

직접구동식 스카라 로봇의 개발 및 개인용 컴퓨터를 이용한 기초 힘/운동 제어

김 두 형,* 최 동 업,* 최 형 식**

Development of a Direct Drive Scara Robot Manipulator and PC-Based Preliminary Force/Motion Control

D.H. Kim,* D.Y. Choi,* H.S. Choi**

ABSTRACT

In this paper, a direct drive scalar robot manipulator is constructed and its mechanical mechanism for operation is explained. Also, a motion controller board for the direct drive robot manipulator was developed where the IBM 486 computer is the main controller. For the developed direct drive robot, a force/motion control algorithm based on an active compliance scheme is developed. A preliminary experiment using the developed direct drive for a peg-in-hole job was done by implementing the control algorithm.

1. 서 론

현재의 대부분의 산업용 로봇트는 고속 저토크의 서보모터와 이를 감속하고 출력토크를 증대시키기 위한 감속기를 채용한 구조로 되어있다. 감속기를 채용함으로써 서보모터의 제어가 단순하고 전달 동력의 증가 효과가 있지만, 감속기 자체의 마찰이나 기계적 백래쉬 및 조립오차때문에 발생하는 토크의 백동은 제어정밀도를 저하시킨다. 또한 감속기에 의한 로봇트 관절의 기계적 강성 저하는 진동을 유발하여 고속운동을 어렵게 하며, 백래쉬에 의한 위치오차는 로봇트 관절에서 누적되어 선단 정밀도를 저하시키고 있다. 감속기 채용으로

인한 구동관절의 효율저하와 마찰 토크의 발생은 로봇트가 주위 환경과의 접촉에서 발생하는 접촉력의 처리에 장애가 된다.

접촉력은 짧은 시간에 발생하므로 이를 완화 또는 상쇄시키기 위해서는 빠른 토크 응답과 제어가 요구되나, 큰 마찰 토크를 가진 감속기 구조의 로봇트에서는 이의 처리에 어려움이 있다. 따라서 감속기를 사용하지 않고 저속 고토크의 서보 모터에 의하여 직접 로봇트의 각 관절을 구동하는 이른바 D.D. 로봇트(Direct Drive Robot)의 개발이 필요하게 되었다.^(1,2,3,4,5)

이러한 D.D. 로봇트의 장점인 빠른 응답과 제어능력을 이용하면 외부환경과의 접촉시에 발생하는 외력에

* 한국기계연구원

** 한국해양대학교

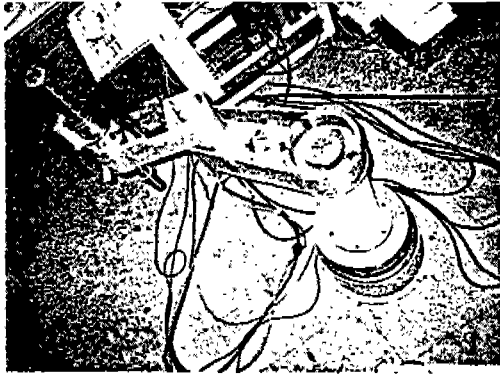


Photo 1 Developed D.D. robot

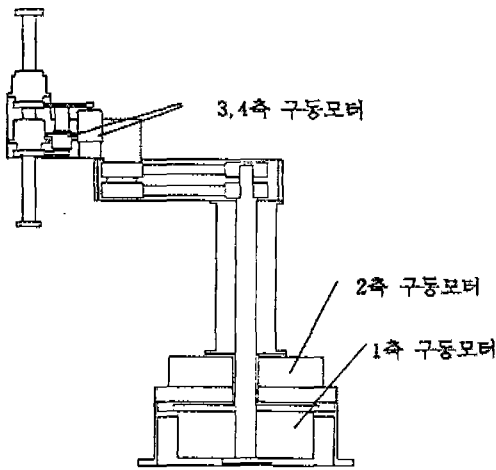


Fig. 1 Schematic diagram of the developed D.D. robot

로봇 선단의 위치를 변화시키는 compliance제어를 적용하기가 용이하다. 이러한 compliance제어는 active 및 passive compliance의 연구^(6,7,8)와 함께 active 및 passive compliance의 장점을 이용한 실제 시스템에의 적용한 연구^(7,9)가 있었다.

