

(論文)

# 근접 위치를 이용한 일반적인 로봇 매니플레이터의 효율적인 반복적 역기구학 해석 문제

강성철\* · 조소형\* · 김문삼\* · 조선휘\*\*

(1991년 5월 24일 접수)

## An Efficient Iterative Inverse Kinematic Analysis for General Robot Manipulators Using Near Position

Seong Cheol Kang, So Hyung Cho, Mun Sang Kim and Sun Whi Cho

**Key Words :** Inverse Kinematics(역 기구학), Zero Referene Position(영 기준 위치), Deviation Function(편차 함수), Near Position(근접 위치), Balancing Factor(균형치), Transformation Matrix(좌표계변환 행렬), Orientation Matrix(방향 행렬), Position Vector(위치 벡터), Joint Variable(조인트 변수), Redundant Robot Manipulator(잉여 자유도 로봇), Newton-Raphson Method(Newton-Raphson 방법), Jacobian Matrix(자코비안 행렬)

### Abstract

This paper is aimed to develop an iterative algorithm for solving inverse kinematics of general robot manipulators. The deviation function minimizing method is used in the inverse kinematic algorithm, a near position method is devised in determining initial position, and the zero reference position method is introduced in describing robot configuration. Applying this algorithm to PROPS(Polishing Robot Off-line Programming System) in KIST, we solved the invese kinematic problem of various kinematic types of robots. We compared the near position algorithm with Kazerounian's deviation function algorithm quantitatively. This is also applicable to the inverse kinematic problem of the general redundant robot manipulators.

### 1. 서 론

1.1 역 기구학(Inverse Kinematics)의 정의  
로봇 매니플레이터가 작업을 하는 과정에서 기준 좌표계에 대한 endeffector의 위치와 방향이 주어진 경우, 그에 해당하는 각 조인트 변위값을 구해야 하는데 이것이 곧 역 기구학의 문제이다. 따라서 각 조인트 변수의 값이 주어졌을 때 endef-

factor의 위치와 방향을 구하는 정 기구학(forward kinematics) 문제와는 정반대의 문제이다.

기존의 산업용 로봇의 컨트롤러 내에서는 이러한 역 기구학 문제를 해결하기 위해서 로봇의 기구학에 의존한 전용 역 기구학 루틴을 사용하고 있다. 이는 일반적인 역 기구학 특히 반복적 해석에 의한 해결방법이 그 알고리즘 상, 계산 속도 등에 문제를 안고 있기 때문이기도 하다. 컴퓨터 하드웨어가 빠른 속도로 발전하고 있고 로봇의 기구학이 다양해짐에 따라 이를 위한 일반적인 역 기구학이 요구되고 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기

\* 정희원, 한국과학기술연구원 로봇응용 및 유공압 연구실

\*\* 정희원, 서울대학교 기계설계학과

위해 반복 해석적인 접근방법을 위한 근접 위치 설정 루틴을 장착하여 수렴성을 개선시킴으로써 보다 빠른 계산 속도를 보장하는 루틴을 개발하였다. 이의 실질적인 응용으로 로봇 작업 프로그램의 off-line programming system에 적용하였다.

### 1.2 역 기구학의 접근 방법(연구 동향)

일반적으로 산업용 로봇으로 많이 쓰이는 6관절 로봇을 모델로하여 역기구학 방정식을 세워보면, 6개의 조인트(회전 혹은 병진) 변수를 미지수로 하는 복잡한 비선형 연립방정식으로 귀착된다. 이 비선형 연립방정식을 풀기 위하여 지금까지 여러가지 방법이 연구되었는데, 첫째로 이론적 해석법(analytical method)과 둘째로 반복적 해석법(numerical method)으로 나뉘어진다.

첫째로 Pieper<sup>(1)</sup>, Paul<sup>(2)</sup> 등에 의해 제안된 이론적 해석법은 비선형 연립방정식을 복잡한 산술적인 조작에 의하여 각 조인트 변수값을 구하는 방법이다. 그런데 이 방법은 매니퓰레이터의 3개의 회전 조인트 축이 로봇의 손목에서 교차해야 하는 전체 조건이 필요하므로 일반화된 알고리즘을 개발하기가 불가능한 단점을 가지고 있다.

둘째로 반복적 해석법<sup>(3-7)</sup>은 주어진 역 기구학 방정식 또는 위치와 방향의 편차함수를 설정하고 반복계산을 통하여 각 조인트의 변위를 계산하는 방법이다. 이 방법은 이론적 해석법이 요구하는 전체조건이 필요없으며, 6관절 로봇의 경우 조인트 형태에 구애받지 않고 최소한 하나의 해를 항상 구할 수 있으므로 조인트 형태에 상관없는 일반적인 알고리즘을 개발할 수 있다. 따라서 본 연구는 일반적인 조인트 형태를 가지는 6관절 로봇 매니퓰레이터의 역 기구학 해를 구하기 위한 효율적인 알고리즘 개발을 목적함에 있어 반복적 해석법을 채택하고 있다.

