

3자유도 직교좌표용 Manipulator 개발 에 관한 연구

A Study on the Development 3-Degree of Freedom
Cartesian Coordinates Manipulator

한재호* 박환규** 김재열**
* : 조선대학교 대학원 정밀기계공학과
** : 조선대학교 정밀기계공학과

1. 서론

산업사회의 발달과 급변하는 시장수요로 인하여 제품의 라이프 사이클이 짧아지고, 이에 따라 제품의 소량, 다 품종 생산이 절실히 요구되고 있다. 따라서 생산시스템 분야에서는 상품제조의 경비를 절감하고 소비자의 다양한 요구를 만족시키는 다품종 소량 생산 체제로의 전환을 위하여 생산설비의 자동화, 고속화, 유연화를 추구하고 있다. 특히 FMS는 제조, 가공, 조립의 세가지 부시스템(subsystem)과, 이들이 공유하는 자동저장시스템(automated storage system) 및 CAD(computer aided design)시스템, 이들을 연결시켜 주는 반송시스템(material handling system), 각각의 시스템을 관리 제어하는 컴퓨터 시스템 등으로 계층적 분류를 할 수 있다.

FMS를 구성하는 수 많은 요소중 산업용로봇(industrial robot)는 조립(assembly)작업, 반송(handling)작업, 기구(tool operating)작업 등 다양한 동작기능을 발휘함으로써 FMS에서 가장 핵심적인 역할을 수행하고 있다

산업용 로봇은 1980년대에 저렴하고 고속, 고성능의 마이크로 프로세서가 급속히 개발되어 대량 공급되고 이런 마이크로 프로세서를 채용한 워크스테이션(workstation) 및 PC가 널리 보급되어 컴퓨터 제어기술이 고도화 되면서 급속히 발달하여 왔다.

로봇의 다이내믹스는 서로 연관된 비선형 특성을 지니므로 비선형 제어가 바람직 하나 복잡하고 많은 계산시간을 필요로 하므로 실시간 제어가 적용하기가 어려워 일반적으로 산업현장에서는 다이내믹스를 무시한 PID(proportional integral derivative)제어 방식이 많이 이용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 생산 공정에서 직접 활용 가능한

자재취급(Material handling) 및 기구작업(tool operating)용 직교 3자유도 위치결정용 로봇트를 설계, 제작하고 IBM - PC와 인터페이스하여 PID제어계를 구성하여 로봇트를 제어하며 특성 실험을 통하여 성능 측정을 하고자 한다.

2. 제어 이론

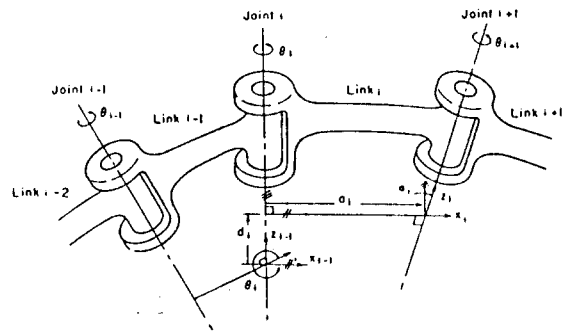


Fig.1 Hartenberg-Denavit Link Parameters

로봇 링크의 기하학적 정보를 얻기위해 이웃하는 링크사이의 공간이동을 표현하는 방법으로 Denavit - Hartenberg 행렬방식이 주로 사용되고 있다.

Denavit - Hartenberg 방법은 각 링크에 좌표계를 설정하여 전체계를 해석하는 행렬해석방법으로서, 앞의 링크 좌표계에 대한 다음 링크 좌표계의 관계를 링크의 기하학적 파라미터 α_i , θ_i , a_i , d_i 에 대한 (4×4) 동차변환행렬(Homogeneous transform matrix)로서 표현된다.