본 논문에서는 제작된 D.D. 로봇의 기구부의 제작 및 제어기의 하드웨어를 개발하였고 이에 대한 검토를 하였다. 또한 개발된 D.D. 로봇에 힘/토크 센서를 장착하고 이를 이용한 제어 알고리즘 개발과 이를 이용하여 기초실험을 행하였고 이를 분석하였다.

2. 로봇 기구부 구성

개발된 직접구동식 로봇의 기구부의 구조는 Fig.

Table 1 Specification of the mechanism

자유도	4 축	
가 반 중 량	15 Kg-f	
팔 길 이	1 축	400 mm
	2 축	400 mm
동 작 범 위	1 축	± 150
	2 축	± 150
	3 축	± 180
	4 축	400 mm
분 해 능	1 축	0.0006
	2 축	0.0006
	3 축	0.006
	4 축	0.005
합 성 최 대 속 도	7540 mm/s	

Table 2 Specification of the motors

축번호	규 격	용량(W)	속도(rpm)	토크(Kgf-m)	감속비
1	RS 1410 FN	1500	60	25	1:1
2	RS 1010 FN	900	60	15	1:1
3	TS1983N58E5	30	3000	0.01	1:60
4	SSM 2010	100	1500	0.065	1:4

1의 로봇의 조립도와 Photo. 1에 잘 나타나 있다. 로봇은 수평다관절 형태로 3개의 회전관절과 1개의 미끄럼관절로 이루어져 있다. 1축과 2축의 모터는 로봇의 기저(base)에 위치하며 2축 링크는 스틸벨트를 통하여 토크가 전달된다. 1축과 2축의 구동은 NSK의 직접구동식 모터를 이용하여 로봇 관절을 직접 구동한다. 3축과 상하운동을 하는 2축의 구동은 기계의 구조를 단순화 시키기 위하여 2개의 운동기구를 하나의 유니트에 일체화시킨 볼나사, 스플라인을 통하여 이루어진다. 또한 직접구동식 로봇 각 축에 리미트스위치를 설치하여 기구부의 원점복귀 및 동작범위를 설정하였다. 개발된 직접구동식 수평다관절 로봇 기구부의 제반사양 및 각 축의 구동모터의 사양은 Table 1과 2와 같다.

3. 로봇의 제어기(controller)제작 및 구성

직접구동식 로봇의 제어를 위한 제어기의 구성은 주제어기로서 일반적인 명령 및 로봇의 역기구학과 경로의 연산을 행하는 IBM 개인용 컴퓨터를 이용한 호스트 컴퓨터, 주제어기의 명령을 받아 각 축의 제어를

담당하는 운동제어기(Motion controller), 운동제어기의 명령에 따라 서보모터를 실제적으로 구동시키기 위한 서보모터 드라이버를 포함하는 구동부, 로봇의 구동의 한계위치 입력을 처리하는 연결회로부로 구분되며 이 외에도 서보시스템의 panel, 기타 전원에 사용되는 변환기, magnet relay, 노이즈필터등으로 구성되어 있다.

3.1 제어기 구성

구성요소들은 다음과 같이 이루어져 있고 제어장치의 블록선도는 Fig. 2에 나타나있다.

주제어기 : IBM AT(486 66MHz vesa board)로 소프트웨어의 개발 및 주계산기로서 C언어를 이용하여 로봇트 매니플레이션 프로그램의 편집 및 실행과 각종 시스템의 통제를 담당한다.

운동제어기 : Hewlett Packard사의 HCTL chip을 사용하여 KIMM에서 직접 제작한 제어보드로서 디지털제어방식으로 동시 4축 제어가 가능하며, 12개의 TTL 출력과, 8개의 isolate 입력으로 구성되어 있다. 이 운동제어기는 add on card 형태로 제작되었으며 주제어기로부터 입력 신호를 받아 동작하고 4가지 제어 모드 (position, velocity, integral velocity, trapizoidal control mode)를 지원한다.

축 제어기 및 구동 모터 : 1축과 2축은 NSK의 직접 구동식 모터/드라이버, 3축은 Shinko 서보모터/드라이버, 4축은 Tamagawa 모터/드라이버로 구성되어 있으며 그 규격은 Table 2에 나타나 있다.