역 기구학 문제를 해결하기 위하여 Newton-Raphson 방법을 이용한 반복적 해석기법<sup>(3)</sup>이 많이 연구되었다. 그런데 이 방법의 기본 원리는 조인트 좌표계와 Cartesian 좌표계간의 미소변화(differential transformation) 관계를 정의하는 자코비안 행렬<sup>(8,9)</sup>을 구함으로써, Cartesian 좌표계의 변화량으로부터 조인트 좌표계 상의 새로운 값을 구하는 것이다. 위의 이러한 자코비안 행렬은 로봇의 기구학적 자세에 따라 자코비안의 행렬식의 값이 영이되는 특이(singularity) 문제가 발생할 수 있다. 이를

해결하기 위하여 알고리즘 상에서 특이 상태를 검사하고 이를 보정하는 작업이 필요하다. 이러한 문제들로 인하여, Newton-Raphson 방법은 로봇의 자세에 많은 예외적인 요소를 내포함으로써 해를 구하는 과정을 복잡하게 한다.

또 다른 반복적 해석법으로 편차 함수 최소화 방법(deviation function minimizing method)<sup>(6)</sup>이 있다. 이 방법은 로봇 end-effector의 현재 위치, 방향과 목표 위치, 방향 간의 차이를 편차 함수로 설정하여 그 차이를 최소화하기 위한 조인트 변수 값을 구하는 방법이다. 이 방법을 영 기준 위치법을 이용하여 적용하면, 한 개의 미지수(조인트 변수)에 대한 비선형 방정식으로 귀착되므로 자코비안 행렬이 필요하지 않게 된다. 따라서 역 기구학 알고리즘의 일반화가 용이하게 되고, 자코비안으로 인한 특이 문제가 발생하지 않으므로 로봇의 기구학적 자세에 따른 수렴의 불안정성을 피할 수 있다. 따라서 근래에 와서는 이 방법이 많이 연구되고 있으며 본 논문에서도 이 방법을 채택하고 있다.

그리고 본 논문에서는 이러한 편차 함수 최소화 방법을 적용함에 있어 보다 안정된 수렴성과 계산 시간을 단축시키기 위하여 근접 위치 방법(near position method)을 개발하여 적용하였다. 근접 위치 방법이란 이론적 해석법으로 풀기가 불가능한 기구학을 갖는 6관절 로봇을 반복적 해석법을 사용한다는 것을 전제로 하여, 초기 위치를 목표 위치에 가능한 근접하게 잡아서 반복 계산을 수행하는 방법으로써 로봇의 기구학적 자세에 따른 수렴의 불안정성을 방지하고, 계산 시간을 단축하는데 그 목적이 있다.

## 2. 본론

### 2.1 영 기준 위치 방법

편차함수 최소화 방법을 이용함에 있어서 편리함을 위하여, 로봇의 형상을 기술하는 방법으로 영 기준위치 방법<sup>(10)</sup>을 도입하였다(Fig. 1).

Fig. 1은 N 자유도의 링크 기구를 영 기준 위치 방법을 이용하여 표시한 것으로 기준 base 좌표계로부터 공구 끝단(tool center point)까지를 정의한다. 영 기준 위치 방법을 이용하여 로봇 매니퓰레이터를 비롯한 링크 기구를 기술할 때, 기구학적 변수(kinematic parameter)를 정의하면 다음과 같

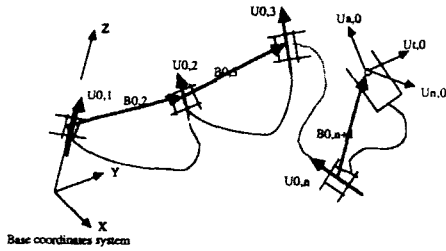


Fig. 1 Zero reference position method

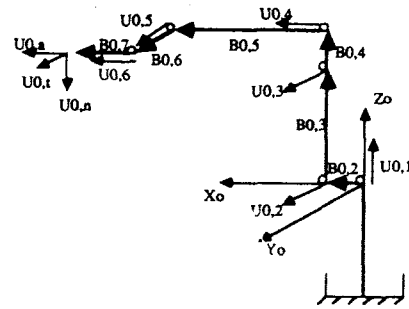


Fig. 2 Initial configuration by zero reference position method

다.

○ joint vector ( $u_k$ )

:  $k$ 번째 joint의 축 방향 단위 벡터

○ body vector ( $b_{k-1}$ )

:  $k$ 번째 joint를 시점,  $k-1$ 번째 joint를 중점으로 하는 벡터

○ axial vector ( $u_a$ )

: end effector가 가리키는 방향의 단위 벡터

○ transverse vector ( $u_o$ )

: axial vector와 직각 방향의 단위 벡터

(단, zero position일 경우에는  $u_{0,k}$ ,  $b_{0,k-1}$ ,  $u_{0,a}$ ,  $u_{0,t}$ )

다음에  $k$ 번째 조인트에서의 회전 행렬(rotation matrix)  $[R]$ 을 정의하면,

$$[R_0] = [I]_{3 \times 3}$$

$$[R_k] = [R_{k-1}] [\text{Rot}(q_k, u_{0,k})] \quad (\text{회전 조인트})$$

$$[R_k] = [R_{k-1}] \quad (\text{병진 조인트})$$

여기서,

$$[\text{Rot}(q_k, u_{0,k})] =$$

$$\begin{bmatrix} (u_x^2 - 1) Vq_k + 1 & u_x u_y Vq_k - u_x S q_k & u_x u_z Vq_k + u_y S q_k \\ u_x u_y Vq_k + u_x S q_k & (u_y^2 - 1) Vq_k + 1 & u_y u_z Vq_k - u_x S q_k \\ -u_x u_z Vq_k - u_y S q_k & u_y u_z Vq_k + u_x S q_k & (u_z^2 - 1) Vq_k + 1 \end{bmatrix}$$

$$Vq_k = 1 - \cos(q_k), S q_k = \sin(q_k)$$

$$u_{0,k} = (u_x, u_y, u_z)$$

이 된다.

