

〈論 文〉

기준펄스 방식에 근거한 관절형 로봇의 실시간 동작제어에 관한 연구

유석종* · 박서욱** · 오준호**

(1990년 5월 1일 접수)

A Study on the Real Time Motion Control of the Articulated Robot Based on the Reference-Pulse Technique

Seok-Jong Yu, Seo-Wook Park and Jun-Ho Oh

Key Words : Reference-Pulse Type(기준펄스방식), Basic Command Unit(기본지령단위), Incremental Direct Kinematics(증분 정기구학), Incremental Inverse Kinematics(증분 역기구학), Inverse Jacobian Matrix(자코비안 역행렬), Direct Digital Control(직접이산제어), 4-Quadrant Photo-Detector(사분할 광센서), Real-Time Motion Control(실시간 동작제어)

Abstract

This paper presents a new algorithm for solving the inverse kinematics in real time application. For a planar robot the end-tip movement of each link can be resolved into the basic command unit (BCU), which is determined from the link length, and the resolution of the joint motion. When x - and y -axis projection of the end-tip movement are expressed in BCU, projectional increments corresponding to joint increments become $-1, 0$ or 1 . By using the incremental computation with these increments and some simple logic operations, the inverse kinematics can be realized. Through this approach, a reference-pulse system for the two-link planar robot is established. The proposed algorithm is applied to the real time motion control of the 2 DOF SCARA robot. The experimental results show the path tracking performance of the motion control system.

1. 서 론

로봇은 여러개의 링크가 관절에 의해 직렬로 연결되어진 구조로 되어 있다. 이는 구조적으로 몇 가지의 형태로 대별할 수 있는데, 그 중에서 직교형의 로봇은 서로 직교하는 선형축으로 구성되어

있어서 구조가 튼튼하고 위치 분해능이 락 형태에 비해서 뛰어나다. 그러나 이 형태는 로봇 핸드의 속도가 느리고, 유연한 작업을 하기가 힘들다. 따라서 요즘 대부분의 산업용 로봇은 관절형 로봇을 채택하고 있다. 이는 각 관절에서 발생한 오차요인이 핸드로 누적됨으로써 위치 분해능은 다른 형태에 비하여 상대적으로 떨어지고 작업공간 상에서 불균일한 분해능을 가진다. 반면에 핸드가 고속으로 움직일 수 있고 우수한 기계적 유연성을 가지므로 많은 장점을 가지고 있다⁽¹⁾.

*정회원, 三星電機 자동화부

**정회원, 한국과학기술원 생산공학과

산업용 로봇의 초기 형태인 직교형 로봇은 기존의 NC 제어가 가지고 있는 보간기(interpolator)를 이용하여, 기준펄스방식(reference-pulse type) 또는 샘플 데이터 방식(sampled-data type)으로 각 축을 제어 함으로써 로봇 핸드의 경로를 발생시켜 줄 수 있었다. 그러나 관절형 로봇의 경우는 회전관절을 제어해야 하므로, 직교좌표계에서 관절좌표계로의 좌표 역변환(inverse kinematics)을 수행해야 한다. 이 경우 실시간 동작제어를 위해서는 계층적 구조를 갖는 제어기를 주로 채택하며, 상위 CPU는 계획계획 및 좌표변환을 행하여 각 축에 대응하는 하위 CPU로 일정한 샘플링주기 마다 위치령을 전송한다⁽²⁾. 이때 각 축의 위치제어는 대개 마이크로프로세서를 채택한 샘플 데이터 방식으로 이루어 지고 있다 [Fig. 1(a)]. 이 방식은 상위 CPU로부터의 위치령을 일정한 샘플링 주기마다 이진수 형태로 받도록 되어있다. 이것은 상위 CPU 와의 통신이 문제시 되고 설계비용이 고가일 뿐 아니라 채택한 프로세서의 계산능력이 샘플링 주기에 직접적인 영향을 준다.

반면에 Fig. 1(b)에서와 같은 기준펄스방식은 직접이산제어방식(direct digital control)을 채택하여 위치령을 펄스 열(sequence of pulses)의 형태로 받는다. 이 방식은 상위 CPU와의 통신이 문제시 되지 않으며, 위치제어가 하드웨어 만으로 구성되어 있어서 고속의 위치제어가 가능하다⁽³⁾.

