

直接驅動 方式의 SCARA 型 로봇의 開發에 關하여

李 寬 南

韓國産業安全工團 産業安全保健研究院 機械電氣研究室

On the Development of a Direct-Drive SCARA Robot

Gwan-Hyung Lee

Industrial Safety and Health Research Institute, Korea Industrial Safety Corporation

Abstract: Direct-drive SCARA-type industrial robots are increasingly used in the assembly process of small mechanical parts as well as electronic components, which uses direct-drive (DD) motors instead of reduction gear-type conventional motors for the actuators of manipulator arms. There are many advantages in using DD motors for robots, such as no backlash, low friction, high mechanical stiffness, capability for fast and precise arm control, and high repeatability of positioning. However, there exist a number of difficulties which must be overcome to ensure proper construction and operation: increasing effects of load variation and nonlinear and coupling dynamics, severe vibration caused by resonance of the manipulator components and low mechanical damping, etc. In order to handle these difficulties, lots of efforts have been made such as reduction of the arm inertia and elimination of the resonance. Performance evaluation of a recently developed, domestic DD robot shows that it works excellently compared with conventional robots. It, however, requires proved reliability and price competitiveness against its foreign counterparts.

I. 서론

최근 無人工場 내지는 工場自動化 (Factory Automation)의 확산에 따라 산업용 로봇 특히 조립용 로봇의 수요가 증가하고 있다. 이러한 추세에 부응하여 국내에서도 그간 산업용 로봇에 대한 연구 개발이 진행되어 1970년대말 KAIST에서 원통좌표형 로봇을 개발한 이래 DC 또는 AC Servo Motor를 이용한 감속기 (Reduction Gear; RG) 방식의 로봇이 다수 개발되어 상품화 생산 단계에까지 이르렀다 (금성산전, 삼성항공, 삼성전자 등). 그러나 이러한 RG-type 재래식 로봇은 제어하기가 비교적 쉽고 기존의 Servo Motor를 그대로 사용할 수 있어 제작비가 적게 드는 장점은 있으나 감속기의 Backlash 등으로 인한 Dead Zone의 존재로 정밀 제어가 어렵고, 마모에 의한 기계적 수명의 단축, 補修의 어려움, 속도성의 저하 등 많은 단점을 갖고 있다. 이러한 단점들을 극복하여 고속성과 정밀성을 높이기 위한 방법으로 최근 직접구동 (Direct Drive; DD) 방식의 로봇이 도입되고 있는바, 미국에서는 이미 1984년에 Adept사에 의하여 SCARA 형인 AdeptOne이 상품화되어 그 시장 점유율이 급속히 증가하여 왔다. 일본에서는 Hirata, Fanuc, Seiko-Epson 등에서 개발하여 일부 상품화 판매를 시작한 상태에 있다. 국내에서는 금성 산전에서 1989년 9월 DD Robot의 개발을 발표한 바 있고, 삼성종합기술원에서도 일찍이 DD 로봇의 연구 개발을 추진하여 Prototype-1 및 2의 설계 제작 및 성능 평가를 완료하여 삼성항공을 통하여 상품화를 추진하고 있다.

DD 방식은 감속기가 갖는 제반 단점을 제거함으로써 고정도와 및 고속 동작 제어가 가능하다. 그러나 DD 방식에서는 메카니즘의 고강성화가 필요하며 고속운전의 실현을 위해 로봇 Arm 관성 (Inertia)의 저감 및 순간 간섭의 대응 대책이 요구된다. Inertia의 저감을 위해서는 Arm과 Quill부의 경량화 설계에 노력하여야 하며 순간 간섭을 최소화하기 위해서는 모모르 제어 등의 진압보완 제어 기법의 개발 및 적용이 요구된다.

Controller Hardware는 삼성 Prototype-1의 경우 3개의 CPU를 주축으로 하며 각 축의 위치를 Count하는 Position Board 및 각 축 Motor의 Driver로 구성되어 있다. 3개의 CPU는 각각 메인 (Main) 및 로봇 언어 처리부, 點對點路 (Point-To-Point; PTP) 및 連續路 (Continuous Path; CP) 등의 동작을 제어하는 軌跡計劃 (Trajectory Planning; TP) 部, 각 축의 Motor를 제어하는 Servo 制御部로 나뉘어진다. 이외에 주변장치로는 2개의 Terminal과 1개의 敎示機 (Teach Pendant)가 부착될 수 있도록 하였다.