따라서 최초에 임의의 로봇 형상을 영 위치로 설정하였을 때, joint vector가  $u_{0,k}$ , body vector가  $b_{0,k}$ 이면,  $k$ 번째 joint에서  $q_k$ 만큼 회전 또는 이동하여 생기는 새로운 joint vector, body vector, axial vector, transverse vector는 다음과 같다.

$$u_k = [R_k] u_{0,k}$$

$$b_{k+1} = [R_k] b_{0,k-1}, \quad k=1, \dots, N$$

$$u_a = [R_N] u_{0,a}$$

$$u_t = [R_N] u_{0,t}$$

Table 1 Kinematic parameters by zero position method

Joint	Type	$u_{0,k}$	$b_{0,k-1}$
1	R	(0, 0, 1)	( $L_1$ , 0, 0)
2	R	(0, 1, 0)	(0, 0, $L_2$ )
3	R	(0, 1, 0)	(0, 0, $L_3$ )
4	R	(1, 0, 0)	( $L_4$ , 0, 0)
5	R	(0, 1, 0)	(0, $L_5$ , 0)
6	R	(1, 0, 0)	( $L_6$ , 0, 0)
		$u_{0,a} = (1, 0, 0)$	$u_{0,t} = (0, 1, 0)$

$$L_1=220 \quad L_2=660 \quad L_3=160 \quad L_4=600$$

$$L_5=105 \quad L_6=115 \quad (\text{단위 : mm})$$

영 기준 위치 방법은 좌표계가 로봇 base에 고정된 것 하나면 충분하므로 로봇의 초기 위치를 설정하는 데 유연성이 있고 매우 간편하다. 영 기준 위치 방법의 예로 HYUNDAI 7603 로봇의 초기 위치를 Fig. 2와 Table 1에 나타내었다.

## 2.2 역 기구학 식의 형성

### (1) 근접 위치의 설정

역 기구학 알고리즘을 수행하기 전에 목표 위치(goal position)에 가까운 초기 위치를 설정하는 일이 필요하다. 이는 수렴의 안정성을 기할 뿐 아니라 계산 시간을 단축하는데도 필요하다.

역 기구학을 풀기 위한 로봇이 설정되면, 일반적인 6-관절 로봇인 경우 조인트 부분에 shift가 있으면, 이를 가상적으로 제거하여 shift가 없는 기구학을 갖는 새로운 로봇으로 모델링한다. 그런데

이 가상 로봇의 작업공간(work space)이 원래 로봇의 작업 공간을 전부 포함하지 않는 경우 조인트 변수 값을 구할 수 없게 되는 문제가 발생하므로 이를 방지하기 위하여 로봇의 위치를 결정하는 1, 2, 3번째 링크 길이를 조절하여 주는 알고리즘이 필요하다.

위의 과정이 수행되면, Fig. 3과 같이 위치 편차 벡터( $\Delta P_H$ )를 이용하여 근접 위치의 조인트 변수 값  $q_i^*$ ,  $i=1, \dots, 6$ 을 구한다. 이  $q_i^*$  값들은 역기구학 계산을 위한 초기값의 역할만을 하는 것이지 궁극적으로 구하고자 하는 근( $q_i$ )은 아니다. (Fig. 3)

목표 방향과 위치 ( $[R_H]^G, \{P_H\}^G$ )와 영 위치에서의 방향과 위치 ( $[R_H]^0, \{P_H\}^0$ )가 주어졌을 때, 로봇의 손목까지의 위치 벡터를  $\{P_R\}$ 이라 할 때,

$$\begin{aligned} \Delta\{P_H\} &= \{P_H\}^G - \{P_H\}^0 \\ \{P_R\} &= \{P_R\}^0 + \Delta\{P_H\} \end{aligned} \quad (1)$$

가 된다.

$\{P_R\}$ 로부터 손목 부분을 제외한 3관절 로봇의 역기구학 해를 이용하여  $q_1^*, q_2^*, q_3^*$ 를 구한다. 여기서 이 3관절 로봇이 3R 타입인 경우 Pieper's solution<sup>(1)</sup>을 이용하여 구하고, 3R 타입이 아닌 경우는 shift가 없는 일반적인 3관절 로봇의 이론적 해석법에 의한 역기구학 해를 직접 구해야 한다. 만일 이론적 해석법으로 해를 구하기가 어려운 3관절 로봇인 경우에는 뒤에 기술할 반복적 역기구학 알고리즘을 일반적인 3관절 로봇에 적용하여 해를 구할 수 있다. 3관절인 경우의 반복적 계산 방법은 방향을 고려하지 않고, 위치에 대한 역기구학 문제를 풀면 되므로 6관절 로봇의 경우 보다는 계산 속도가 훨씬 빠르다.