기준펄스방식의 관절 제어기에서는 펄스하나당 관절회전각의 분해능에 해당되는 만큼의 운동을 일

으킨다. 이때 관절에 연결된 링크 끝의 운동이 핸드로 전파되는데, 이 운동을 기본지령단위로 하면 단순하면서도 고속의 해를 줄 수 있는 좌표 역변환 알고리즘을 구성 할 수 있다⁽⁴⁾. 즉 관절의 증분운동(incremental motion)에 대응하는 링크 끝의 직교좌표계상의 운동을 기본지령단위로 구하여 테이블화하고, Jacobian역행렬의 부호를 취함으로 얻어지는 간단한 규칙들에 의한 반복적 비교를 수행하여 관절증분 값을 얻을 수 있다.

직교좌표계상에서 로봇의 핸드가 움직여야 할 경로가 기본지령단위의 증분꼴로 주어짐으로써, 기준펄스 방식의 좌표 역변환 알고리즘의 구성이 가능하고 이는 실시간 동작제어에 적합하게 된다.

본 논문에서는 이와같은 기준펄스기법에 근거한 좌표역변환 알고리즘⁽⁴⁾을 도입하고, 센서제환에 의한 2관절 SCARA로봇의 실시간 동작제어에 관한 실험을 통해 이의 효율성을 검증하고자 한다.

2. 좌표 역변환 알고리즘

2.1 기본지령단위의 정의

주어진 로봇 시스템이 갖는 위치 분해능은 제어 알고리즘이 가지는 오차, 감속기의 백 래쉬, 마찰에 의한 오차등 기계적인 오차에 의해 결정되나 궁극적인 위치분해능은 엔코더등의 위치검출장치가 가지는 분해능을 능가할 수 없다. 이와같이 로봇 시스템의 위치 분해능이 유한한 값을 가지므로, 이 분해능 이상의 정밀도를 가지는 지령은 무의미하다.

따라서 좌표 역변환의 해를 구할 때 이러한 분해능을 고려한다면 주어진 로봇 시스템에 최적의 성능을 얻을 수 있을 뿐 아니라, 좌표 변환을 위한 연산자체가 상당히 단순화 되어지게 된다.

이를 살펴보기 위하여 Fig. 2에서와 같은 i 번째 링크의 좌표계를 고려하자, 만일 위치제환 장치로

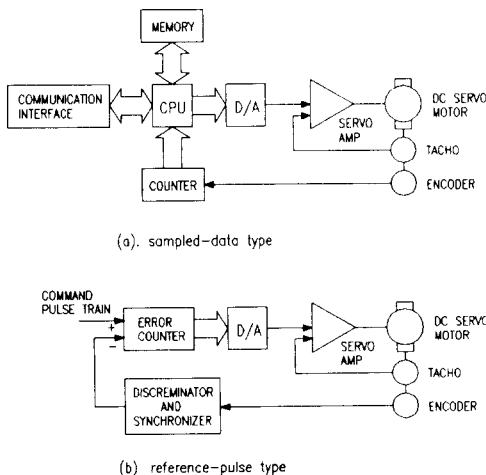


Fig. 1 Structure of the joint controller

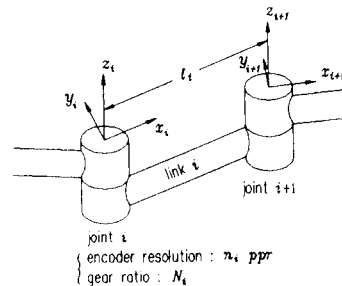


Fig. 2 Link coordinate system

서 증분형 엔코더를 갖는 회전관절에 의해 링크가 구동된다면, 관절 회전운동의 분해능, $\Delta\theta_i$, 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\Delta\theta_i = \frac{2\pi}{n_i N_i} \text{ (radians)} \quad (1)$$

여기서 n_i 는 회전당 펄스 수(pulse per revolution: PPR)를, N_i 는 기어비를, 그리고 첨자 i 는 i 번째 링크 계를 표시한다.

링크 끝점에서의 위치 분해능은 다음식으로 표시된다.

$$\Delta\ell_i = \ell_i \Delta\theta_i \quad (2)$$

여기서 ℓ_i 는 링크 i 의 길이이다.

