

## 손목힘 센서를 이용한 5축 로봇의 힘제어

# Force Control of the Five-link Robot Using Wrist Force Sensor

°허 영 태, 이 장 명

부산대학교 전자공학과(Tel: 051-510-1696; Fax: 051-515-5190; E-mail: yther@hyowon.cc.pusan.ac.kr)

**Abstracts** In this paper, we present a force control of a five-axes robot, using an impedance model. Tasks such as assembly, grinding, and deburring, which involve extensive contact with the environment, are better handled by controlling the forces of interaction between the manipulator and the environment. The five-link articulated robot is equipped with a wrist force sensor which consists of an array of strain gauges and can delineate the three components of the vector force along the three axes of the sensor coordinate frame, and the three components of the torque about these axes. For the precise control of the contact force, impedance models of a robot and the environment are defined. Experimental results are shown.

**Keywords** Force, Impedance Control, Force/Torque Sensor, Articulated Robot,

### 1. 서론

일반적으로 로봇 제어목적은 사용자가 제어목적 대상을 제어하고자하는 최적의 상태가 되도록 한다. 즉 로봇의 말단효과장치가 계획된 궤적을 정확히 추종하도록 한다. 기존의 매니퓰레이터는 아주 정밀하고 빠른 경로추종에 노력을 많이 기울여 왔으며, 정확, 고속, 정밀제어가 되도록 최적의 알고리즘에 접근하고자한다.

센서의 활용 여부에 따라 지능 척도로 평가될 수 있다. 로봇 성능평가 요인으로 어떤 센서를 사용하였는가에 달려있을 만큼 비중이 크다. 주로 로봇에서 사용되는 센서를 살펴보면, 2차원 정보를 얻을 수 있는 CCD 카메라를 이용한 Vision, 거리를 측정할 수 자외선 센서 그리고 Force와 Torque를 측정할 수 있는 F/T 센서등이 있다. 환경변화에 알맞은 센서 선택으로 말단효과장치가 미끄러지듯이 표면을 따라가도록 접촉환경의 변화에 따라 적절히 대응될 수 있도록 센서 활용으로 지능화 해야한다.

자동화공정 작업시 로봇의 주위 환경변화 모두 예상한다는 것은 불가능하다. 특히 접촉을 요하는 물리적변화와 같이 기존 산업용로봇의 위치제어만으로는 어렵다. 따라서 로봇의 접촉을 요하는 작업에 대해서 접촉에 대한 정보를 필요로 하고, 제어가 가능해야 한다. 접촉환경과의 접촉이 일정하게 Desired Force에 Contact Force를 추종성에 촛점을 맞춘다. 일정한 힘과 일정한 속도로 접촉면을 따라갈 때 이러한 응용가능성은 디버링, 점용접, 도장에서의 용융 범위가 다양한 추세이다. 접촉시 위치제어만으로 제어가 어렵다. 비접촉인 경우는 가속도의 변화에 따라 힘이 발생하나, 일단 접촉을 하면 힘과 속도의 관계를 상호 고려하여야 한다[1][4]. 접촉환경과의 힘제어가 되기 위해서 위치와 힘의 동적 관계를 고려한다. 접촉면의 수평방향에서는 일반적인 위치제어를 이용하고 (C)에서는 적당한 자유도에 상용하는 위치이득을 조절한다. 위치이득은 속도이득을 조절하는 결과가 되며 자유도의 조정이 된다. (C)자유도 변화는 말단효과장치의 기계적임피던스를 다룬다[2][5].

본 논문에서는 5축 다관절 로봇을 이용하였다. 로봇 말단공구

장치에 손목힘센서(Wrist Force Sensor)를 장착하여 환경과의 접촉시 센서로부터 힘을 받을 구성이 되어있다.

말단공구장치단에서 접촉시 변화는 힘의 상태변화를 Force와 Moment 데이터를 센서로부터 입력받는다. 로봇 말단공구장치단에 센서를 부착하여 시스템을 구성하여 PC와의 인터프리팅하고 제어 알고리즘을 구현하였다. 실험에서 로봇은 환경과의 접촉시 힘 반영 동적 관계에서 전기적 동가회로로 변환하였다.

### 2. 시스템 구성

PID제어를 사용한 Scorbot ERVII과 환경변화에 다각적인 지능을 요구하기 위하여 환경접촉시 힘센서를 사용하여 PC 제어기에 정보를 입력하여 실험으로 최적의 힘제어가 되도록 시스템을 구성한다.

실험에 사용된 시스템은 Eshed Robotec Inc.의 Scorbot ERVII (PUMA형) 5축 다관절 로봇과 Assurance Technology F/T 센서와의 Monitoring하는 PC와의 결합으로 시스템을 구성한다. 로봇 전용제어기와 F/T 전용제어기의 데이터 인터프리팅하기 위하여 RS232C Port를 통하여 Serial로 통신한다.