여기서 θ_i 는 Z_{i-1} 축을 중심으로 X_{i-1} 축과 X_i 축 사이의 관절각을 나타내고, d_i 는 Z_{i-1} 축을 중심으로 생각할 때 (i-1) 번째 좌표계의 원점에서 Z_{i-1} 축과 X_i 축의 교점간의 거리이며, a_i 는 Z_i 축과 Z_{i-1} 축과의 가장 가까운 거리를 나타낸다. 또한 a_i 는 X_i 축을 중심으로 했을 경우 Z_i 축에서 Z_{i-1} 축 사이의 각을 나타내고 있다.

식(1)에서 회전관절(Revolutional joint)의 경우에는 θ_i 가 변수가 되고 미끄럼관절(Prismatic joint)의 경우에는 d_i 가 변수가 되며 나머지 3개의 파라미터는 고정된다. 이들 기하학적 파라미터를 이용하여 조인트 i의 좌표계와 조인트 i-1 좌표계의 관계를 나타내면

$$\tau_{i-1} = {}^{i-1}A_i \tau_i$$

이며, 본 연구에서는 모든 관절이 미끄럼 관절로 구성되었으므로

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\theta_i \sin\theta_i & \sin\theta_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\theta_i & -\cos\theta_i \sin\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

로 표현되며 i 번째 좌표계를 기준 좌표계에 대해 나타낼때의 동차변환 행렬을 T_i 라 하면 식(2)로 나타낼 수 있다

$${}^0T_i = {}^0A_1 {}^1A_2 \cdots {}^{i-1}A_i \quad (2)$$

또한 기준좌표계로 표시된 로봇 절단부의 위치와 방향에 대응하는 각 조인트의 변수들을 해석적 방법 (Analytical method)으로 신속하게 구할 수 있다. 로봇 기구가 n 개의 조인트로 구성되어 있다면 조인트 변수 q_i 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} ({}^0T_1)^{-1} {}^0T_n &= {}^1T_n \\ ({}^1T_2)^{-1} ({}^0T_1)^{-1} {}^0T_n &= {}^2T_n \\ ({}^{n-1}T_n)^{-1} \cdots ({}^0T_1)^{-1} {}^0T_n &= {}^nT_n \end{aligned} \quad (3)$$

첫 식 (3)의 좌변들의 요소들은 0T_n 행렬과 q_1, \dots, q_i 의 조인트의 좌표에 영향을 받고 우변의 행렬은 q_{i+1}, \dots, q_n 의 조인트의 좌표에 영향을 받는다. 또한 식 (3)에서 좌변과 우변의 요소들을 비교하면서 q_1, q_2, \dots, q_n 의 조인트 변수들을 구할 수 있다.

다음은 운동방정식의 표현으로 본 연구에서는 Lagrange-Euler 방정식을 사용하여 운동방정식을 유도하였는데 Lagrange-Euler 방정식은 링크전체의 운동에너지 $K(q, \dot{q})$ 와 위치에너지 $P(q)$ 를 구하여 Lagrangian 방정식을 이용하여 유도한다.

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} L(q, \dot{q}) \right] - \frac{\partial}{\partial q_i} L(q, \dot{q}) = \tau_i \quad (4)$$

기준좌표계에 대한 링크 i위의 한점의 속도는

$$\begin{aligned} {}^0V_i &= \frac{d}{dt} ({}^0\bar{r}_i) = \frac{d}{dt} ({}^0T_i {}^i\bar{r}_i) \\ &= \left(\sum_{j=1}^i U_{ij} \dot{q}_j \right) {}^i\bar{r}_i \end{aligned} \quad (5)$$

여기서

$$\begin{aligned} U_{ij} &= \frac{\partial T_i}{\partial q_j} \\ &= \begin{bmatrix} {}^0A_1 \cdots {}^{j-2}A_{j-1} Q_j & {}^{j-1}A_j \cdots {}^{i-1}A_i, j < i \\ 0 & {}^{j-1}A_j \cdots {}^{i-1}A_i, j > i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

