공간에 대한 작업성능 분석을 위하여 조작성지수의 3차원 등고선 그래프가 요망된다. 또한 작업성능을 고려한 포지셔너의 설계가 기대된다.

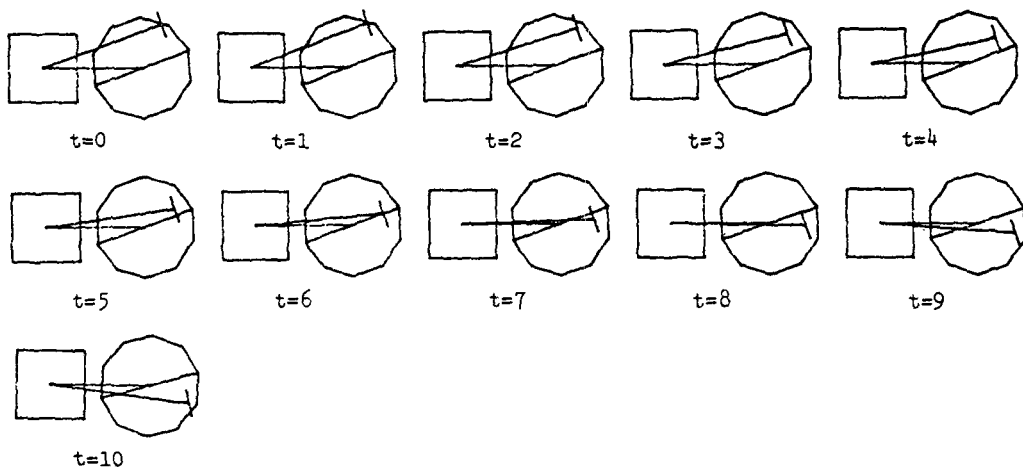


Fig. 11 3-D graphic simulation for straight line task (a) Control algorithm : $dP=0$ in eq. (31)

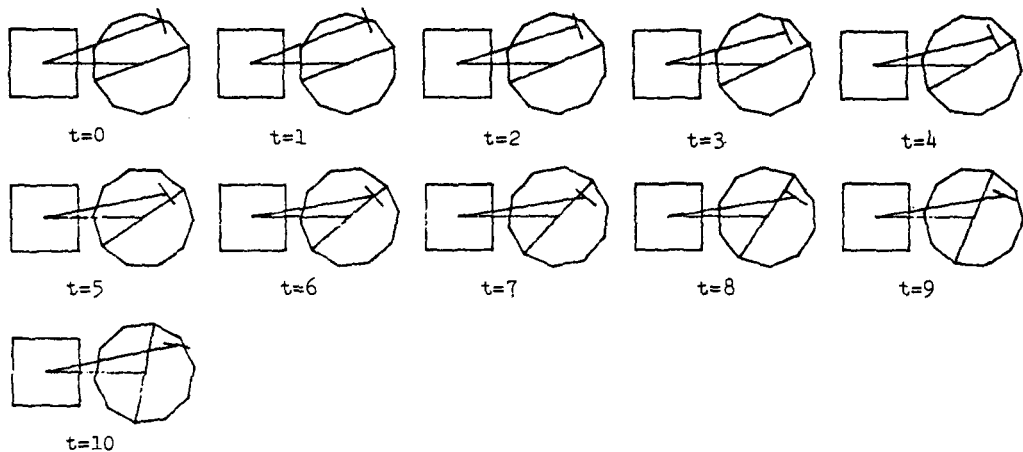


Fig. 11 (b) Control algorithm : eq. (31) ~ (35)

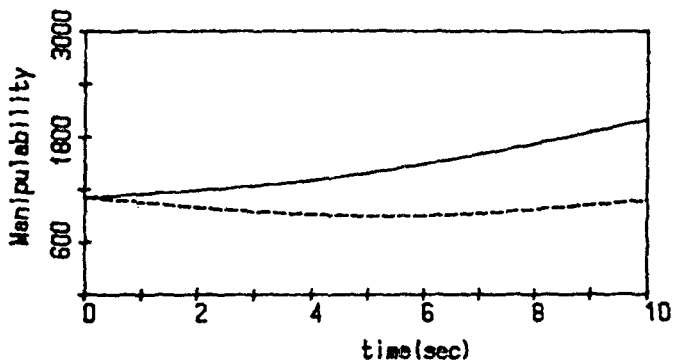


Fig. 12 Comparison of manipulability for straight line task with tilting motion
 (..... : Control algorithm $dP=0$ in eq. (31)
 — : Control algorithm eq. (31) ~ (35))