II. DD 로봇의 Body, 운동학 및 동력학

1. 설계 개요

DD 로봇의 장점을 최대한 살리기 위해서는 매니플레이터 Body의 剛性 증대, 감속기 등으로 인한 동력전달 기구의 마찰 제거, 경량화 및 가공 조립 정도에 관련된 치수 오차의 최소화를 중점적으로 고려하여 설계하여야 한다. 설계과정은 크게 개념설계, 기본설계 및 상세 설계로 나누어 실시된다. 먼저 개념 설계에서는 소요 기능, 성능 및 기본 사양을 설정하고, 기본 설계에서는 Motor, 기구 요소 및 결합 방법을 선택하며, 상세 설계에서는 Body 기구도, 기구 요소 및 부품도를 작성한 후 동력학적 해석을 통하여 Motor의 용량을 결정하고 전체 조립도를 작성한다. 이러한 과정을 통하여 전수 검사에 의해 불량을 제거하여야 한다. 조립시는 조립용 치구와 인디케이터 등 측정기구를 사용하여 조립 정도를 제한하고, 조립후 구동 실험 및 성능 실험에 의해 Belt 張力 등 조정이 필요한 부위를 수정한다. 또한 기계 공진이 심할 경우 이의 억제에 대한 대책을 강구하여 필요한 보완 조치를 해야 하며 진동흡수성이 좋은 특수 Rubber를 이용한 Mechanical Damper의 설치도 한 방법이다. 대표적인 4축 수평좌표관절용 (SCARA) 로봇 Body의 외형도는 그림 1과 같다.

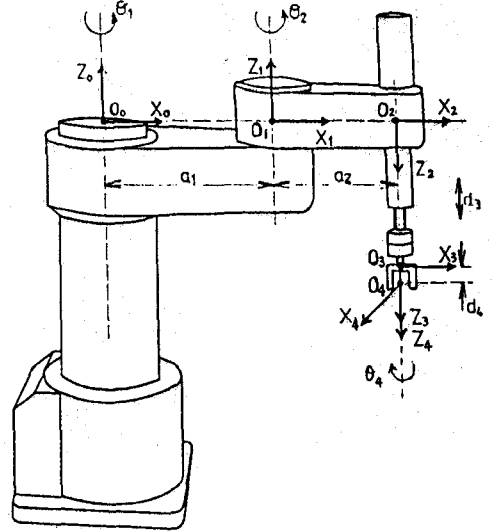


그림 1. 매니플레이터 외형도 및 좌표계 설정

2. 매니플레이터 Body

가. 기본 사양

강성증대를 위해 Body에 사용된 모든 주요 부품은 주물로 되어 있으며 대개의 경우 One-Piece 구조로 설계한다. 또한 이들 요소의 대부분은 질량과 관성 모멘트를 최소화하기 위하여 대개 알루미늄으로 제작하며 요즘은 신 복합재료를 이용한 고강성 경량 Arm의 제작이 시도되고 있다. Quill부는 2축 (상하운동) 및 0축 (회전운동)의 구동이 한개의 Hollowing Screw에 의하여 이루어지도록 설계한다. 사용 Motor의 선정은 보통 고속 특성과 직접 관련이 있는 1축, 2축 및 3축의 경우는 DD Motor를 사용하고 고속 특성에 영

량이 적은 4축의 경우는 경제성을 고려하여 DC Motors를 사용한다. 그리고 Gripper 구동용 공압류브와 동력을 바꾼 Base로부터 Arm 내부로 처리하여 완전히 밀폐되도록 하는 것이 이관식 깨끗하다.

나. Motor Lay-Out

로봇 Arm의 구동에 있어서 DD 방식을 채용할 때 Motor를 어디에 배치하는가가 큰 문제가 되고 있다. 각 관절에 직접 Motor를 배치하는 방법, 관성을 감소시키기 위하여 제1축에 Motor를 집중 배치하고 Belt로 구동하도록 하는 방법 등 여러가지 방법을 고려할 수 있는데 제각기 장단점을 가지고 있다. Body 설계에서는 선형인 1축, 2축, 3축 및 4축의 Motor 질량 및 치수 사양으로부터 어떤 Lay-Out이 적합한지 각각의 경우에 대해 장단점을 충분히 검토 분석한 후 결정한다. 한 예로 1축 및 2축 Motor는 Motor 중량에 의한 관성모멘트 영향을 감소시키기 위하여 Base 및 Joint 1의 상단부에 배치하고, 3축 및 4축 Motor는 Joint 2에 배치함으로써 관성력 및 Arm의 상호 간섭력을 최대한 억제할 수 있다.