연결회로부 : 서보 모터, 파워앰프 및 축 제어기등의 입출력 등을 연결하고, 로봇트의 구동한계를 정하고 구동한계 이상의 운동 및 비상시 서보모터로 들어가는 전

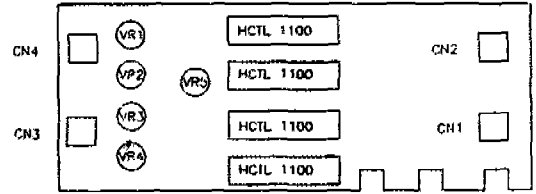


Fig. 3 Schematic diagram of input/output of motion control board

원을 차단하는 등의 전압원을 연결하는 부분이다.

서보 시스템의 Panel구성 : 서보 온/오프 스위치, 비상버튼, 토글스위치등으로 구성되어 있다.

3.2 4축 운동제어기 보드의 입출력 구성

제작된 4축 운동제어기 보드의 전반적인 입출력 구성을 나타내었다. Fig. 3에서 나타난 것같이 각 축의 운동제어 알고리즘을 담당하는 4개의 HCTL1100 chip과 CN3를 통하는 아날로그신호 커넥터, CN1을 통하는 12개의 TTL 출력신호, CN4를 통하는 8개의 TTL 입력신호, CN2를 통하는 리미트, 스톱신호들의 처리단자들로 구성되어 있다. 사용하고 있는 I/O 번지는 IBM 개인용 컴퓨터에서 prototype card 번지로 확보하고 있는 300H-31FH까지이다. CN1은 엔코더와 TTL 출력신호, CN2는 리미트/스톱 신호, CN3는 아날로그 출력신호, CN4는 TTL 입력신호를 받는 커넥터이다. 아날로그 출력전압의 범위는 가변저항 1-4를 조절 하여 가변시킬수 있다. 보다 상세한 것은 참고문헌 [10]에 나타나 있다.

4. 힘/토크 센서 및 그립퍼 시스템의 구성

4축 힘/토크 센서를 설계된 어댑터를 이용하여 개발된 4축 직접구동식 로봇트에 장착하여 힘/토크의 제어를 가능하게 하는 고기능을 갖추었다.

4.1 힘/토크 센서 및 그립퍼의 구성

4축 힘/토크 센서를 로봇트 팔의 선단에 설치하고 그 위에 peg-in-hole 등의 조립작업시 작업물체를 집을 수있는 그립퍼를 부착할 수있는 어댑터를 설계하였고 그립퍼는 공기압으로 온오프 제어하였다. 이 힘/토크 센서를 포함하는 그립퍼 시스템의 구성도는 Photo. 2에 나타나 있다.