$q_1^*, q_2^*, q_3^*$ 가 구해지면  $[R_H]^G$ 로부터 Euler angle solution<sup>(1)</sup>을 이용하여  $q_4^*, q_5^*, q_6^*$ 를 구한다. 두 가지 손목 좌표계에 대한 Euler angle solution은 다음과 같다.

$$[R]_3^G = ([R]_3^0)^{-1} [R_H]^G \quad (2)$$

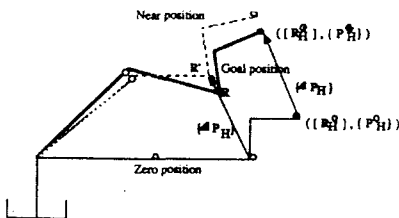


Fig. 3 Generation of near position

$$[R]_3^G = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Z-Y-X Euler angle인 경우,

$$\begin{aligned} q_4^* &= \text{Atan2}(r_{21}, r_{11}) \\ q_5^* &= \text{Atan2}(-r_{31}, (r_{11}^2 + r_{21}^2)^{1/2}) \\ q_6^* &= \text{Atan2}(r_{32}, r_{33}) \end{aligned} \quad (4)$$

Z-Y-Z Euler angle인 경우,

$$\begin{aligned} q_4^* &= \text{Atan2}(r_{23}, r_{13}) \\ q_5^* &= \text{Atan2}((r_{11}^2 + r_{21}^2)^{1/2}, r_{33}) \\ q_6^* &= \text{Atan2}(r_{32}, -r_{31}) \end{aligned} \quad (5)$$

위와 같이 shift가 없는 6-관절 로봇에 대한 역기구학 해  $q_i^*, i=1, \dots, 6$ 의 set(일반적으로 4개의 set) 중에서 조인트 운동범위(joint range)와 링크의 모드(upper arm 혹은 lower arm)에 대한 정보를 고려하여 적절한  $q_i^*$ 를 초기값으로 정하여 역기구학 계산을 시작한다. 근접 위치를 구하기 위한 알고리즘은 Fig. 4와 같다.

(2) 편차함수 최소화 방법<sup>(6)</sup>

편차함수 최소화 방법을 이용하여 역기구학 문제를 푸는 과정은 다음과 같다. 입력값은,

○ 목표 방향 행렬(goal orientation matrix)

$[R_H]^G$ : 3x3; 절대 좌표계에 대한 end effector의 방

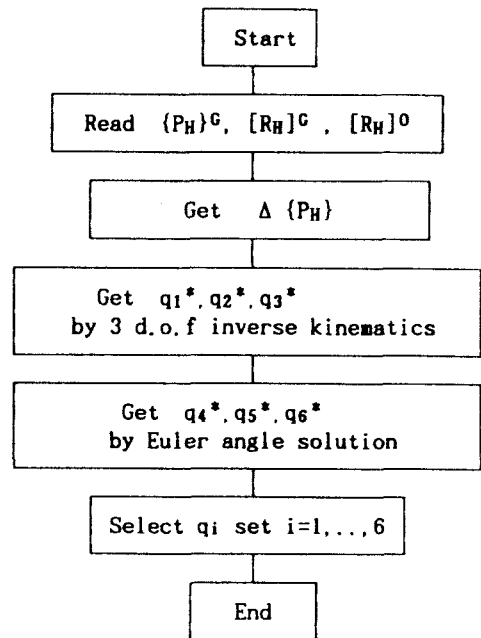


Fig. 4 Flow chart of generation of near position

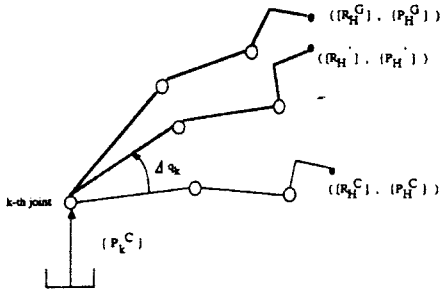


Fig. 5 Inverse kinematic iteration

향을 나타내는 행렬

○ 목표 위치 벡터 (goal position vector)

$\{R_H^G\}$ : 절대 좌표계에 대한 end effector의 위치 벡터  $\bullet$

이 된다.

Fig. 5는 수렴 중인 한 위치에서의 역 기구학 반복 계산 과정을 보여 주고 있다.