또한 m 개의 링크를 갖는 평면 로봇에 대해서 기본 지령 단위(basic command unit: BCU), L , 을 다음과 같이 정의하자.

$$L \triangleq \max(\Delta\ell_i) \quad i=1,2,\dots,m \quad (3)$$

2.2 증분 정기구학(Incremental Direct Kinematics)

i 번째 링크 좌표계에 대해 고려할 때 관절각, θ_k , 에 대응하는 링크 끝 점의 위치는 다음과 같다.

$$x_i(k) = \ell_i \cos\theta_k, \quad y_i(k) = \ell_i \sin\theta_k \quad (4)$$

여기서 $\theta_k = k\Delta\theta_i$ 이고 k 는 엔코더 펄스 수이다. 식 (4)를 동작점 근방에서 선형화 시키면 다음 식을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= x_i(k) + \left[\frac{d(\ell_i \cos\theta)}{d\theta} \right]_{\theta=\theta_k} \Delta\theta_i \\ y_i(k+1) &= y_i(k) + \left[\frac{d(\ell_i \sin\theta)}{d\theta} \right]_{\theta=\theta_k} \Delta\theta_i \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 증분형의 기구학 방정식은 다음과 같게 된다.

$$\begin{aligned} \Delta x_i(k) &= \left[\frac{d(\ell_i \cos\theta)}{d\theta} \right]_{\theta=\theta_k} \Delta\theta_i \\ \Delta y_i(k) &= \left[\frac{d(\ell_i \sin\theta)}{d\theta} \right]_{\theta=\theta_k} \Delta\theta_i \end{aligned} \quad (6)$$

여기서

$$\begin{aligned} \Delta x_i(k) &\triangleq x_i(k+1) - x_i(k), \\ \Delta y_i(x) &\triangleq y_i(k+1) - y_i(k) \end{aligned}$$

식 (6)을 앞 절에서 정의된 BCU, L 로 나누어 주면 다음과 같은 무차원 형태의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\Delta x_i(k)}{L} = \left[\frac{\ell_i \Delta\theta_i}{L} \right] \left[\frac{d(\cos\theta)}{d\theta} \right]_{\theta=\theta_k} \quad (7)$$

여기서 다음과 같이 변수들을 정의 하면

$$\Delta x_i^t(k) \triangleq \frac{\Delta x_i(k)}{L} \quad (8)$$

$$\alpha_i \triangleq \frac{\ell_i \Delta\theta_i}{L} \quad (0 < \alpha_i \leq 1) \quad (9)$$

따라서 식(7)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\Delta x_i^t(k) = \alpha_i \left[\frac{d(\cos\theta)}{d\theta} \right]_{\theta=\theta_k} \quad (10)$$

식(10)으로 주어지는 무차원 직교 증분 값들을 더하면, 링크 끝 점의 x 좌표를 L 단위로 표시 할 수가 있다. 즉

$$\begin{aligned} x_i^t(k) &\cong \text{int} \left[\sum_{j=0}^{k-1} \Delta x_i^t(j) \right] \\ &= \text{int} \left[\sum_{j=0}^{k-1} \alpha_i \left[\frac{d(\cos\theta)}{d\theta} \right]_{\theta=\theta_j} \right] \\ &\cong \text{int} \left[\sum_{j=0}^{k-1} \alpha_i \left\{ \frac{\cos\theta_{j+1} - \cos\theta_j}{\Delta\theta_i} \right\} \right] \\ &\cong \sum_{j=0}^{k-1} \left[\text{int} \left\{ \alpha_i \frac{\cos\theta_{j+1}}{\Delta\theta_i} \right\} - \text{int} \left\{ \alpha_i \frac{\cos\theta_j}{\Delta\theta_i} \right\} \right] \\ &= \sum_{j=0}^{k-1} \Delta x_i^*(j) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서

$$\Delta x_i^*(j) \triangleq \text{int} \left\{ \alpha_i \frac{\cos\theta_{j+1}}{\Delta\theta_i} \right\} - \text{int} \left\{ \alpha_i \frac{\cos\theta_j}{\Delta\theta_i} \right\} \quad (12)$$

비슷한 과정으로 부터 다음 식을 유도 할 수 있다.

$$y_i^t(k) = \sum_{j=0}^{k-1} \Delta y_i^*(j) \quad (13)$$

여기서

$$\Delta y_i^*(j) \triangleq \text{int} \left\{ \alpha_i \frac{\sin\theta_{j+1}}{\Delta\theta_i} \right\} - \text{int} \left\{ \alpha_i \frac{\sin\theta_j}{\Delta\theta_i} \right\} \quad (14)$$

위와 같은 방법으로 하면 평형링크 형태의 2 관절 평면 로봇에 대한 정기구학의 해를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} x^L &= \sum_{j=0}^{k_1-1} \Delta x_1^*(j) + \sum_{j=0}^{k_2-1} \Delta x_2^*(j) \\ y^L &= \sum_{j=0}^{k_1-1} \Delta y_1^*(j) + \sum_{j=0}^{k_2-1} \Delta y_2^*(j) \end{aligned} \quad (15)$$