3. SCARA 로봇 운동학 (Kinematics)

Joint 축과 좌표계 (Coordinate System)는 그림 1에서와 같이 설정하였다. 모든 Joint 축이 평행하므로 각 좌표계의 원점은 Joint 축상의 임의의 장소에 설정할 수 있으나, 편의상 Basis 및 제 1, 2 좌표계의 원점은 동일한 높이에 있도록 하였다. 그림 1의 SCARA 로봇의 Link 및 Joint Parameter는 다음과 같이 구해질 수 있다.

표 1. SAIT-1 SCARA 로봇의 D-H Link Parameters

Link #	a _l	α _l	d _l	θ _l
1	a ₁	0	0	θ ₁
2	a ₂	180°	0	θ ₂
3	0	0	d ₃	0
4	0	0	d ₄	θ ₄

이웃한 Link간의 좌표계 변환 행렬식 (Homogeneous Coordinate Transformation Matrix; HTM)은 다음과 같이 구해진다[9].

$$A_i = \text{Trans}(Z_{i-1}, d_i) \text{Rot}(Z_{i-1}, \theta_i) \text{Trans}(X_i, a_i) \text{Rot}(X_i, \alpha_i)$$

$$= \begin{pmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 C\alpha_1 & S\theta_1 S\alpha_1 & a_1 C\theta_1 \\ S\theta_1 & C\theta_1 C\alpha_1 & C\theta_1 S\alpha_1 & a_1 S\theta_1 \\ 0 & S\alpha_1 & C\alpha_1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

윗식에 표 1의 D-H Parameter들을 대입하면 다음과 같은 이웃 좌표계간의 HTM을 구할 수 있다.

$$A_1 = \begin{pmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & a_1 C_1 \\ S_1 & C_1 & 0 & a_1 S_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad A_2 = \begin{pmatrix} C_2 & S_2 & 0 & a_2 C_2 \\ S_2 & -C_2 & 0 & a_2 S_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad A_4 = \begin{pmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & 0 \\ S_4 & C_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

따라서 End-Effector의 위치와 방향을 World 좌표계로 나타내는 Direct (Forward) Kinematics 식은 다음과 같이 구해진다.

$$T_4 = A_1 A_2 A_3 A_4 = \begin{pmatrix} C_1 C_2 C_4 + S_1 S_2 S_4 & -C_1 C_2 S_4 + S_1 S_2 C_4 & 0 & a_2 C_1 C_2 + a_1 C_1 \\ S_1 C_2 C_4 - C_1 S_2 S_4 & -S_1 C_2 S_4 + C_1 S_2 C_4 & 0 & a_2 S_1 C_2 + a_1 S_1 \\ 0 & 0 & -1 & -(d_3 + d_4) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

4. SCARA 로봇의 동역학 (Dynamics)

기본 설계에서 작성된 기구 요소들을 이용하여 각부의 질량과 무게중심 거리 등 Parameter 값들을 계산하고, 기구부의 동역학적

해석을 위한 수학적 Modelling을 유도한다. 1, 2축에 대한 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta})$$

여기서 $\tau = (\tau_1, \tau_2)^T$, $\theta = (\theta_1, \theta_2)^T$.

$$M(\theta) = \begin{pmatrix} M_{11}(\theta) & M_{12}(\theta) \\ M_{21}(\theta) & M_{22}(\theta) \end{pmatrix}, \quad V(\theta, \dot{\theta}) = \begin{pmatrix} V_1(\theta, \dot{\theta}) \\ V_2(\theta, \dot{\theta}) \end{pmatrix}$$

의 형태로서, τ 는 1, 2축의 구동 Torque를 나타내는 Vector, θ 는 1, 2축의 회전위치를 나타내는 변수 Vector이며, M 은 Inertia Matrix, 그리고 V 는 원심력 및 Coriolis Force 등에 의해 발생되는 비선형항을 나타내는 Vector이다. M 과 V 의 구성요소는 각각 다음과 같다.