$q_k$ : k번째 joint 변수 값

$\{P_H^G\}$ : 현재 위치에서 end effector의 위치 벡터 (current position vector)

$\{R_H^G\}$ : 현재 위치에서 end effector의 방향 행렬 (current orientation matrix)

$\{P_k^C\}$ : 현재 고려 중인 k번째 joint의 절대 좌표계에 대한 위치 벡터 (joint position vector)

일 때,

k번째 joint에서  $\Delta q_k$ 만큼 회전 혹은 이동하였을 때 새로 생긴 방향 행렬과 위치 벡터를 각각  $\{R_H^I\}, \{P_H^I\}$ 라 하면,

회전 조인트의 경우,

$$\{R_H^I\} = [\text{Rot}(\Delta q_k, u_k)] \{R_H^G\} \quad (6)$$

$$\{P_H^I\} = \{P_k^C\} + [\text{Rot}(\Delta q_k, u_k)] (\{P_H^G\} - \{P_k^C\}) \quad (7)$$

병진 조인트의 경우,

$$\{R_H^I\} = \{R_H^G\} \quad (8)$$

$$\{P_H^I\} = \{P_k^C\} + \Delta q_k \cdot u_k \quad (9)$$

이 된다.

방향 편차 (orientational deviation)  $\delta_R$ 은

$$\delta_R = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \left\{ ([R_H^G][R_H^C]^{-1})_{i,j} - ([R_H^I][R_H^C]^{-1})_{i,j} \right\}^2 \quad (10)$$

위치 편차 (positional deviation)  $\delta_P$ 는

$$\delta_P = \sum_{j=1}^3 (\{P_H^G\}_j - \{P_H^I\})^2 \quad (11)$$

$\delta_R$ 과  $\delta_P$ 를 균형있게 고려하기 위하여 균형치 (balancing factor)  $C$ 를 두는데,

$$C = \delta_P / (\delta_P + \delta_R) \quad (12)$$

로 정의한다.

따라서 편차 함수 (deviation function)  $\delta$ 는

$$\delta = (1-C) \cdot \delta_R + C \cdot \delta_P = (1-C) \sum_{i,j=1}^3 \left\{ ([R_H^G][R_H^C]^{-1})_{i,j} - ([R_H^I][R_H^C]^{-1})_{i,j} \right\}^2 + C \sum_{j=1}^3 (\{P_H^G\}_j - \{P_H^I\})^2 \quad (13)$$

가 된다.

편차 함수  $\delta$ 를 최소화하기 위한 필요충분 조건은

$$\frac{\partial \delta}{\partial (\Delta q_k)} = 0$$

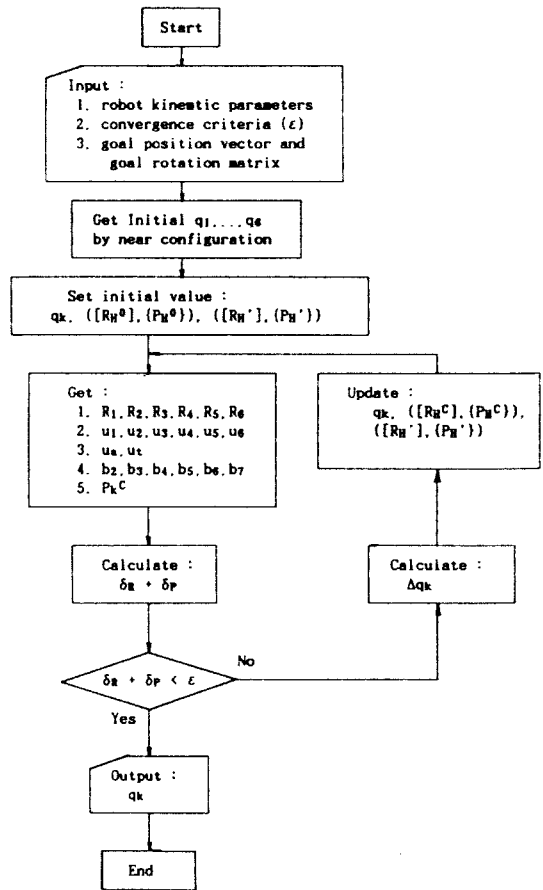


Fig. 6 Flow chart of deviation function minimizing method

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial (\Delta q_k)^2} > 0 \quad (14)$$

이 된다.

식(14)을 이용하여 회전과 병진 조인트에 대하여  $\Delta q_k$ 를 구한다<sup>(6)</sup>.

### 2.3 알고리즘

전술한 편차 함수 최소화 방법의 알고리즘은 Fig. 6과 같다.

## 3. 결 과

### 3.1 근접 위치 방법과 Kazerounian

#### 방법의 비교

초기 위치를 근접 위치로 구하고 편차함수 최소화 방법을 이용하여 역기구학 반복 계산을 수행한

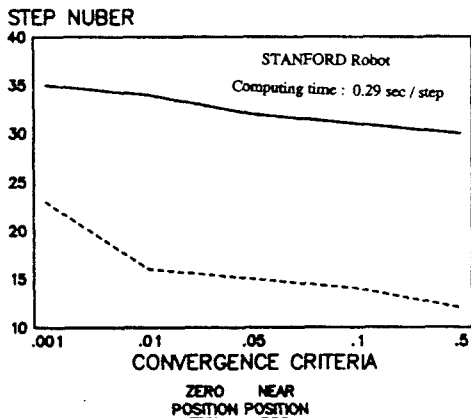
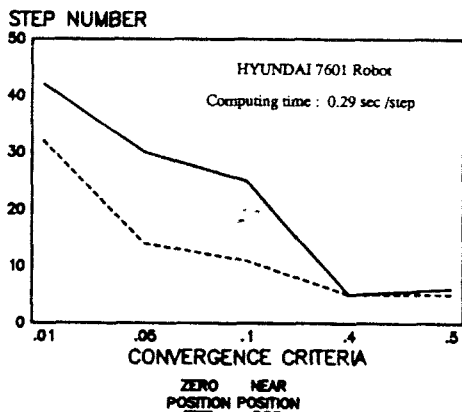


Fig. 7 Comparison of near position method and Kazerounian's method

결과와, 초기 위치를 영위치로 고정시켜 편차 함수 최소화의 방법을 이용하여 계산한 kazerounian의 결과를 수렴 속도의 관점에서 비교하였다.