식 (12) 및 (14)로 얻어지는 $-1, 0$ 또는 1 의 값은 BCU를 기본단위로 한 무차원 직교 증분들이다. 임의의 로봇에 대하여 기본 지령 단위가 결정되면 관절증분 운동에 대응하는 직교증분들을 얻게 되고, 이들을 테이블화 하여 메모리에 기억시켜 둘 수가 있다. 한번 테이블이 만들어지면 이를 순차적으로 더해줌으로써 정기구학의 해는 간단히 풀 수가 있다. 이는 삼각함수 테이블을 메모리에 기억시켜 정기구학의 해를 구하는 방법에 비해서 메모리 크기가 줄어들 뿐 아니라 데이터 전송에도 많은 잇점이 있다. 뿐만 아니라 이와같은 증분계산 방식으로부터 역기학을 푸는 계산과정이 간단한 덧셈 및

논리연산으로 단순화 된다.

2.3 증분방식의 역기구학

로봇의 끝 점의 원하는 운동이 앞에서 정의되어진 기본 지령 단위로 주어지고, 관절 증분운동이 매 반복 계산시 마다 각 관절의 분해능에 해당되는 크기로 제한한다고 하면, 역기구학의 해는 각 관절의 회전방향만을 결정하는 문제로 단순화된다. 여기서 원하는 끝 점의 운동에 대해 관절의 회전 방향은 로봇의 현재의 자세에 관계하며, 이는 Jacobian 역행렬의 각 요소의 부호를 취함으로써 얻어진다. 즉,

$$\Delta\theta = S(\theta)\Delta x^l \quad (16)$$

여기서 $S(\theta) \triangleq \text{sign}[J^{-1}(\theta)]$

식 (16)으로 얻어진 관절증분 운동으로 로봇 핸드는 원하는 점으로 움직이게 된다. 여기서 주목할 것은 $S(\theta)$ 는 Jacobian 역행렬의 부호만을 취하였기 때문에 모든 가능한 자세에 대해서 단지 몇 종류의 조합만이 존재하게 된다. 따라서 이는 미리 얻을 수가 있으며 이를 테이블화시켜 참조하면, 주어진 제적에 대하여 반복적으로 Jacobian 역행렬의 해를 구해야 하는 기존의 방법^(5,6)에 비하여 계산시간이 실질적으로 무시할 수 있을 만큼 짧게 된다.

이와같은 방법으로 역기구학의 해를 구하는 순서는 다음과 같다.

(1) 로봇 핸드의 지령운동을 기본 지령단위로 인가한다.

(2) 현재의 자세에 대한 $S(\theta)$ 의 부호를 미리 저장된 테이블로부터 읽어 관절증분의 회전방향을 결정하고, 해당 관절에 회전 지령 펄스를 내 보낸다. 이것으로부터 새로운 관절값을 얻는다. 즉

$$\begin{aligned} \theta(i+1) &= \theta(i) + \Delta\theta(i) \\ &= \theta(i) + S[\theta(i)]\Delta x^l(i) \end{aligned} \quad (17)$$

(3) 2.2절에서 제안된 증분 정기구학을 이용하여, 관절증분에 대응하는 로봇 핸드의 직교증분값을 구한다. 또한 이것과 지령치를 비교하여 원하는 해를 얻은 때까지 (2)와 (3)의 과정을 반복한다.

도입된 좌표역변환 알고리즘이 증분운동의 반복적 비교에 의해 해를 구하기 때문에, 알고리즘의 입출력이 펄스형태로 주어질 수 있다. 입력되어지는 펄스 한개는 로봇 핸드의 직교증분지령에 대응되고, 출력펄스 한개는 관절증분운동에 해당된다. 또한 펄스 속도는 각각 핸드 및 관절운동의 속도와 같다. 따라서 Fig. 3 에서와 같은 기준펄스 방식의

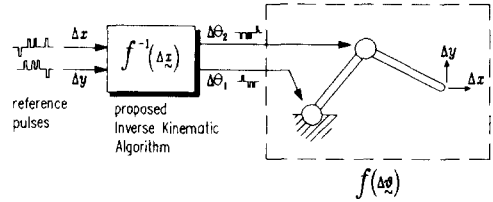


Fig. 3 Reference-pulse system for the two-link robot

좌표 역변환 알고리즘의 구성이 가능하게 된다.