$$M_{11}(\theta) = I_{c1} + m_1 x_{c1}^2 + I_{c2} + m_2 (x_{c2}^2 + l_1^2 + 2l_1 x_{c2} \cos \theta_2) + m_3 (l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2)$$

$$M_{12}(\theta) = I_{c2} + m_2 (x_{c2}^2 + l_1 x_{c2} \cos \theta_2) + m_3 l_2 (l_2 + l_1 \cos \theta_2)$$

$$M_{21}(\theta) = M_{12}(\theta)$$

$$M_{22}(\theta) = I_{c2} + m_2 x_{c2}^2 + m_3 l_2^2$$

$$V_1(\theta, \dot{\theta}) = -l_1 S \theta_2 (m_2 x_{c2} + m_3 l_2) \dot{\theta}_2^2 + 2l_1 S \theta_2 (m_2 x_{c2} + m_3 l_2) + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2$$

$$V_2(\theta, \dot{\theta}) = (m_2 l_1 x_{c2} S \theta_2 + m_3 l_1 l_2 S \theta_2) \dot{\theta}_1^2$$

3축 구동은 Ball Spline과 일체화된 Ball Screw에 의하여 동력이 전달되고 있는데 3축 Motor를 구동하는데 필요한 Torque는 다음 식에 의해 구해진다.

$$\tau_3 = \{ I_3 + (\frac{p}{2\pi})^2 m_3 \} \ddot{\theta}_3 + \frac{m_3 p}{2\pi} g$$

여기서 τ_3 는 3축 Motor의 구동 Torque, I_3 는 Ball Screw Nut의 Moment of Inertia, m_3 는 상하 운동부의 질량, p 는 Ball Screw의 Pitch, g 는 중력 가속도.

4축의 구동은 Ball Screw와 Ball Spline에 의하여 동력이 전달되는데, 4축 Motor를 구동하는데 필요한 Torque는 다음 식으로 구해진다.

$$\tau_4 = I_4 \ddot{\theta}_4$$

여기서 τ_4 는 4축 Motor의 구동 Torque, I_4 는 4축 Motor에 걸리는 모든 회전 부위의 Moment of Inertia.

III. DD 로봇 制御機 (Controller)

1. 개요

DD 로봇을 구동하는 특정 Controller를 중요한 Block만 표시하면 그림 2와 같다. 여기서는 모두 3 개의 CPU를 사용하고 있는데 이 CPU들은 16 Bits 인 M68000이다.

Language Processor는 로봇의 Supervisor 기능과 함께 작업자가 사용할 수 있는 로봇 언어 기능을 제공한다. 로봇 언어는 Interpreter식으로 되어 있으며 문장의 편집은 일반 BASIC 언어와 같이 출현어를 이용하여 이루어진다. 로봇 언어는 일반 언어가 가지고 있는 기능외에도 로봇을 동작시키기 위한 명령어를 가지고 있으며 Software System도 일반 언어와는 달리 언어처리부와 내부 시스템처리부로 분리되어 있으며 이 두개의 Software가 시분할 병렬 처리를 행하여 동시에 수행된다. 작업 프로그램의 수행시에 로봇 동작에 관한 명령은 동작에 필요한 Parameter와 함께 Trajectory Planning (TP) Processor로 넘겨 로봇이 동작하도록 한다. System Processor는 로봇 언어 처리부와 병렬로 동작하는 Software로 로봇 언어 처리부에 사용되는 Timer 기능외에도 로봇의 자기진단 기능, I/O 상태의 계속적인 Check, 시분할 병렬 처리를 위한 기능 등을 가지고 있다. 각각의 Software는 10 ms 마다 수행되며 로봇의 상태 변화 및 각종 자기진단 시에 발생하는 Error를 로봇 언어처리부로 넘겨 로봇의 동작을 멈추게 하거나 작업자에게 Message를 보내는 등의 역할을 한다.

TP Processor는 로봇의 Trajectory Planning을 위한 Software 시스템이며 여기에서 로봇의 동작을 위한 로봇 Arm의 이동 경로,

속도, 가감속도 등의 연산처리가 이루어진다. 즉 로봇의 PTP, CP와 직선 및 원호 보간이 실행된다. 여기에서 연산된 결과는 Servo Processor로 넘겨진다.