모델은 현대 7601 로봇(6R)과 STANFORD 로봇(R-R-P-R-R-R)으로 설정하였고, 80286 AT-Computer로 계산하였다(Fig. 7).

### 3.2 금형 연마 로봇 시스템을 위한 off-line program에 적용

본 논문의 역 기구학 알고리즘은 KIST의 로봇 응용 및 유공압 연구실에서 개발된 PROPS (polishing robot off-line programming system)의 역 기구학 루틴으로 사용되고 있다. PROPS의 알고리즘은 Fig. 8에 나타나 있다.

현재 로봇 프로그램의 열외적(off-line)인 생성 방식에 의한 프로그래밍 기술은 페인팅, 고팅, 납땜 및 조립, 금형 연마와 같은 분야에서 좋은 결과를 얻고 있다. 이러한 분야들은 대부분 작업의 형태가 매우 복잡하여 로봇 시스템을 활용하여 자동화할 경우 기존의 프로그래밍 방법인 교시(teach-in) 방법을 채택하기가 곤란하다. 이는 작업의 형태가 매우 난해하기 때문에 프로그래밍에 많은 시간이 소요될 뿐 아니라 정확한 작업 데이터의 형성

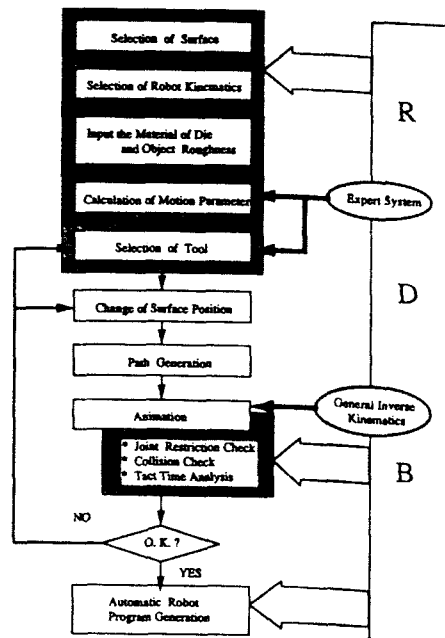


Fig. 8 Flow chart of PROPS

도 곤란하다. 자유곡면을 따라서 정확한 구동 조건을 결정하는 가능한 방법 중의 하나가 기존 설계에 사용된 CAD 데이터를 활용하여 열외적으로 얻어내는 방법이다.

off-line programming은 3차원 자유 곡면형상을 대상으로 하는 로봇의 작업 프로그램을 CAD 시스템으로부터 얻어진 위치 및 방향 데이터를 통해 열외적으로 생성하는 방식으로, 금형설계 데이터를 로봇 기술에 이용하여 금형 생산 자동화 라인에 집적시키는 데 그 목표를 두고 있으며, 그 구성은 금형, 로봇, 공구를 대화식으로 선정하여 실제 가공과 유사성을 갖는 실험을 화면상에서 수행한다. 이를 위해서는 가공물의 가공 위치와 방향으로부터, 로봇의 조인트 변수값을 정확히 구해야 한다. 이 값이 구해지면 로봇 endeffector가 가공 경로를 충돌없이 정확하게 따라가는 것을 화면 상에서 animation할 수 있게 된다. Fig. 9는 본 논문의 역기구학 알고리즘을 이용하여 로봇 endeffector가 반

구 경로를 따라가는 모습을 보여주고 있다.

off-line program상에서 시뮬레이션을 통하여 생성된 공간 좌표와 법선 벡터로부터 로봇 작업 프로그램을 구성하기 위한 data file을 function에 대한 정보를 갖는 file과, 조인트 변위와 속도에 대한 정보를 갖는 file로 나누어 구성한다. 이러한 file들을 로봇이 인식 가능한 file로 변환하여 로봇에 전송한다.