이러한 특성들로 인하여 기존의 NC 공작기계에서 널리 사용되어지는 기준 펄스방식의 보간기를 그대로 사용함으로써 로봇 핸드의 지령경로 및 속도를 발생시켜 줄 수 있고, 따라서 고속의 동작제어가 가능하게 된다. 또한 로봇의 실시간 동작제어를 위해 필수적인 센서의 제환을 하드웨어적으로 구현할 수 있으므로 실시간제어가 용이하게 되며, 3장에서 이것을 실험적으로 검증해 보고자 한다.

3. 센서제환에 의한 2관절 SCARA 로봇의 실시간 동작제어

3.1 실험용 SCARA 로봇

본 논문의 주된 관점이 로봇 기구학적 방정식의 효율적인 해법에 있으므로, 로봇의 비선형적인 동특성의 영향을 최소화 할 수 있는 실험용 로봇을 설계, 제작하였다.

로봇 몸체의 관성에 의한 영향을 최소화하기 위하여 무게에 비해 강성이 큰 탄소 복합재료를 사용하여 몸체를 제작하였다. 로봇 메카니즘은 평형링크형으로 하였는데, 이는 각 관절 모터를 베이스 부분에 설치할 수 있는 잇점이 있을 뿐 아니라 직렬 링크형에 비해 코리올리 힘 및 원심력에 의한 비선형적인 힘의 영향을 최소화 할 수 있다⁽⁷⁾. 또한 실험용 로봇은 중력 방향에 수직으로 동작하는 SCARA 로봇 이므로 중력에 의한 토오크는 무시된다.

각 관절은 67W의 직류형 서보모터로 구성되며, 50 : 1의 감속비를 가지는 하모닉 드라이브를 감속기로 사용하였다. PWM방식으로 구동되는 서보앰프는 직류모터와 동축에 연결된 타코 제너레이터에 의해 속도제환이 이루어지고, 1회전당 1000개의 펄스를 발생하는 증분형 엔코더에 의해 관절의 위치를 감지한다. 링크의 길이가 400mm이므로 2장에서 정의된 기본지령단위는 $50.265\mu\text{m}$ 가 된다.

3.2 관절 모터 위치 제어기

관절 모우터의 위치제어는 위치에 대한 비례제어를 수행하는 직접이산제어 방식을 하드웨어로 구성하여 기준펄스 입력신호당 엔코더 분해능에 대응하는 위치구동을 하도록 하였다.

실제로 제작된 위치제어기는 엔코더 펄스 방향판별회로, 동기회로, 편차카운터 및 D/A 변환기들로 구성된다. 위치지령 펄스열은 12 bit의 편차카운터로 인가된다. 한편 엔코더로부터 얻어지는 A 및 B상의 펄스도 역시 방향판별회로 및 동기회로를 거쳐 편차카운터로 케환된다. 여기서 동기회로는 지령펄스와 엔코더 케환 펄스가 편차카운터에 동시에 인가 되는 것을 방지하는 역할을 한다. 편차 카운터의 출력은 순간 위치오차에 해당되는 값으로 D/A 변환기에 의해 애널로그 값의 속도지령으로 변환된다.

3.3 센서 시스템

로봇의 실시간 동작제어를 위하여는 위치오차 감지를 위한 센서 시스템이 필수적이다. 본 논문에서는 응답성이 빠르고 가격이 저렴하며 고분해능을 가지고, 영점 감지장치 (null detection device)로 적합한 사분할 광센서(4-quadrant photo-detector)를 사용하였다⁽⁸⁾. 센서의 광감지 표면의 면적이 100mm 이므로 5mm의 직경을 갖는 원형 빛을 비추었을 때 최대 $\pm 2.5\text{mm}$ 의 측정구간을 얻게 된다. 본 연구에서는 유효 측정구간을 $\pm 2\text{mm}$ 로하여 신호 처리부를 구성하였으며, 이때 반복에 따른 최대 오차는 0.02mm, 최대 선형오차는 0.05mm였다. 이는 1 BCU 정도에 해당되므로 위치 센서로서 적합

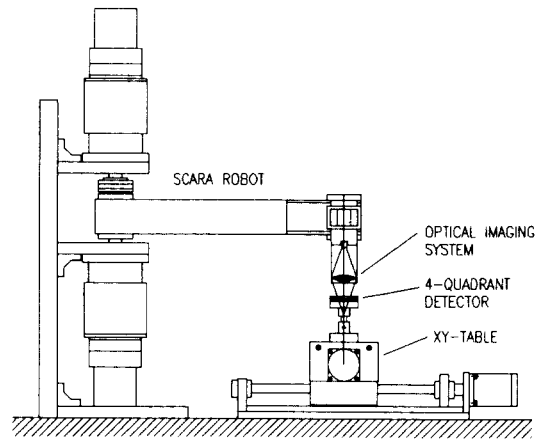


Fig. 4 Schematic of the experimental set-up

함을 알 수 있다.