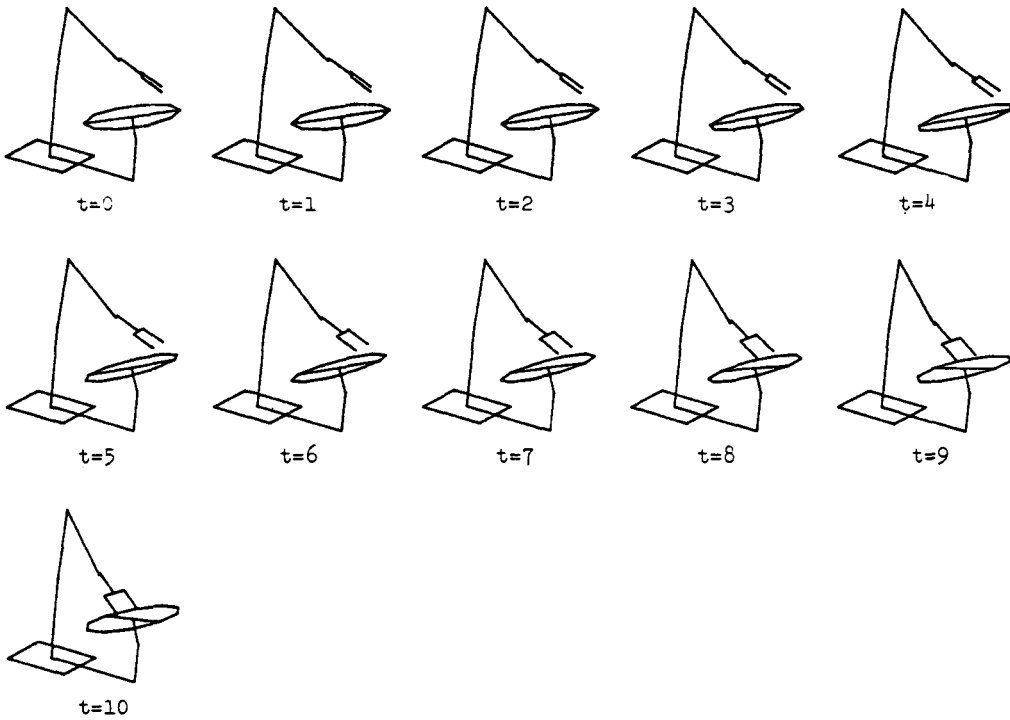


Fig. 13 3-D graphic simulation for straight line task with tilting motion
 (a) Control algorithm : $dP=0$ in eq. (31)

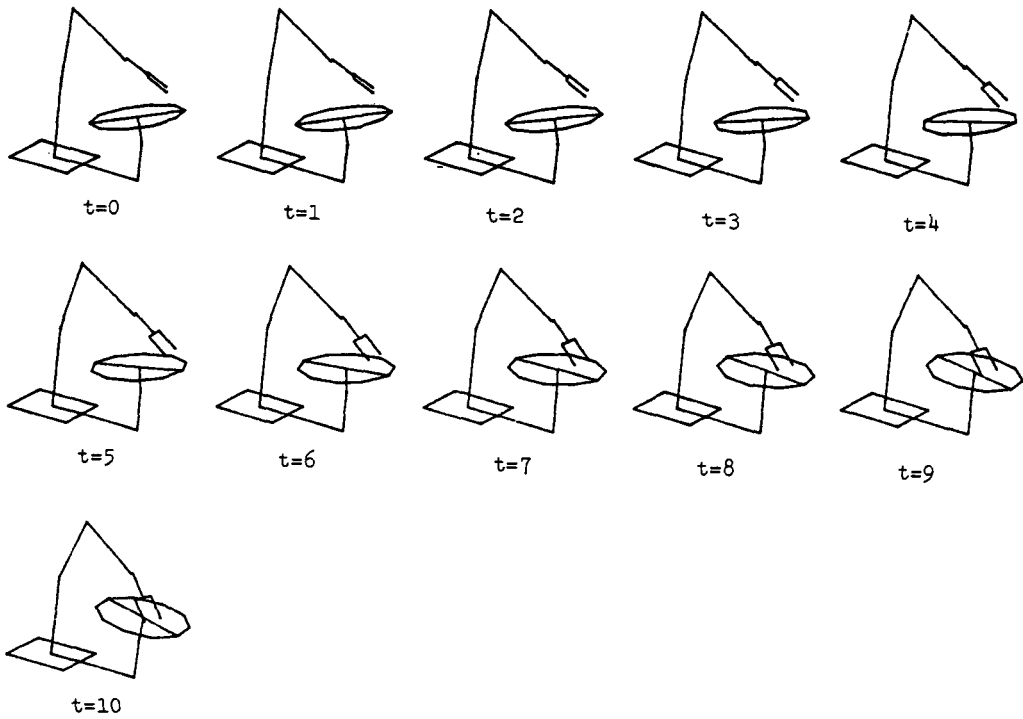


Fig. 13 (b) Control algorithm : eq. (31) ~ (35)

참 고 문 헌

- (1) P.K. Khosla, C.P. Neuman, and F.B. Prinz, 1986, "An Algorithm for Seam Tracking Application", *The International Journal of Robotics*, Vol. 3, pp. 27~41.
- (2) 전의식, 서일홍, 오재응, 염성하, 1986, "하나의 기구학적 모델을 이용한 로봇 시스템의 경로제어", 대한정밀공학회 추계학술대회 초록집, pp. 47~51.
- (3) Yoshikawa, T., 1984, "Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy", *Robotics Research: The First Int. Symposium*, ed. Brady, M., R.P. Paul, pp. 735~748.
- (4) Uchiyama, M., Shimizu, K., and Hakomori K., 1984, "Performance Evaluation of Manipulators using the Jacobian and its Applications to Trajectory Planning", *2nd Robotics Research*, ed. Hanafusa. H. and Inoue. H., MIT Press, pp. 447~454.
- (5) R.P. Paul, 1981, *Robot Manipulator: Mathematics, Programming and Control*, MIT Press.
- (6) Nakamura, and Hanafusa. H., 1984, "Task Priority Based Redundancy Control of Robot Manipulators", *2nd Robotics Research*, pp. 155~162.
- (7) J.Y.S. Luh and Y.L. Gu, 1985, "International Robots with Seven Joints", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1010~1015.
- (8) L.T. Wang and B. Ravani, 1985, "Recursive Computations of Kinematic and Dynamic Equations for Mechanical Manipulators", Vol. RA-1, No. 3.
- (9) A. Liegeois, 1977, "Automatic Supervisory Control of the Configuration and Behavior of Multibody Mechanisms", *IEEE Trans. SMC-7*, No. 12, pp. 868~871.
- (10) W. Homsup and J.N. Anderson, 1986, "Performance Evaluation of Robot Manipulators", *IEEE, Proceeding of the American Control Conference*, Vol. 1, pp. 130~136.