#### 가. 로봇(Scorbot ERVII)

Scorbot ERVII은 5축 다관절 로봇이다. 1축(Base), 2축(Shoulder), 3축(Elbow), 4축(Pitch), 5축(Roll)은 Position과 Orientation(Pitch, Roll)을 나타낸다. 로봇의 제어알고리즘 PID, 하중 30Kg, CPU Motorola 68010, User RAM, Repetation 0.2(mm), Actuators Electrical DC Servo Motors를 사용하여 로봇 제어기와 RS232C Serial Port를 통하여 통신한다.

Scorbot ERVII의 각 조인트에서 직교좌표변환과 직교좌표에서 조인트 변환관계 Kinematics은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

#### ◎ Definitions

먼저 Kinematics을 기술하기 전 각 파라메타 a,b,c,d,e(Joint angles in radians), l<sub>1</sub>,l<sub>2</sub>,l<sub>3</sub>(Length arms), h<sub>1</sub>,h<sub>2</sub>,h<sub>3</sub>(Offset of arms), x,y,z,p,z(Cartesian coordinates)를 정의한다.

● Forward Kinematics: Robot(a, b, c, d, e) Joints ⇒ Cartesian (x, y, z, p, r) Coordinates

5축 Base, Shoulder, Elbow, Pitch, Roll의 각 Joint(a, b, c, d, e)에서 정기구학을 풀면 식(1)-(5)에서 Position과 2방향의 방향을 나타낸다.

$$x = (l_1 \times \cos(b) + l_2 \times \cos(b+c) + l_3 \times \cos(b+c+d) + h_1) \times \cos(a) - h_2 \times \sin(a) \quad (1)$$

$$y = (l_1 \times \cos(b) + l_2 \times \cos(b+c) + l_3 \times \cos(b+c+d) + h_1) \times \sin(a) + h_2 \times \cos(a) \quad (2)$$

$$z = l_1 \times \sin(b) + l_2 \times \sin(b+c) + l_3 \times \sin(b+c+d) + h_3 \quad (3)$$

직교좌표공간상에서 위치 값은 Joint 각에 의해 식(1)-(3)와 같이 변환된다.

$$p = b+c+d \quad (4)$$

$$r = e \quad (5)$$

식(4)은 2축, 3축, 4축 관절각의 합으로 직교좌표공간상의 Pitch를 구하며 식(5)는 5축의 Joint각이 직교좌표공간에서 Roll로 일대일 변환된다.

● Inverse Kinematics: Cartesian(x, y, z, p, r) Coordinates ⇒ Robot(a, b, c, d, e) Joints

$$Q = \sqrt{x^2 + y^2 - h_2^2} \quad (6)$$

$$a = \text{angle of vector}(x \times Q + y \times h_2, y \times Q - x \times h_2) \quad (7)$$

Offset  $h_2$ , 직교좌표공간 x, y에 의해 1축 Base Joint각 a를 식(7)과 같다.

$$A = Q - h_1 - l_3 \times \cos(p) \quad (8)$$

$$B = z - h_3 - l_3 \times \sin(p) \quad (9)$$

$$L = A^2 + B^2 \quad (10)$$

$$\rho = \sqrt{L} \quad (11)$$

$$\phi = \text{angle of vector}(A, B) \quad (12)$$

Angle of vector (A,B)는  $\text{Arctan}(B/A)$ 로 정의한다.

$$\psi = \text{Arcos} \frac{L + l_1^2 - l_2^2}{2 \times l_1^2 \times \rho}; \quad \psi > 0 \quad (13)$$

$$b = \phi + \psi \quad (14)$$

2축 Joint각 b는 식(14)과 같이 풀 수 있다. 만일 b가 2축 최대 각도보다 크다면  $b = \phi - \psi$ 가 된다.

$$c = [\text{angle of vector}(A - l_1 \times \cos(b), B - l_1 \times \sin(b))] - b \quad (15)$$

$$d = p - b - c \quad (16)$$

3-4축 Joint각 c-d는 식(15)-(16)로 풀 수 있으며 만일  $c > 0$ 면 위치가 직교좌표공간을 벗어나 더 이상 위치를 이동시킬 수 없는 것이 된다.

사진 1에서 실험에 사용된 5축 다관절 로봇 Body와 손목힘센서를 나타낸다. 말단효과장치 끝단에 미끄럼이 쉽게 될 수 있도록 Ball을 두었다.

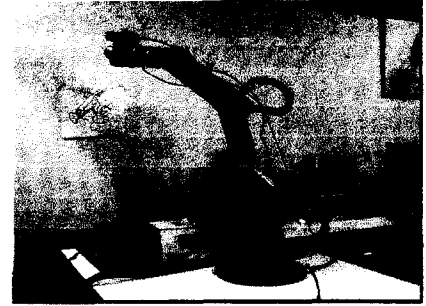


사진 1. 사용된 5축 다관절 로봇(Scorbot ERVII)  
Pic. 1. Used the Five-link Articulated Robot(Scorbot ERVII)

나. 손목힘센서

로봇에서 힘의 되먹임을 위한 세 가지 센서 형태가 있다. 손목힘(Wrist Force)센서, 관절 토크(Joint Torque)센서, 그리고 접촉(Tactile)센서등이 있다. 스트레인 게이지의 구성으로 3개의 좌표축에 따라 벡터 힘의 세요소와 세방향의 축에 따라 토크를 나타낸다. 6축의 관절센서를 가지는 손목힘센서를 이용하여 실험한다.