Fig. 4 에서 보는 바와 같이 사분할 센서는 지령 경로를 발생하는 XY 테이블상에 고정시키고, 로봇의 핸드에는 광원 및 렌즈 시스템을 이용하여 원형의 빛을 센서에 비추도록 되어 있다.

사분할 광센서로부터 얻어지는 핸드의 상대적인 위치오차를 영으로 만들어 주는 방향으로 로봇을 제어하여 임의의 경로로 움직이는 물체를 추적할 수 있도록 하였다.

3.4 동작 제어계의 구성

Fig. 5는 전체적인 동작제어계에 대한 구성도이다. 지령경로는 SCARA 로봇 하단에 설치된 XY 테이블에 의하여 주어지고 로봇 핸드는 이를 추종하도록 실험장치를 구성하였다. XY테이블은

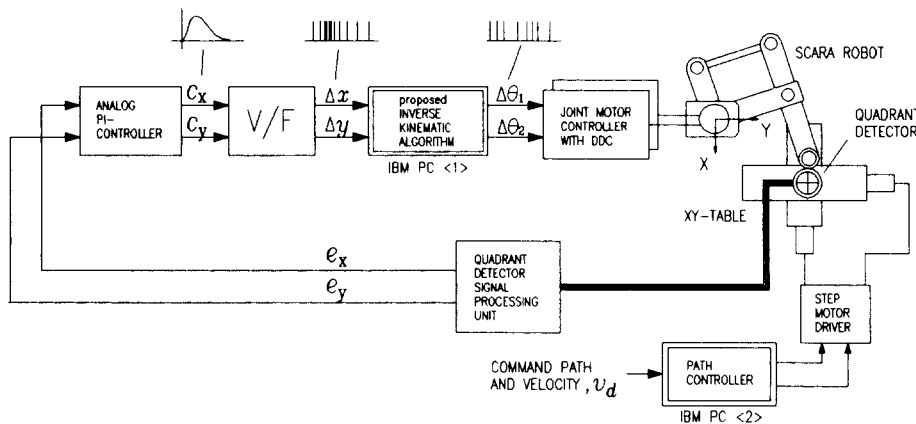


Fig. 5 Block diagram of the motion control system

400PPR의 분해능을 갖는 2상 스텝 모터 및 리드가 16mm인 볼리드 나사에 의해 구동된다. 따라서 스텝 모터 펄스 하나 당 0.04mm의 위치분해능을 가진다. 각 스텝 모터는 2여자방식을 택하였고, 여자전류의 제어는 정전류 초퍼구동방식으로 설계 제작하였다. 지령경로는 별도의 컴퓨터(IBM PC)에 의하여 제어되도록 하였다.

사분할 센서로부터 지령경로에 대한 위치오차, e_x 및 e_y 가 감지되고 애널로그 비례적분 제어기에 의해 제어신호, c_x 및 c_y 가 얻어진다. 즉

$$\begin{aligned} c_x &= \left[K_{px} + \frac{K_{ix}}{S} \right] e_x \\ c_y &= \left[K_{py} + \frac{K_{iy}}{S} \right] e_y \end{aligned} \quad (18)$$

제어신호는 다시 V/F 변환기에 의해 지령 펄스 열로 변환된다. 이 신호가 로봇 핸드의 직교 좌표 계상의 증분운동지령 Δx 및 Δy 가 된다. 이때 펄스 한개는 기본지령단위(BCU)에 해당하며 BCU로 주어지는 운동지령이 2장에서 도입된 좌표역변환 알고리즘에 입력되면 관절증분운동을 일으키는 지령펄스열이 얻어진다. 이것은 3.2절에서 언급한 관절모터 위치제어기에 인가되면 결과적으로 로봇의 핸드는 위치오차를 영으로 만들어주는 방향으로 움직인다.