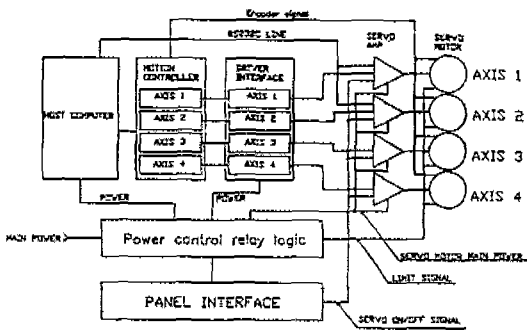


Fig. 2 Block diagram of the robot controller

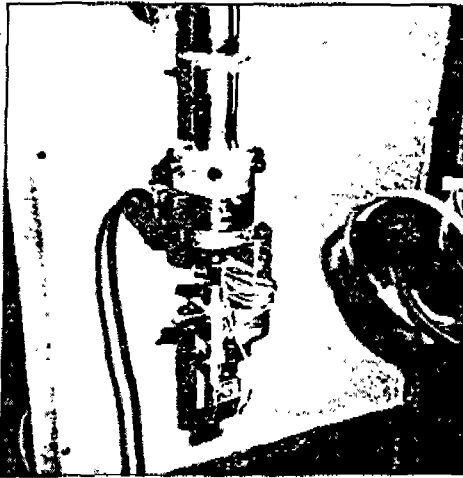


Photo 2 Force/Torque sensor and Gripper

Fig. 4에는 4축 힘/토크센서, 앰프보드, Eight Channel Comparator boards, 파워서플라이로 구성된 힘/토크센서 시스템의 블럭선도가 나타나 있다. 여기서 4축 힘/토크센서는 Nitta Corp.의 제품(QFS-4012A-25)으로 JR3 형태이며 Wheatstone bridge로 구성된 포일스트레인 게이지에 감지된 신호가 센서 케이블을 통해 앰프보드에 연결된다. 4 Channel을 통한 감지신호는 앰프보드에서 증폭되고 4차 Butterworth filter를 통해 Comparator board에 전달된다. 감지 신호는 bi-polar 전압이고 센서 측에 걸리는 힘/토크에 비례한다.

힘/토크센서의 앰프보드를 통한 신호는 아날로그신호로 출구를 통해 A/D 변환기(Analog Device Corp.의 RTI860보드)에 전달된다. 이 A/D 변환기는 330khz의 빠른 샘플링 및 direct memory access기능을 갖고 측정된 비교적 고주파수의 힘/토크 신호를 디지털신

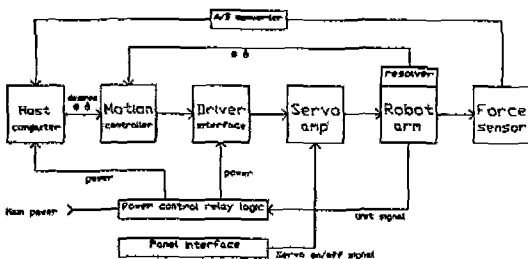


Fig. 4 Block diagram of force/torque system

호로 변환하여 준다. 변환된 디지털신호는 주제어기와 연결되어 이 힘/토크 신호에 따른 직접구동식 로봇트의 제어알고리즘의 입력으로 처리된다.

이상과 같이 개발된 직접구동식 스칼라 로봇트의 기구학적 구조 및 힘/토크 센서 및 이의 신호처리기와 같은 고기능을 갖춘 시스템의 구성에 대하여 설명하였다. 이 개발된 로봇트를 이용하여 peg-in-hole과 같은 조립작업에 적합한 active compliance 제어 이론을 적용하여 기초실험을 행하였다.

5. 힘/운동 제어의 이론 및 기초실험

5.1. 직접구동식 로봇트의 튜닝

직접구동식 로봇트는 감속기를 쓰는 일반 로봇트와 달리 백래쉬가 없고 상대적으로 높은 강성을 갖고있어 구동력에 대해 상대적으로 빠른 응답을 가져와서 빠르게 동력을 전달할 수 있으나 모터에 상대적으로 큰 부하(질량과 관성)가 걸린다. 따라서 상대적으로 큰 부하에 대한 모터의 제어이득을 튜닝하였다. 이를 위하여 모터에 여러 입력신호를 주고 그에 따라 변하는 출력신호를 오실로스코프를 사용하여 검출함으로써 모터의 임계구동능력에 대해 조사하였다. 또 로봇트 팔의 부하 아래 운동제어를 위한 신호에 따른 로봇트 각 팔의 성능(응답속도, 오버슈트, 정상상태 오차등)을 살펴보고 보다 적합한 응답을 가져올 수 있도록 PI 이득을 설정하였다. 선단 2축 모터(SSM2010, TS1983N56E5)는 상대적으로 높은 PI 이득을 아래와 같이 설정하였다. 특히 TS1983N56E5 모터는 아날로그 방식이어서 가변저항을 매우 적합한 상태로 조정하였다. 기저 두 축은 직접구동식 모터(RS1410FN, RS1010FN)를 사용하였는데 일반 모터에 비해 민감한 채터링 반응이 나타나서 상대적으로 낮은 PI 이득을 설정하였다. 선택한 PI 이득은 다음과 같다.