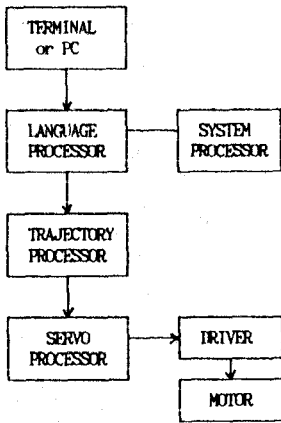


그림 2 Controller 구성도

Servo Processor는 TP Processor에서 넘어온 Data를 가지고 위치 및 속도 제어 등을 통하여 각 축을 구동하기 위한 Processor이다. TP에서는 로봇의 진동을 없애기 위해 좀더 빠른 Sampling Time (2 ms)을 갖고 모터를 구동한다. 즉, 여기서는 TP의 연산 결과를 Interpolation하여 2 ms 마다의 값으로 바꾸어 로봇을 구동한다.

2. 로봇 언어 (Robot Language)

표 2 로봇 언어 (SAITEL) 명령어 종류

기능 항목	명령어 및 설명
프로그램 수행	RUN, STEP, CONT, CLEAR
프로그램 제어	GOTO, GOSUB, RETURN, NEXT, END, STOP
프로그램 편집	EDIT, PRINT, NEW, LIST, RENUM, DELET
File 관리	MLOAD, MSAVE, MDEL, MREN, MDIR, MNEW
위치 Data 관리	PLoad, PSAVE, PDEL, PREN, PRECOVER
I/O 제어	ON, OFF, OPEN, CLOSE, STAT, IN, PULSE
DATA 입출력	PRINT, GET, INPUT, PENDANT, TAB
연산 함수	ARS, SIN, COS, TAN, ASIN, ACOS, SQRT ATAN, ATAN2, INT, LN, LOG
연산자	+, -, *, /, AND, OR, NOT, BAND, BOR <, <=, >, =, <, >, BNOT
아암 동작	MOVE, MOVES, MOVEC, APPRO, APPROX DRIVE, HOME, DEPART, DEPARTS
동작 Parameter 지정	SPEED, ACCEL, DECEL, FINE, COARSE LEFTY, RIGHTY, CP ON/OFF, SPEEDS
위치 지정	HERE, POS(n), PX, PY, PZ, PS, PLIST
좌표 변환	FRAME, BASE, TOOL, INVERSE, SHIFT SCALE, RX, RY, RZ
기타	CLS, WHERE, ASC(), CHR\$(), DELAY, DIM SET, TIME, TON, TOFF, LET, LOCATE

로봇 언어의 일례로서, 국내에서 개발된 언어인 SAITEL은 BASIC과 유사한 형태로 되어 있으며 Terminal 혹은 PC를 통하여 로봇 구동이나 주변장치 제어에 관련된 명령을 작업자가 직접 지령하거나 프로그램을 작성하여 실행시킬 수 있다. 로봇 좌표값은 교시

할 때 혹은 직접 프로그램 작성시에 X, Y, Z, θ 값으로 지정할 수 있다. 로봇 언어의 일종인 SAITEL의 명령어 종류는 표 2에 나타나 있으며 그 특징은 다음과 같다.

- (가) 명령의 수행은 Interpreter 방식을 채택하고 있으며 프로그램이 BASIC 형태의 대화형 언어로서 사용자가 배우기 쉽다.
- (나) 내부 Memory에 여러 개의 작업 프로그램을 동시에 저장할 수 있으며, RAM Board를 갖고 있어 작업 프로그램과 위치 Data를 따로 저장할 수 있다.
- (다) 직접 명령 수행시의 사용 명령과 Program 수행시의 사용 명령이 분리되어 있지 않아서 작업 프로그램의 편집과 수행에 관계없이 사용 방법이 동일하다.
- (라) FINE, COARSE 명령에 의해 로봇의 위치 제어 정도를 변경하여 고정도의 위치제어가 필요하지 않을 경우에 Cycle Time을 줄일 수 있다.
- (마) 자체에 시분할 병렬수행의 모니터 기능을 갖고 있어 로봇의 동작시에 동작 상태의 관찰, 제어 Parameter값의 판단, ERROR의 처리 등을 로봇을 정지시키지 않고도 모니터를 통해 할 수 있어서 작업 프로그램의 Debugging을 쉽게 할 수 있다.
- (바) 직선 보간 및 원호 보간 이외에도 수식에 의해 표현될 수 있는 복잡한 형태의 동작을 연산함으로써 지정하여 로봇을 움직일 수 있다.