3.5 실험결과 및 분석

지령경로는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 (400mm, 400mm)에서 출발하는 한 변이 40mm인 정사각형으로 하고, 비례적분제어기의 이득 값(K_{px} , K_{py} , K_{ix} , K_{iy}) 및 지령속도, V_d , 를 변화시켜 가면서 경로추적성능을 살펴보았다. 각 축의 비례적분 제

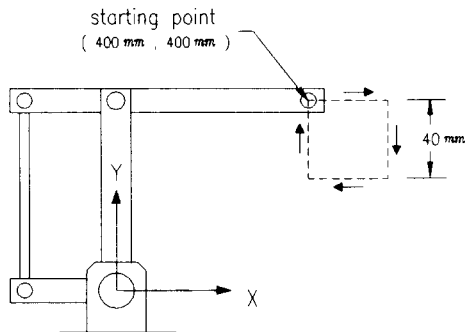
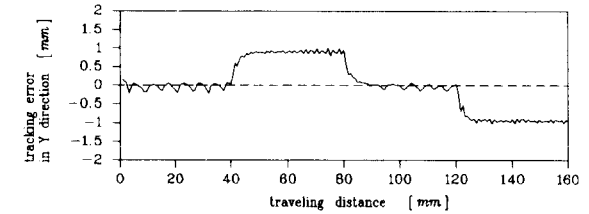
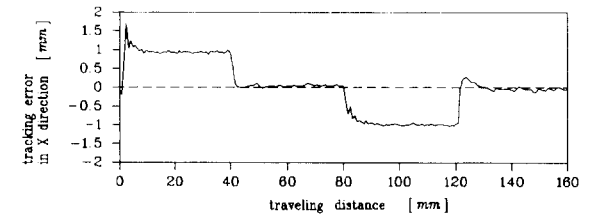


Fig. 6 Command path

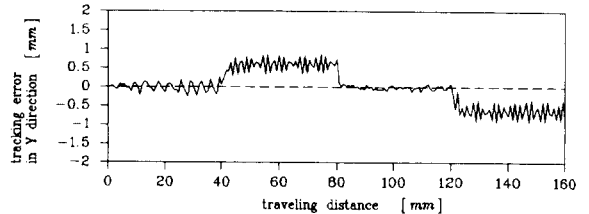
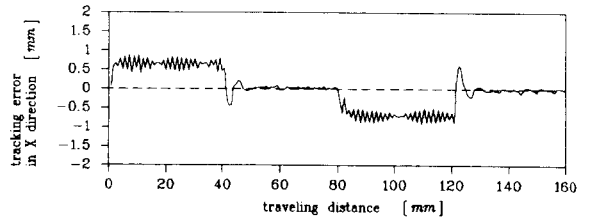
어기의 이득 값은 로봇의 동역학적 해석 없이 시행 오차법에 의해서 결정하였으며 실험결과들의 대표적인 몇 가지 경우에 대해서 고찰하였다.

Fig. 7에서 Fig. 8은 핸드가 지령경로를 따라 이동할때, X 및 Y축 방향에 대한 경로추적오차를 도시한 것이다. 이것은 사분할 센서로부터 얻어지는 전압을 A/D변환기로 읽은 값이다.

Fig. 7(a)(b)는 비례제어만을 행하였을 때의 결과이다. V_d 를 17.8mm/sec로 하고 비례 이득이 0.4일때는 추종오차가 거의 1mm정도였으나, 이득 값을 0.6으로 증가시켰을 때는 0.5mm정도로 추종 오차가 줄어들었다. 그러나 이득이 커짐에 따라 점차 상대 안정성이 감소하는 경향이 보이기 시작함을 관찰할 수 있었다. Fig. 7(a)(b)에서 Y축 방



(a) $K_{px} = K_{py} = 0.4$, $V_d = 17.8$ mm/sec



(b) $K_{px} = K_{py} = 0.6$, $V_d = 17.8$ mm/sec

Fig. 7 Experimental results for the P-control case

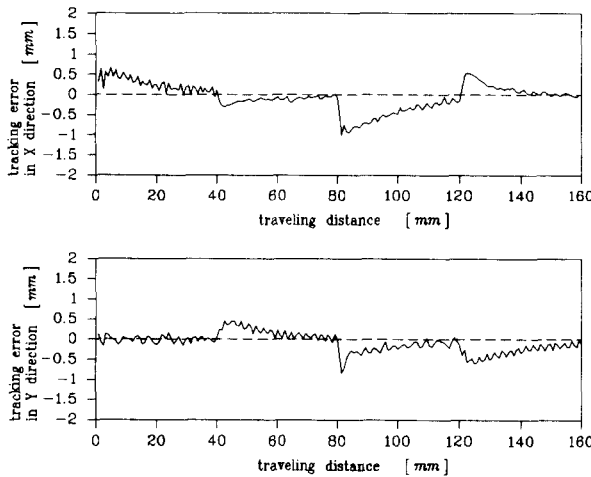


Fig. 8 Experimental results for the PI-control case ($K_{px} = K_{py} = 0.5$, $K_{ix} = K_{iy} = 0.48$, $v_d = 13.3\text{mm/sec}$)