5.2. 로봇트의 기초 힘/운동 제어

백래쉬가 없는 직접구동식 로봇트의 빠른 토크 전달을 할 수 있는 장점을 살려 힘/토크 센서를 로봇트 팔

Table 3 Control gains of motors

모터	RS1410FN	RS1010FN	SSM2010
gain			
position	2.5	3.5	25
integral	2.0	3.0	25

의 침두에 장착함으로써 주위환경과의 접촉시 발생하는 원하지 않는 힘/토크를 완화 또는 상쇄하는 active compliance의 기본적인 제어알고리즘을 구성하였다. 이 기본적인 힘/토크 제어 알고리즘은 로봇트 팔의 그리퍼와 저장성 작업물체간의 스프링 작용 관계를 이용하여 로봇트 팔에 작용하는 외부의 힘과 토크의 방향으로 위치/속도 변화를 주거나 제어이득을 조정하여 원하지 않는 외란들을 완화 혹은 상쇄시키는 온라인 응답 기법이다. 로봇트의 작업중 물체와의 접촉시에 작업 물체가 고강성을 가질 때는 그리퍼의 집게 부분에 우레탄과 같은 저장성의 매체를 부착함으로써 강성을 낮추어 제어를 용이하게 한다. 이에 더하여 힘/토크를 검출하는 힘/토크 센서 자체도 강성을 낮추는데 기여를 한다. 이러한 외력과 강성과의 상호관계는 다음의 힘/토크와 위치 관계로 표현될 수 있다.

$$F = k_p \delta x \quad (1)$$

여기서 k_p 는 6x6 작업물체와 그리퍼 간의 강성을 나타내는 대각행렬이고 δx 는 태스크 공간에서 작은 위치 변동량이다. 또한 태스크 공간에서의 변화는 자코비안을 통해 다음과 같이 조인트 공간에서의 변동량으로 나타낸다.

$$\delta x = J(\theta)\delta\theta \quad (2)$$

여기서 $\delta\theta$ 는 조인트 공간에서의 작은 위치 변동량이다. 위의 관계식은

$$\delta\theta = J^{-1}(\theta)k_p^{-1}F \quad (3)$$

로 나타내어진다. 여기서 L_1, L_2, L_3 는 로봇트 선단 부터의 팔의 길이를 나타낸다.

$$J(\theta)^{-1} = \frac{1}{\det} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} L_2 \cos(\theta_2) & L_2 \sin(\theta_2) & L_2 L_3 \sin(\theta_3) \\ -L_1 \cos(\theta_1) & -L_1 \sin(\theta_1) & L_1 L_3 \sin(\theta_1 - \theta_2 - \theta_3) \\ L_1 \cos(\theta_1) & L_1 \sin(\theta_1) & L_1 L_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) \\ & & + L_1 L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 - \theta_1) \end{bmatrix}$$

여기서 행렬치는

$$\det = L_1 * L_2 * \sin(\theta_2 - \theta_1),$$

$$\delta\theta = [d\theta_x, d\theta_y, d\theta_z]^T,$$

$$F = [F_x, F_y, M_z]^T,$$

$$K_p^{-1} = \begin{bmatrix} K_{px}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{py}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & K_{pz}^{-1} \end{bmatrix}$$

이다. 따라서 위의 $\delta\theta$ 와 F 의 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$d\theta_1 = (L_2 * \cos(\theta_2) * F_x + L_2 * \sin(\theta_2) * F_y + L_2 * L_3 * \sin(\theta_3) * M_z) / \det \quad (5)$$

$$d\theta_2 = (-L_1 * \cos(\theta_1) * F_x - L_1 * \sin(\theta_1) * F_y + L_1 * L_3 * \sin(\theta_1 - \theta_2 - \theta_3) * M_z) / \det \quad (6)$$

$$d\theta_3 = (L_1 * \cos(\theta_1) * F_x + L_1 * \sin(\theta_1) * F_y + (L_1 * L_2 * \sin(\theta_2 - \theta_1) + L_1 * L_3 * \sin(\theta_2 + \theta_3 - \theta_1)) * M_z) / \det \quad (7)$$

위의 식에서 상하 운동하는 4번째 축은 외력과 위치/속도와 같은 태스크 좌표공간을 사용하므로 F_z 와 Z 축을 서로 같은 방향으로 정함으로써 비례적인 관계로 용이하게 표현할 수 있다. 위의 관계식에 따라 힘/토크