이때 관절 i가 미끄럼 관절이기 때문에

$$Q_j = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

이므로 링크 i의 운동에너지는

$$\begin{aligned} K_i &= \int dK_i = 1/2 \int Tr (v_i v_i^T) dm \\ &= 1/2 Tr \left[\sum_{p=1}^i \sum_{r=1}^i U_{ip} ({}^i\bar{r}_i) ({}^i\bar{r}_i)^T dm \right] U_{ir}^T \dot{q}_p \dot{q}_r \end{aligned} \quad (8)$$

링크 전체의 운동에너지 K는

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = 1/2 \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^i \sum_{r=1}^i [Tr (U_{ip} J_i U_{ir}^T) \dot{q}_p \dot{q}_r] \quad (9)$$

링크 i의 위치에너지 P_i 는

$$P_i = -m_i g {}^0r_i = -m_i g (T_i {}^i\bar{r}_i) \quad (10)$$

이며 전체의 위치에너지 P 는

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = - \sum_{i=1}^n m_i g (T_i^i \bar{r}_i) \quad (11)$$

여기서 $g = (g_x , g_y , g_z , 0)^T$ 는 중력 가속도 벡터이며 기준좌표계에 대해서 표현된다.

앞에서 구한 운동에너지 K 와 위치에너지 P 를 사용하여 Lagrangian $L = K - P$ 가 구해지고 이것을 Lagrange - Euler 방정식에 적용하여 풀면 링크 i 를 구동시키기 위해 필요한 관절 i 의 액츄에이터 토크를 구할수 있다.

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (12)$$

$$= \sum_{j=1}^n D_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n h_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + C_i \quad , i = 1, 2, \dots, n$$

또는

$$\ddot{\tau} = D(q)\ddot{q} + \dot{q}^T H(q) \dot{q} + C(q) \quad (13)$$

로 표시 할수 있다.

여기서,

$\ddot{\tau}$: $n \times 1$ 조인트에서의 토크 벡터

\dot{q} : $n \times 1$ 조인트에서의 변수 벡터

$D(q)$: $n \times n$ 관성행렬 (Inertia matrix)로써 행렬의 각 요소는

$$D_{ij} = \sum_{p=\max(i,j)}^n T_r (U_{pi}^T J_p U_{pi}) \quad , i, j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$H(q)$: n 개의 $n \times n$ Corilis, 원심력 행렬로서, 각 요소는

$$h_{ijk} = \sum_{p=\max(i,j,k)}^n T_r (U_{pk}^T J_p U_{pi}) \quad , i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

단

$$U_{pk} = \frac{\partial T_p}{\partial q_j} = \begin{cases} {}^0 A_{j-1} Q_j^{j-1} A_{k-1} Q_k^{k-1} A_{p,p} & , p > k > j \\ {}^0 A_{k-1} Q_k^{k-1} A_{j-1} Q_j^{j-1} A_{p,p} & , p > j > k \\ 0 & , p < j \text{ or } p < k \end{cases} \quad (16)$$

$C(q)$: $n \times 1$ 중력 벡터로서 , 각 요소는

$$C_i = \sum_{p=1}^n (-m_p \bar{g} U_{pi}^T \bar{r}_p) \quad , i = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

구동부의 제어목적은 상위 제어 시스템으로부터 계획된 로봇의 궤적을 실제 메카니즘부의 운동에 여러가지 장애 요인이 있음에도 불구하고 정확히 추종하도록 하는것이다. 제어입력은 실시간으로 계산되어야 하므로, 계산의 복잡성과 수행 능력을 고려하여 제어를 설계하여야 한다.