이렇게 전송된 데이터를 이용하여 로봇을 구동시킬 때 위치의 정확성 문제로 인해 실제 로봇은 다른 궤적을 추적하게 되는 문제가 생기게 된다. 이는 설계 모델과 실제 모델과의 오차, 즉 영 위치 오차(링크 길이 오차, 조립 오차 등)와 systematic error backlash, joint compliance 등에 기인하게 된다. KIST에서 개발된 측정 장치인 KIM3<sup>(15,16)</sup>의 calibration routine을 이용하여 기구학적 계수  $\theta_i$ ,  $d_i$ ,  $a_i$ ,  $\alpha_i$ 를 보정함으로써 로봇 시스템이 가지는 기본적인 기구학적 계수 오차로 인한

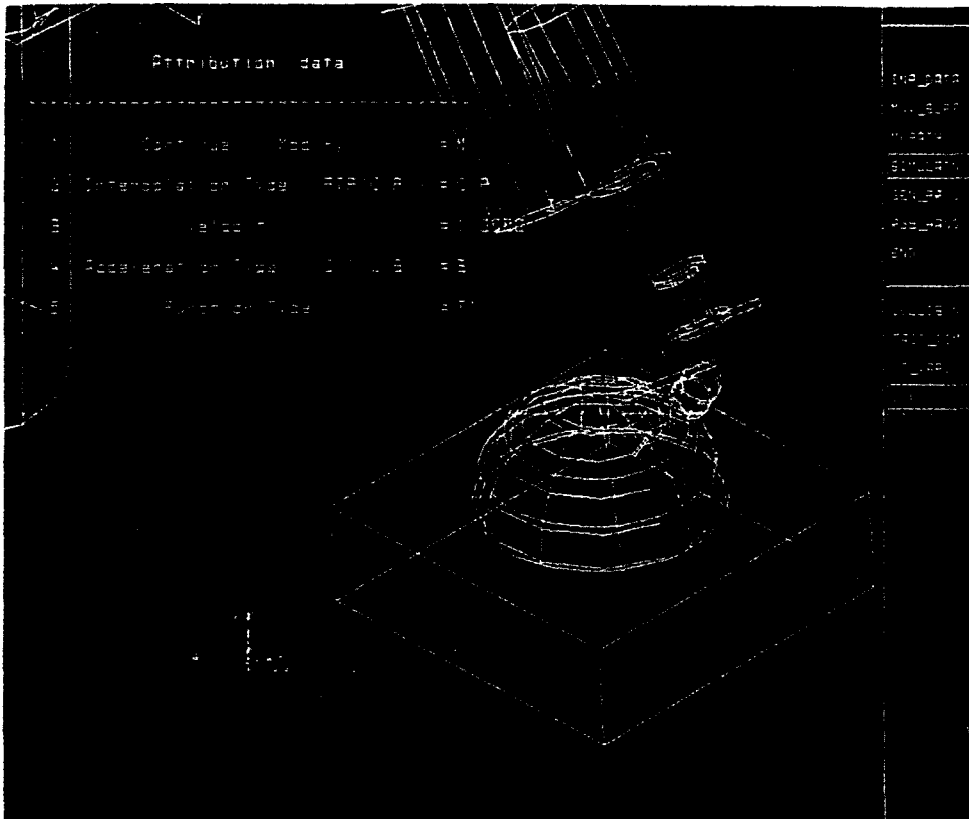


Fig. 9 CAD animation of semi-sphere test

절대위치 오차 문제를 극복할 수 있다.

그런데 금형 연마 작업을 위해서 로봇이 제시하여야 할 정확도(accuracy)는 금형의 dimensional accuracy나 조도 accuracy에 대응하는 것이 아니다. 이는 polishing tool 자체가 3자유도의 유연성을 가지고 있고 가압력 등이 제어되고 있기 때문에 위에 언급한 정확도에 수동적(passive)으로 대응할 수 있다. 다시 말하면 tool에서의 가공 중의 반력에 의한 비선형 오차와 로봇 기구학이 정확하게 calibration되어 있지 않은 데서 오는 오차 등이 polishing의 정확도에 영향을 미치지 않는다.

### 3.3 잉여 자유도 로봇의 역 기구학 문제

본 논문의 알고리즘이 6관절 이상의 로봇에도 적용되어 하나의 해를 구할 수 있음을 보이기 위하여 다음과 같은 잉여 자유도 로봇을 설정하여 역기구

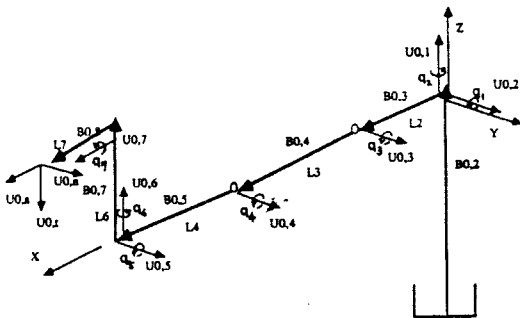


Fig. 10 Initial configuration of redundant robot(7R)

Table 2 Kinematic parameters of redundant robot(7R)

Joint	Type	$u_{0,k}$	$b_{0,k-1}$
1	R	(0, 0, 1)	(0, 0, 0)
2	R	(0, 1, 0)	( $L_2$ , 0, 0)
3	R	(0, 1, 0)	( $L_3$ , 0, 0)
4	R	(0, 1, 0)	( $L_4$ , 0, 0)
5	R	(0, 1, 0)	(0, 0, 0)
6	R	(0, 0, 1)	(0, 0, $L_6$ )
7	R	(0, 1, 0)	(0, $L_7$ , 0)
		$u_{0,a} = (0, 1, 0)$	$u_{0,r} = (0, 0, 1)$

$L_2=200 \quad L_3=300 \quad L_4=100$

$L_6=100 \quad L_7=100$

(단위 : mm)