향의 응답이 X축 방향의 응답에 비하여 상대 인정성이 다소 떨어지는 이유는 주어진 지령경로 상에서 Y방향의 기계적 이득이 X방향의 그것보다 크기 때문이라 판단된다. 위치에 대한 경사입력이 주어졌을 때, 비례제어 만으로는 추종오차를 영으로 만들 수 없으므로 적분제어를 포함하여 실험을 수행하였다.

적분제어를 포함하였을때의 결과는 Fig. 8과 같다. V_d 를 13.3mm/sec으로 하고 비례이득을 0.5, 적분이득을 0.48로 한 경우에 정상상태의 위치 오차는 0.1mm 이내로 줄어 들었다. 그러나 지령경로의 꺾이는 점에서 오버슈트가 커지는 현상이 관찰되어졌다. 이는 지령속도가 일정하게 주어졌기 때문에 모서리 부분에서 발생하는 X 및 Y축 방향으로의 가속도에 의한 영향 때문이라 판단된다.

4. 결 론

로봇 시스템이 가지는 케환장치의 분해능, 감속비 및 링크길이 등에 의해 결정되는 위치분해능을 기본지령단위로 정의하고, 이것에 근거한 증분계산에 의해 좌표역변환의 해를 구하는 새로운 방식의 알고리즘을 도입하였다. 도입된 알고리즘을 이용하여 센서케환에 의한 로봇의 실시간 동작제어를 실험적으로 수행하였다. 즉 XY테이블이 생성하는

지령경로를 사분할 광센서로 감지하고, 에널로그 비례적분제어기 및 V/F 변환기를 거쳐 발생되는 지령펄스열에 의해 로봇을 동작시킨다. 이와같은 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 도입된 좌표 역변환 알고리즘은 로봇 시스템이 갖는 위치분해능을 고려한 증분계산방식을 사용하기 때문에 삼각함수 및 부동소숫점 연산의 사용을 배제 할 수 있었다.
- (2) 도입된 알고리즘이 기준펄스방식으로 구성되기 때문에 고속의 해를 얻을 수 있고, 실시간 동작제어가 가능하다.
- (3) 로봇 핸드 위치의 직접적인 케환에 의한 2관절 SCARA로봇의 실시간 동작제어가 실험적으로 입증되어 졌다.

참 고 문 헌

- (1) Koren, Yoram, 1987, "Robotics for Engineers", McGRAW-HILL, Inc.
- (2) Barbera, A.J., et al., 1979, "Hierarchical Control of Robots Using Microcomputers", 9th ISIR, p. 405.
- (3) Korean, Yoram, 1983, "Computer Control of Manufacturing Systems", McGRAW-HILL, Inc.
- (4) Oh, Jun-Ho and Park, Seo-Wook, 1989, "A New Approach for Solving the Inverse Kinematics in Real-Time Application," 1989 World Conference of Robotics Research: The Next Five Years and Beyond, Gaithersburg, Maryland, U.S.A., pp. 4/17-4/28.
- (5) Oh, Se-Young, Orin, David, Bach, Michael, 1984, "An Inverse Kinematic Solution for Kinematically Redundant Robot Manipulators", J. of Robotic System, 1(3), pp. 235~249.
- (6) Tsai, Y.T., Orin, David, E., 1987, "A Strictly Convergent Real-Time Solution for Kinematically Redundant Robot Manipulators", J. of Robotic Systems, 4(4), pp. 477~501.
- (7) Asada, Haruhiko, Youcef-Toumi, Kamal, 1984, "Analysis and Design of a Direct-Drive Arm With a Five-Bar-Link Parallel Drive Mechanism", Trans. of the ASME J. of DSMC, Vol. 106, pp. 225~230.
- (8) Shoham, M., Fainman, Y. and Lenz, E., 1984, "An Optical Sensor For Real-Time Positioning, Tracking, and Teaching of Industrial Robots", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. IE-31, No. 2, pp. 159~163.