로봇 매니플레이터의 모멘트(Moment)가 회전 반지름의 변화에 따라 변화하는 회전 운동의 경우 제어에 비선형 특성을 고려 하여야 하나, 본 연구에서와 같이 로봇 매니플레이터의 팔이 위치에 의해서 모멘트가 변화되지 않는 미끄럼 관절인 경우 선형제어를 적용하는 것이 효과적이다.

n 개의 관절을 가지고 있는 로봇 매니플레이터의 동적 방정식은 다음 (18) 식과 같이 표현될 수 있다.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau(t) \quad (18)$$

여기서

$\tau(t)$: 관절 토크 벡터 ($n \times 1$)

q, \dot{q}, \ddot{q} : 관절 위치 벡터 ($n \times 1$).

$D(q)$: 관성행렬 ($n \times 1$)

$C(q, \dot{q})$: 코리올리스 및 원심력 벡터 ($n \times 1$)

$G(q)$: 중력하중 벡터 ($n \times 1$)

공칭작동점 근처에서의 로봇 매니플레이터의 관절 위치 및 관절 속도를 각각 $\hat{q}, \hat{\dot{q}}, \hat{\ddot{q}}$ 이라고 하고 관절 토크 벡터를 τ 라고 정의하면 매니플레이터의 관절토크 벡터 $\tau(t)$ 가 공칭 동작점 근처에서 $\delta q(t), \delta \dot{q}(t), \delta \ddot{q}(t)$ 만큼 섭동된다고 하면, $\tau(t), \delta q(t), \delta \dot{q}(t), \delta \ddot{q}(t)$ 는 (19)식과 같이 정의되며 공칭동작점 p 근처에서의 섭동에 대한 로봇 동특성의 증분동작 (Incremental Behavior) 을 묘사하는 시불변 선형미분동작을 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} \tau(t) &= \hat{\tau}(t) + \delta\tau(t) \\ q(t) &= \hat{q}(t) + \delta q(t) \\ \dot{q}(t) &= \dot{\hat{q}}(t) + \delta\dot{q}(t) \\ \ddot{q}(t) &= \ddot{\hat{q}}(t) + \delta\ddot{q}(t) \end{aligned} \quad (19)$$

이때 $\delta q(t)$ 에 대하여 $D(\hat{q} + \delta q) = D(q)$ 로 가정하고 작동점 $p = (\hat{\tau}, \hat{q}, \dot{\hat{q}})$ 에서 $C(q, \dot{q})$ 및 $G(q)$ 를 Taylor 급수전개하여 고차항을 무시하면, 아래식(20)와 같이 선형2차 미분 방정식으로 선형화 된다.

$$M_a \delta \ddot{q}(t) + M_b \delta \dot{q}(t) + M_c \delta q(t) = \delta \tau(t) \quad (20)$$

여기서

$$M_a = [D]_p, M_b = [\partial C / \partial \dot{q}], M_c = [\partial (C + G) / \partial q]_p$$

이다.

윗식을 상태공간방정식으로 표현하면

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \delta q(t) \\ \delta \dot{q}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I_n \\ -M_a^{-1} M_c & -M_a^{-1} M_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta q(t) \\ \delta \dot{q}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M_a^{-1} \end{bmatrix} \delta \tau(t)$$

$$q(t) = \begin{bmatrix} I_n & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta q(t) \\ \delta \dot{q}(t) \end{bmatrix} \quad (21)$$

여기서

$\delta \tau(t)$ 는 입력벡터 ($n \times 1$), $\delta q(t)$ 는 출력벡터, I_n 은 Identity 행렬을 나타낸다. 그리고 식(20)의 선형방정식을 라플라스 변환하여 전달함수 관계식을 구하면

$$\delta Q(s) = [M_a s^2 + M_b s + M_c]^{-1} \delta T(s) = W(s) \delta T(s) \quad (22)$$

이때 $\delta T(s)$ 및 $\delta Q(s)$ 는 각각 $\delta \tau(t)$ 및 $\delta q(t)$ 의 라플라스변환으로서 주파수 영역에서 로봇시스템의 입력 벡터($n \times 1$) 및 출력벡터($n \times 1$)를 나타낸다.