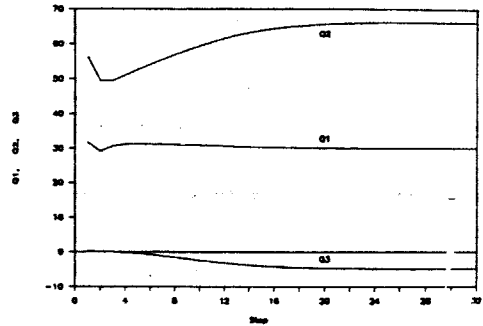


Fig. 11 Convergence plot of Q1,Q2,Q3

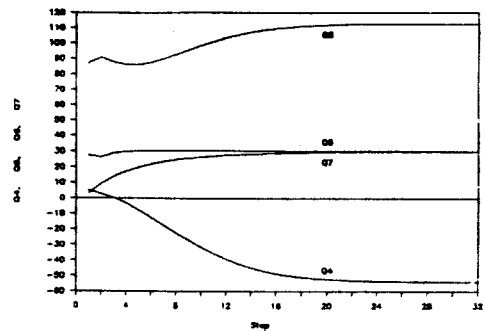


Fig. 12 Convergence plot of Q4,Q5,Q6,Q7

학 해를 구하여 보았다. 초기 위치는 영 기준 방법으로 설정하였고, 많은 해 중에서 초기 위치에 가까운 하나의 해를 구할 수 있다. 따라서 본 알고리즘을 이용해서, 잉여 자유도 로봇의 최적 해를 구하는 문제에도 확장 적용할 수 있게 되었다.

Fig. 10과 Table 2는 일례로 7R로봇의 초기 위치와 기구학 계수를 나타내고 있다. 병진 조인트가 포함된 로봇의 경우도 가능하다.

Fig. 11과 Fig. 12는 7개 조인트 변수의 수렴곡선을 보여주고 있다. 이 해는 Fig. 10의 초기 위치를 초기 값으로 해서, 이 값에 가장 근접한 하나의 해를 구한 것이다.

## 4. 결 론

일반적인 로봇 매니플레이터의 반복 해석적 역기구학 알고리즘을 개발하여, 이 알고리즘을 금형 polishing robot system을 위한 off-line program에 적용하였다. 근접 위치 방법을 이용한 편차 함수 최소화 방법을 다양한 로봇의 역 기구학 문제에 이



용함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 로봇의 형상을 기술하는데 있어서, Gupta의 영 위치 기준방법을 도입하여 하나의 기준 좌표계만으로 로봇을 기술할 수 있게 되었고 다양한 로봇 기구학의 일반적인 역 기구학 해를 구하는 방법을 제시하였다.

(2) 근접 위치 방법을 이용하여 수렴 속도를 증가시켰고, 기존의 Kazerounian방법과 그 속도를 비교하였다.

(3) 잉여 자유도 로봇의 역 기구학 문제에도 확장하여 적용할 수 있는 가능성을 제시하였다.

### 참 고 문 헌

- (1) John, J. Craig, 1955, Introduction to Robotics, Eddison Wesley, pp. 60~130.
- (2) Paul, R.P., Stevenson, C.N., 1983, "Kinematics of Robot Wrists," The International Journal of Robotics Research.
- (3) Jorge Angeles, 1985, "On the Numerical Solution of the Inverse Kinematic Problem," The International Journal of Robotics Research.
- (4) Mauro Benati, 1982, "The Inverse Kinematic Problem for Anthropomorphic Manipulator Arms," ASME.
- (5) Goldenberg, A.A., Lawrence, D.L., 1985, "A Generalized Solution to the Inverse Kinematics of Robotic Manipulators," Journal of Dynamic System, Measurement and Control.
- (6) Kazem Kazerounian, 1987, "On the Numerical Inverse Kinematics of Robotic Manipulators," ASME.
- (7) Gupta, K.C., Kazerounian, K. 1985, "Improved Numerical Solution of Inverse Kinematics of Robot," IEEE.
- (8) David, E. Orin, William W. Schrader, 1984, "Efficient Computation of the Jacobian for Robot Manipulators," The International Journal of Robotic Research.
- (9) Whitney, D.E., 1972, "The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators," Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control.
- (10) Gupta, K.C., 1986, "Kinematic Analysis of Manipulators Using the Zero Reference Position Description," The International Journal of Robotic Research.
- (11) Wesley, E. Snyder, 1985, Industrial Robots, Prentice Hall, pp. 125~178.
- (12) Fu, K.S., Gonzalez, R.C., Lee, C.S.G., 1987, Robotics, McGraw-Hill, pp. 12~81.
- (13) 김문상, 유형석, 장현상, 허재범, 1990, "로봇 성능 측정 및 Calibration 시스템", 한국자동제어학회 회의, pp. 596~601.
- (14) Kim, M.S. et al., 1990. "A New Calibration System," CIRP-Conference, Berlin.
- (15) Kim, M.S. et al., 1990, "Off-Line Programming System for Polishing Sculptured Surface," ICDM'90, pp. 200~207.
- (16) 한국과학기술연구원, 1990, "금형의 연마 작업을 위한 로봇 Off-Line Programming System개발(2차년도 연차 보고서)".