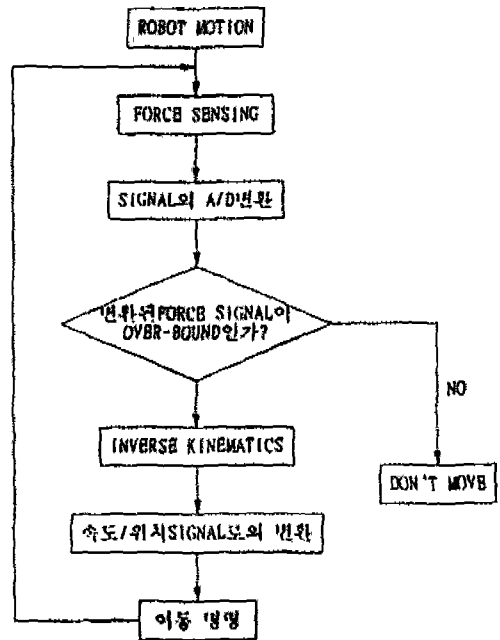


Fig. 5 Force Compliance Algorithm

센서에서 온라인으로 검출된 외부로 부터의 힘/토크 벡터는 위의 관계를 이용한 위치/속도 제어칙을 통해 로봇 팔의 조인트 각의 변화로 완화 또는 상쇄시킬 수 있다. 이와 같은 active compliance를 위한 입출력 관계의 알고리즘은 Fig. 5에서 나타난 알고리즘의 경로를 수순을 따라 구성된다.

5.3. 힘/운동 제어의 기초실험 및 결과

직접구동식 로봇 개발의 응용작업인 peg-in-hole과 같은 조립작업에 적합한 알고리즘의 기저를 마련하였고 이를 이용하여 기초실험을 하였다. 태스크 공간 좌표인 힘/토크 벡터와 조인트 공간 좌표로 표현되는 제어 입력간의 기구학적 관계가 5.2. 절과 같이 정립되었고 힘/토크 공간좌표는 태스크 공간좌표를 사용하므로 태스크 공간의 x, y, z 축과 힘/토크의 F_x, F_y, F_z 축을 각각 정렬하였다. 따라서 외부와의 접촉시 발생하는 접촉력은 작용하는 F_x, F_y, F_z 의 방향에 따라 자코비안을 통해서 조인트 각속도를 제어함에 따라 능동적으로 compliance를 이용하여 제어할 수 있게 되었다.

Fig. 6과 7은 그립퍼에 임의의 힘이 가해졌을때 이 힘의 방향으로 직접구동식 로봇트를 이동시킴으로 이 힘을 상쇄 혹은 감소시키는 active compliance에 의한 힘제어의 결과이다.

Fig. 6은 직접구동식 로봇트의 X축과 외력 F_x 의 방향이 일치하도록 조정되었을 때 F_x 방향으로만 약 12초 동안 외력을 증가하여 밀었을 때의 힘/토크 센서를 통해 외력을 검출한 것을 A/D변환기를 사용하여 디

지탈화 한 수치이다. 좌표에서 횡축은 시간(second)이고 종축은 디지털 값에 비례적인 Force(Kgf)단위로 표기된다. 또한 Fig. 7에서는 직접구동식 로봇트의 Y축과 외력 F_y 의 방향이 일치하도록 조정되었을때 F_y 방향으로만 약 10초 동안 외력을 증가하여 밀었을 때의 외력을 검출한 것이다. Fig. 6과 7에서 나타난 것 같이 위의 선도는 외력이 계속 증가하는 결과치를 나타내는 것은 외력의 증가에 대처하는 힘제어가 없기 때문이다. 이와는 달리 외력 F_x 를 X축 방향으로 F_y 를 Y축 방향으로 증가시켰으나 Fig. 6과 7에서 나타난 것같이 외력이 초기에 조금 증가하다가 일정량 이상 증가하지 않는다. 이는 F_x 와 F_y 방향으로 외력이 작용할 때 그 외력방향으로 직접구동식 로봇트를 이동시켜서 외력을 제어하는 active force compliance기법이다. Figure 6과 7을 비교하면 force compliance를 적용한 두 경우의 검출된 힘의 한계치에 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 force compliance의 알고리즘에서 F_y 의 compliance 시행의 한계를 F_x 의 compliance의 시행 한계 보다 높게 설정하였기 때문이다. 이것에서 나타난 것 같이 force compliance의 시행 한계를 낮추면 force compliance를 적용한 경우 보다 낮은 수치의 force response 결과가 나타난다. 위의 그림에서 나타난 결과는 force compliance를 이용한 peg-in-hole과 같은 작업에의 응용 가능성을 잘 보여준다.