$W(s)$ 는 식(21)에서 $\delta \tau(t)$ 및 $\delta q(t)$ 를 입, 출력으로 한 전달함수를 나타내고 있다.

선형화된 로봇의 극점을 원하는 위치에 배치시키기 위하여 작동오차 $e(t)$ 를 $[\delta q_r(t) - \delta q(t)]$ 로 가정하면 PID 제어기는 다음과 같이 표현된다.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (23)$$

여기서 K_p 는 비례이득이고, T_i 는 적분시간(Integral Time), T_d 는 미분시간(Derivative time)이며 K_p, T_i, T_d 모두 조절이 가능하다. (23)식을 전달함수로 표현하면

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (24)$$

3. 시스템 구성

제어시스템은 상용화된 NC 컨트롤러를 사용하지 않고 매크로 어셈블리 언어를 이용하여 운영프로그램을 작성하였고 이 프로그램이 IBM PC - 386과 인터페이스 카드를 통하여 서보드라이브, 서보 모터, 센서들을 컨트롤 하도록 구성하였다. 시스템 구성도는 fig.2와 같다.

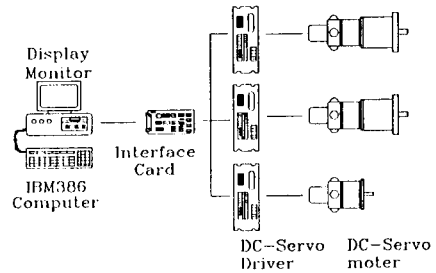


Fig.2 Schematic Diagram of Control System

본 논문에서 사용된 서보드라이브는 금성사의 FDD - 106 PD 로서 위치, 속도 동시 제어용으로 설계되었으며 PWM 주파수는 15 KHz 이고 최대 지령입력은 400 KPPS 이다. 위치 결정도는 ± 1 Pulse 이며, 정상 상태 위치 오차를 Zero 로 하기 위하여 비례 이득과 적분 시간등을 시스템 특성에 따라 결정 할수 있으며 비상정지기능, 과속도, 과전류, 과부하 등의 이상 상태 검출 기능들이 있다.

서보드라이브에 IBM PC의 지령을 전달 하고 로봇트 시스템을 컨트롤하기 위해서 인터페이스 카드를 제작 하

였다. IBM PC의 지령을 전달하는 소자는 INTEL사의 Programmable Peripheral Interface IC인 82C55A를 사용하였고, 컴퓨터의 지령 신호가 짐에 약하고 전송 길이가 짧은 TTL 레벨이므로 이를 개선하기 위하여 고속 OP-AMP인 LM318 IC를 사용하여 지령 신호를 증폭하였다.

fig.3은 인터페이스 카드의 Address Setting 회로이며 다른 I/O Device Controller와의 충돌을 막기 위하여 4개의 Address를 가지며 Dip Switch를 조정함으로써 Address를 변경할 수 있도록 하였다.

fig.4는 82C55A와 LM318 IC로 구성되어 있는데 컴퓨터 지령 전달부와 지령 신호 증폭부로 나누어져 있다.

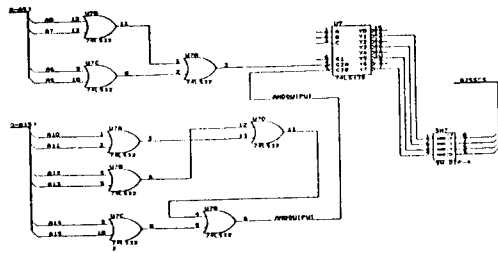


Fig.3 Interface Circuit

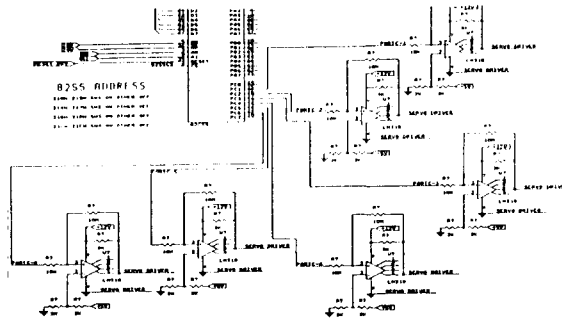


Fig.4 Interface Circuit

다음의 table.1은 각 축의 특성을 나타내고 있다.