2. 궤적 계획 (Trajectory Planning)

Trajectory Planning은 로봇 Arm의 운동 형태와 가감속 등을 결정하는 Software이다. 운동의 형태는 PTP, 직선 보간, 원호 보간 및 경유점을 고려한 좌표간의 CP 제어가 가능하도록 되어 있다. 그림 3은 구현된 TP 시스템의 개요도이다.

DD 로봇을 고속으로 정확하게 움직이기 위해서는 가감속을 위시한 속도 패턴이 매우 중요하다. 로봇의 구동시에 부하 Inertia의 영향을 줄이기 위해 Motor가 낼 수 있는 최대 토크 이내에서 가감속이 이루어지도록 하고 구동 위치에 따라 가감속의 기울기도 조정되어야 한다. 특히 CP에 있어서는 Singular Point 주변에서의 움직임은 급격한 Joint의 속도 변화가 요구되는 경우가 많으므로 이에 대한 조치가 필요하다. TP에서는 이를 위해 다양한 속도 패턴을 갖게 하고 (사다리꼴, Bell Type, Sine Curve, 4차 Polynomial 등). Software적으로 가감속을 변화시킬 수 있도록 하였다.

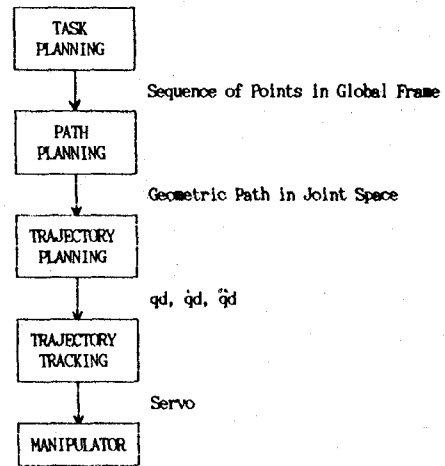


그림 3. Trajectory Planning 개요도

3. DD 모터와 로봇 제어

DD 모터를 로봇 구동원으로 사용하는 때에는 감속기가 갖는 제반 단점을 해결하는 면에서는 유리하나 제어상에는 여러가지의 난제가 대두된다. 제어상의 난점은 다음과 같다.

가. 감쇄특성 (Damping Characteristics)

Direct Drive 시스템에서는 거의 감쇄 (Damping)가 없으며 이것은 제어 시스템 설계에 어려운 문제를 야기시킨다. 기계적인 감쇄는 Joint Shaft를 지지하는 Bearing에서만 발생된다. 기계적인 감쇄 계수에 대한 관심부하의 비에 의하여 결정되는 기계적인 시정수는 RG 구동 시스템에 비하여 과도하게 크다. 구동 모터에 부가된

전압은 모터의 회전수에 비례하는 역기전력에 의하여 감소되기 때문에 역기전력은 Damping의 효과를 가진다. 이와 같은 전자, 기계적인 감쇠 효과는 시스템 응답을 안정화시키는데 필요한 Damping의 양보다 훨씬 작다. 이에 따라 제어 시스템에서 Damping을 증가시킬 필요가 있다.

속도 Feedback 보상은 감쇠 특성을 직접적으로 개선시키는 방법이다. 예를 들면 직류 모터 모터에서는 $K_v/K_t/R$ (K_v = 속도 Feedback Gain, K_t = Motor Torque 상수, R = Winding의 저항) 만큼 감쇄 계수가 증가하므로 K_v 를 상당히 큰 값으로 정할 필요가 있음을 알 수 있다. 이와 같이 큰 속도 Feedback Gain을 사용하려면 Noise가 작은 정밀한 속도 측정이 필요하다. 이를 위해 흔히 F/V Converter나 Tachometer를 사용한다.

나. 서보 강성 (Servo Stiffness)

로봇의 Arm은 특히 팔 끝에서 여러가지 외력을 받는다. 위치 제어에서는 외력에 대하여 로봇은 지령받은 위치를 유지해야 한다. 정적 외력에 대하여는 능력은 종종 Endpoint Stiffness라는 용어로 평가된다.

Endpoint Stiffness는 Arm의 기구적인 구조뿐만 아니라 각 관절의 Servo 매카니즘의 Feedback Loop Gain에 의하여 결정된다. 감속기를 사용하는 로봇에서는 감속기에 의하여 모터의 출력 토크가 증폭되며, Loop Gain은 감속비와 더불어 증가된다. 그러나 DD 로봇은 이와 같은 감속기의 이점을 이용할 수 없다. 즉, 모터의 출력 토크를 기계적으로 증폭시킬 방법이 없다. 그 결과 DD 로봇은 Loop Gain의 결손을 보충하기 위해 Controller의 Gain을 높일 필요가 있지만, 이러한 점은 Drive 시스템의 안정성이다. 본 연구에서는 제어 Loop의 모델링과 Simulation 그리고 여러가지 실험을 통하여 제어 시스템의 안정성을 유지하면서 Servo Gain을 높이는 데 주력하였다.