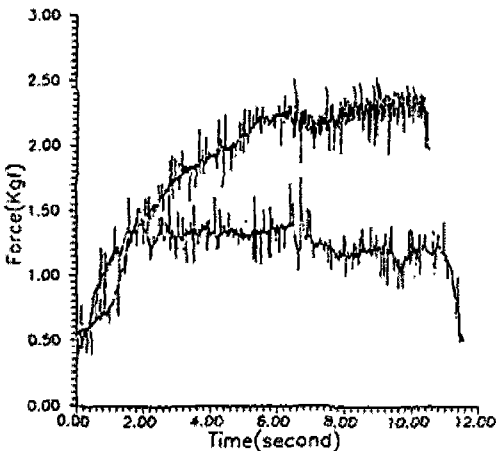


Fig. 6 Force Compliance of F_x

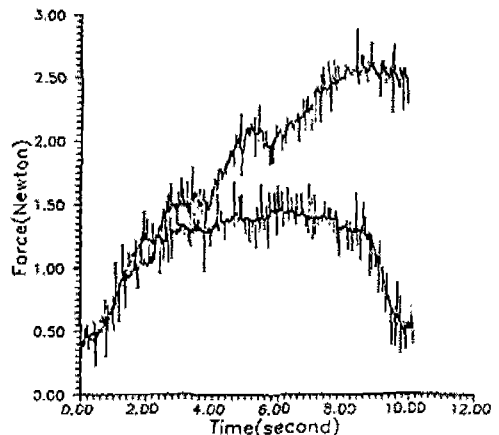


Fig. 7 Force Compliance of F_y

6. 결 론

직접구동식 로봇의 기구부의 제작 및 운동제어기의 하드웨어개발과 이에 대한 검토를 하였다. 또한 제어 알고리즘 개발과 응용면을 고려한 힘/토크 센서의 직접 구동식 로봇에의 접합 및 이의 기초실험을 행하였다. 실험결과에서 나타난 바와 같이 force compliance 제어 알고리즘의 직접구동식 로봇에의 적용은 peg-in-hole과 같은 힘/토크의 제어를 요하는 작업에 좋은 응용 가능성을 보여준다.

참고문헌

1. H. Asada, T. Kanade, et al., "Concept of Direct-Drive Manipulators using Rare-earth DC Torque Motors", Proc. of 11th ISIR, 629-636, 1981.
2. H. Asada, K. Youcef-Toumi and R. Ramirez, "Design of MIT Direct-Drive Arm", In International Symposium on Design and Synthesis, Japan Society of Precision Engineering, Tokoyo, Japan, 1984
3. H. Asada, and K. Youcef-Toumi, "Analysis and Design of a Direct-Drive Arm with a Five-Bar-Link Parallel Drive Mechanism", ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, vol. 106, (Sep. 1984).
4. R. Curran and G. Mayer, "The Architec-

- ture of the ADEPT One Direct-Drive Robot", Proc. of 1985 American Control Conference, pp.716-721, Boston, 1985.
5. 조립용 DD 로봇트 제어기술 개발, 과학기술처, 1991
6. J. K. Salisbury, "Active Stifeness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates", 19th IEEE Conference on Decision and Control, Albuquerque, New Mexico, 1980
7. J. Simons, "Force feedback in robot assembly using an active wrist with adaptable compliance" Ph.D. Thesis, Kath. Univ. Leuven (Belgium), 1980.
8. J. De Schutter, and H. Van Brussel, "Compliant Robot Motion II. A Control Approach Based on External Control Loops" The Int. J. Robotics Research, Vol. 7, No. 4, pp.18-33 August 1988.
9. T. Goto, K. Takeyana, and T. Inoyama, "Control Algorithm for Precision Insert Operation Robots", IEEE Trans. Syst.. Man, Cybernetics SMC-10(111), pp 19-25, 1980.
10. 6 축 Direct Drive Robot 개발(II), 한국기계연구원 로봇트공학실 연구보고서, 1993.
11. J. J. Craig, "Introduction to Robotics Mechanics & Control", Addison-Wesley Publishing Company, 1986.