구동부의 구성요소들은 긴 스트로크(Stroke)와 고정밀도의 속도, 위치결정 및 동기 운전을 목적으로 하기 때문에 X축과 Y축은 동력전달을 확실히 하고 구조상의 복잡함을 피하며 슬라이드의 슬립(Slip)을 피하기 위하

Table.1 X, Y, Z 축의 특성표

	X 축	Y 축	Z 축
이송부 총 질량 W	150 Kg	89 Kg	61 Kg
이송 속도 VL	30 m/min	30 m/min	19 m/min
마찰 계수 ν	0.2	0.2	0.2
감속 비 R	1 : 10	1 : 10	1 : 1
이송부 허용가속도 α	1.5 m/sec ²	2 m/sec ²	4 m/sec ²
전달 효율 μ	90 %	90 %	90 %
1회전당 이송거리 LP	200 mm	200 mm	4 mm
전체 이송거리 L	4000 mm	2000 mm	1000 mm

여 타이밍 벨트 구동방식을 사용하였으며, Z축은 저가이며 비교적 높은 위치 정밀도와 강성을 지니는 C7급의 TM 이송나사와 니트로 구성하였다. 타이밍 벨트의 특징으로는 체인이나 기어구동에 비교해서 소음이 적고, 중량이 가벼우며, 작은 지름을 가진 폴리드 사용이 가능하기 때문에 좁은 공간에서도 사용할 수 있다는 장점이 있다. 그리고 프레임은 구동장치의 형상과 중량 및 강도를 고려하여 알루미늄 프레임(Aluminum frame)으로 구성하였고 용이한 조립을 위하여 프레임 연결은 볼트로 체결하였다. 구동원으로는 X, Y, Z축 모두 금성사의 DC 서보 모터 FMD 시리즈를 사용하였으며, X축과 Y축은 서보모터의 감속과 토크의 증대를 위하여 로봇의 선회부나 어깨부, 팔 부분에 가장 많이 사용되는 일본 KOMO사의 SH형의 콤포넌트 R 시리즈 하모닉드라이브 감속기(Harmonic Drive Reducer)를 사용하였다. Z축은 TM 이송나사에 모터축을 연결하기 위하여 일본 NBK사의 MST(Miniature Slit Type Flexible Coupling)시리즈를 사용하였다. 본 연구에서 설계, 제작된 직교 좌표 로봇은 4000 x 2000 x 1000 mm의 작업 공간을 가진다.

이 작업 공간을 벗어 날려고 하거나 각 축의 절대 원점 위치를 확인 하고자 할때, 각 축의 양단에 위치한 리미트 센서(Limit Sensor)는 인터럽트를 발생하여 위의 정보를 알려주게 된다. 리미트 센서는 작업공간의 시작 부분에 두개씩 있고, 끝부분에 한개씩, 총 9개가 있다. 본 연구에서 리미트 센서는 금성기전의 고주파 발전형 근접센서인 ZVF - S30 - 10 DNO를 사용하여 구성하였다.

4. 실험 및 고찰

설계, 제작한 직교좌표 로봇의 반복위치결정도와 최대동작속도를 측정하기 위하여 측정장비는 5mw 헬륨네온 레이저를 이용 하였다. Fig.5 와 같이 실험 장치를 구성하여 직교좌표 로봇의 특성 실험을 하였다.