다. 모터 인덕턴스 (Inductance)

로봇에 사용하기 위한 DD 모터는 일반적으로 최대 출력 토크 크를 기준으로 설계되어 있다. 기구적인 감속기를 배제시키기 위하여 출력 토크는 모터 설계에서 가장 중요한 사항이다. 그러나, 이것을 위해서는 큰 권선을 필요로 하게 되며 따라서 상당히 큰 Inductance를 가지게 된다. 모터의 전기적 시정수는 큰 Inductance를 가지는 DD 모터에서는 아주 크게 된다. 시정수가 클 때는 안정성에 문제를 일으킬 수도 있다. 이러한 Inductance의 영향을 줄이고 제어 시스템의 안정성을 위해 모터 전류의 Feedback Gain을 크게 하였다.

라. 로봇 Arm Dynamics

로봇의 Arm에 감속기가 부착되어 있을 때에는 복잡한 Arm의 동역학은 감속기에 의하여 약화되어 모터로 전달된다. N 을 특정 관절의 감속비라고 하면, 해당 모터의 토크 방정식은 다음과 같이 나타내진다.

$$\tau = (J_m + \frac{J_l}{N^2}) \ddot{\theta} + \frac{V(\theta, \dot{\theta})}{N} + \frac{G(\theta)}{N}$$

여기서 τ 는 Motor에서 발생하는 Torque이고, $V(\theta, \dot{\theta})$ 는 원심력과 Coriolis Force를 포함하는 비선형 Torque 항, $G(\theta)$ 는 중력에 의한 Torque로서 V 와 G 는 감속비만큼 약화되어서 모터에 전달된다. 그리고 Load Inertia J_l 은 감속비의 제곱에 반비례하므로 감속비 N 이 충분히 클 경우에는 변화하는 Arm의 관성은 무시해도 상관이 없다. 그러나 DD Arm은 감속비가 1이기 때문에 감속기가 부착된 로봇에 비하여 매우 불리하다. 복잡하게 변화하는 Arm의 Inertia는 모터의 축에 직접 전달되고 Coupling 토크와 비선형 토크 등도 그대로 반영된다. DD 로봇의 경우 이의 영향은 제어 시스템을 설계하고 운용하는데 있어서 커다란 어려움을 야기시킨다. 이의 해결을 위해서는 직접 매 순간마다 Motor의 Torque를 계산하여 Servo에 출력하는 것이 바람직하나 (Torque Control), Real Time 구현에 어려움이 많으므로 Arm의 Dynamics 해석을 통하여 각 Motor의 최대 허용 Torque 이내에서 설정된 속도 패턴에 따라 Servo에 지령치를 주는 방법을 택하고 아울러 적절한 Control 방법과 Gain을 Servo 시스템에서 조정하도록 하였다.

마. 기계공진

DD 모터는 감속기가 없이 부하를 구동할 수 있기 때문에 고속, 고정도이며 구조가 간단하다는 장점이 있으나 직접 부하에 걸 속되기 때문에 부하의 기계 공진 특성이 속도 제어 Loop 내에 입력

이 되어 속도 제어기가 불안하게 된다. 이러한 기계 공진을 해결하기 위해서는 기구부가 고강성으로 설계되어 제어 Loop의 주파수 영역 밖에서 기구부의 고유 진동 주파수가 형성되도록 하여야 하며 이와 병행하여 Mechanical Damper를 설치하거나 Servo계에서 전기적인 Filter 등을 이용하는 방법으로 공진 주파수를 억제해야 할 필요가 있다.

IV. 성능 Test 및 결론

1. 성능 Test

일반적으로, 규정화된 로봇 성능 평가에 대한 방법 및 기준이 없어 전반적인 성능 평가의 실사가 어려워 간이적이고 개략적인 평가만을 실시하였다. 구체적인 평가 방법은 생각하고 국내에서 개발된 DD 로봇의 주요 성능 평가 결과와 만들 요약하면 다음과 같다. 1속 Motor는 1,024,000 Pulse/Rev, 2속 Motor는 655,360 Pulse/Rev의 고분해능 Encoder를 채용함으로써 반복정밀도 (Repeatability) 측정 결과 $\pm 5 \mu m$ 으로 고정밀도가 달성되고 있으며 (미국 Adept사의 AdeptOne; $\pm 25 \mu m$, 제타식 RG Robot; $\pm 50 \mu m$ 이상), 또한 25mm 수직상행 \rightarrow 300 mm 수평이동 \rightarrow 25 mm 수직하행의 경로를 1회 반복하는데 걸리는 Cycle Time은 측정 결과 0.9 초로 매우 짧은 것으로 나타났다 (AdeptOne: 1 초, RG Robot: 2 ~ 3 초), 최대 선속도의 경우는 Prototype-1의 Arm입이 차이로 AdeptOne의 9 m/sec에 비해 다소 낮은 7.1 m/sec로 측정되었으나 다른 DD 로봇 (6.5 m/sec 이하)이나 RG 로봇 (3.5 m/sec 이하)에 비하여는 우수하다. 전반적으로 로봇의 생산성에 관련된 Cycle Time 및 반복정밀도를 비교할 경우 제타식 RG로봇은 물론 지금까지 개발된 여타 DD 로봇에 비하여도 우수한 성능을 갖는 것으로 평가됐다.

2. 결론

감속기를 이용한 종래의 로봇에 비하여 속도성과 정밀성이 월등한 우수한 DD 로봇의 개발은 제조산업의 생산성 향상을 위한 공장 자동화에 대하여 더욱 큰 기여를 할 것으로 기대된다. 국내에서도 로봇 Body, Controller부의 Servo Hardware와 Software, 로봇 언어 및 Trajectory Planning 등을 자체적으로 개발 또는 설계 제작하여 그 성능을 입증하였다. 또한 DD 로봇에서 가장 문제가 되고 있는 기계 공진에 대하여는 독자적인 실험과 분석을 실시하였고 그 결과 또 전기적인 Filter 및 Mechanical Damper를 설치하여 문제점을 해결함으로써 자체 기술 확보는 물론 향후 고성능 로봇을 개발하는데 도움이 될 것으로 생각된다.

남은 과제로는 로봇 Arm의 진동을 완전히 제거하고 현장 사용에 지장이 없도록 신뢰성을 향상시키는 일이다. 아울러, 제어 방법도 Computed Torque 방식 등을 채용하여 實時間 (Real-Time) 제어가 가능토록 함으로써 부하 변동이나 각종 외란에 대하여 Robust하고 안정된 제어를 실현시키는 일이다. 마지막으로, DD Motor 및 Driver, Ball Screw 등 핵심 부품을 외국으로부터 수입에 의존하고 있어 기술 개발에 장애가 되고 있을 뿐만 아니라 상품화 시 가격 상승의 커다란 요인이 되고 있는바 이들의 국산화 개발이 조속히 이루어져야 할 것이다.

< 참고 문헌 >

- [1] 藤野正春, "DD Robot SSR-H604DM", 省力和自動化, pp. 48-52, Tokyo, Japan, Feb. 1989.
- [2] M. Asada et al., Direct-Drive Robots: Theory and Practice, Cambridge, MA: MIT Press, 1987.
- [3] K.S. Fu et al., Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence, McGraw-Hill, 1987.
- [4] Kuwahara, "고속화를 위한 저감속비/ 직접 구동의 문제점과 새로운 제어", '87 소형 모터 심포지움 Proc., pp. B5-1-1 - B5-1-7, Tokyo, Japan, 1987.
- [5] P.K. Khosla, Real-Time Control and Identification of Direct-Drive Manipulators, Ph.D. Thesis, Carnegie-Mellon Univ., 1988.
- [6] 中山肇夫, "DD 로봇에서의 위치결정기구와 그의 제어", Mechatronics, pp. 14-17, Tokyo, Japan, 1988.
- [7] 고정도 고속 DD 제어 시스템 개발 보고서, KIMM, 1989.
- [8] 고속 SCARA 로봇 기술 개발 보고서 (I), 삼성종합기술원, 1989.
- [9] 이종신, 이영우, 이관영, "SCARA형 직접 구동 방식 로봇 (SAIT Prototype-I)의 개발에 관한 연구, '90 로보틱스 및 자동화 연구회 Workshop 논문집, pp. 27-31, 1990.