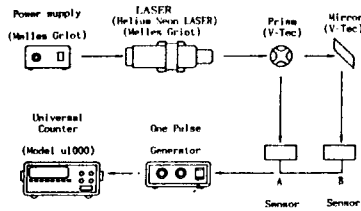


Fig.5 Schematic diagram of speed of measurement system

속도측정 방법은 LASER beam이 prism을 통과하여 들로 나누어져 하나의 beam은 A sensor로 주사되고 다른 하나는 mirror에 반사되어 B sensor로 주사된다. 로봇의 바디 부분이 주사된 두 beam을 지나쳐감에 따라 universal counter에서 두 지점 통과시간을 측정하게 된다. 실험에서 얻어진 시간을 두 빔사이의 거리로 나누어서 속도를 구한다.

반복 위치결정정도 실험은 일정한 거리와 횟수를 어셈블리 언어를 이용하여 프로그램으로 작성한 후 작성된 프로그램에 의해 거리와 횟수를 반복하면서 오차를 측정하였다.

직교좌표 로봇의 반복 위치결정정도 실험은 1000mm 구간에서 X축이나 Y축을 Z축을 반복적으로 이동하여 실험하였고 실험속도의 조절은 프로그램상에서 딜레이 루틴을 작성하여 실시하였다. 본 논문에서는 X, Y축, Z축을 반복적으로 실험한 속도 중에서 6가지 속도 구간에 대한 평균 오차값을 mm단위로 Table.2와 Table.3, Table.4에 나타내었다. 반복 위치결정정도 실험속도는 여러가지 속도에서 실시하였고 저속인 경우에 오차는 별차이가 나지 않았으나 직교좌표 로봇의 속도가 증가할수록 오차의 정도가 높아짐을 알 수 있으므로 작업의 종류에 따라서 작업수행 속도를 조절 할 수 있도록 하여야 한다.

Table.2 X 축 반복위치결정오차

(단위: μm)

반복 횟수 \ 속도 (m/min)	5	10	15	20	25	30
100	1	1	2	3	5	7
200	1	1	3	5	6	11
400	1	2	5	7	10	16
800	2	3	7	10	15	28

Table.3 Y 축 반복위치결정오차

(단위: μm)

반복 횟수 \ 속도 (m/min)	5	10	15	20	25	30
100	1	1	1	2	3	3
200	1	1	2	2	4	5
400	1	2	2	3	7	10
800	1	2	3	5	9	14

Table.4 Z 축 반복위치결정오차

(단위: μm)

반복 횟수 \ 속도 (m/min)	5	10	15	19
100	1	1	2	3
200	1	1	3	5
400	1	1	5	7
800	1	1	7	10

5. 결 론

지금까지 직교 3자유도 위치결정용 로봇 설계 및 제어에 관한 연구에서 로봇의 특성을 알기위하여 반복위치결정정도시험을 실시하였는데 측정된 결과로는 약 100회 정도의 동작 후 원점 보정을 하면 $\pm 0.005\text{mm}$ 의 우수한 반복위치 정밀도를 얻을 수 있었으며, 설계 제작한 직교좌표 로봇과 IBM-PC를 이용한 제어프로그램, 인터페이스 회로의 유효성을 입증하였다.

참고문헌

1. Groover M.P., Automation, Production Systems & Computer Integrated Manufacturing, Prentice Hall International, 1987
2. Robert E. Young, Software Control Strategies For Use in Implementing Flexible Manufacturing Systems, Industrial Engineering, 1981.
3. Hiroyasu, Fanakubo, Actuators For Control, Gordon and Breach Science Publish, PP.148-158, 1991
4. Martin, Clifford, Morden Electric / Electronic Motors, Prentice Hall International, PP.70-114 1990
5. richard C. Dorf, Mordon control System Addison-wesley, 1991
6. Katsuhiko Ogata, Mordon control engineering, Prentice Hall International, 1993
7. 이재진 역, 마이크로 소프트웨어 매크로 어셈블러 바이블, 인포북, 1993
8. Analoge Devices, Integrated Circuits Data Book Vol 1 Analog Devices Corporation, 1984