Scorbot ERVII의 손목에 걸리는 힘을 측정하기 위해 손목에 Force/Torque Sensor를 부착하였다. 본 실험에서 사용된 F/T 전용제어기는 6축 센서에서 측정된 데이터를 받을 환경이 되어 있는 Assurance Technology(Model : 30/100) 제어기이다. F/T 전용제어기는 PC와 통신을 할 수 있도록 되어 있다. 6축 데이터 출력은 아날로그 혹은 RS232C Serial Port를 통한 통신이 가능하다. 실험에서 시리얼 포트로 데이터를 주고 받는다.

Force/Torque 센서의 사양을 살펴보면, Sensing range(Force range  $\pm 30\text{lb}$ , Torque range  $\pm 100\text{in-m}$ ), Resolution( $F_x, F_y$  :  $0.40\text{oz}$ ,  $F_z$  :  $0.80\text{oz}$ ), Overload Protection(Max.  $F_{xyz}$ : $150\text{lb}$ ,  $F_z$ : $300\text{lb}$ ,  $T_{xyz}$ : $500\text{lb-in}$ )으로 측정된다.

실험에서 F/T 제어기를 사용하기 위하여 주로 사용된 명령은 아래와 같다.

▣Query F/T & Strain Gauge Data Commands

⇒QS(Query output of a stream of data in pre-selected type & mode);  $F_x, F_y, F_z, T_x, T_y, T_z$  데이터 값을 전송된 값을 인터프리팅하기 위한 Program상에서 부함수  $F\_Txyz()$  call하여 3개의 force와 3개의 torque 데이터를 얻는다.

▣Sensor Bias Commands :

⇒SB(Performs a Sensor Bias. Stores bias reading in a 3 level buffer); 현재의 Bias  $F_x, F_y, F_z, T_x, T_y, T_z$ 를 data Zero Setting한다.

3. 모델링

실험적 힘 제어 실험은 1강성도 만으로 제한하였다. 매니플레이터 말단효과장치에서 위치(혹은 속도)와 힘의 동적 관계 제어를 통하여 접촉환경에서 힘제어를 하고자 한다. Salisbury가 주장한 이론, 위치제어의 오차를 허용하면서 순응성을 얻는 강성 제어와 Whitney의 이론, 측정된 힘으로부터 속도 피드백 계산을 하는 감쇠제어의 복합된 Hogan의 임피던스제어 이론에 근거하여 모델링하였다. 가변 강성을 추가하는 임피던스제어에서 위치나 힘을 제어한다는 것은 서브강성 스펙트럼의 두 양단에

서 로봇을 제어하는 것이다. 이상적인 위치서브는 강성이 무한 대일 때 외란 힘이 제거되며, 이상적인 힘서브는 강성이 없을 때, 즉 위치 외란에 관계없이 원하는 힘을 유지하도록 한다. 따라서 중간강도의 강성을 유지할 수 있는 메카니컬 임피던스제어가 된다면 유용하다. 단적인 예로 높은 강성의 위치제어 장치를 이용하여 자유공간상(영강성) 움직이며, 제로강성의 힘제어 장치로 주위에 높은 강성에서 움직인다.

□ 모델 1

모델링 전기적 등가 회로는 아래의 표와 같다.

표 1. 변환관계  
Table 1. Conversion Relation

용수철계	전기회로
$M \frac{dV}{dt} + BV + KX = F$	$Lq'' + Rq' + q/C = E$
변위 X	전하 q
속도 V	전류 i
힘 F	기전력 E
질량 M	인덕턴스 L
감쇠계수 B	저항 R
용수철 상수 K	커패시턴스의 역수 1/C

위치제어만으로 제어가 가능한 경우, 즉 환경과의 접촉이 없을 때 기계적 모델을 전기적 등가회로로 변환하면 그림 1과 같다.

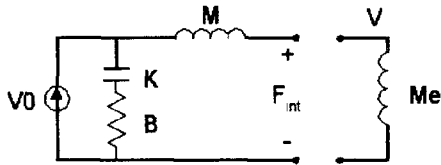


그림 1. 임피던스제어의 위치제어

Fig. 1. Position Control of Impedance Control

속도에 대한 입력은 출력이 힘으로 나타난다. 스프링(K)과 감쇠(B)가 전력전달로 나타난다. 여기에서 매니플레이터는 임피던스가 되며, 환경은 어드미턴스가 된다. 환경 측에서 Effort(=Force), Flow(=Velocity)의 관계이며, 매니플레이터에서 Effort(=Velocity), Flow(=Force)의 관계가 있다. 기계적인 관계를 말단효과장치 질량을 Me라고 두고 Interface Force는 식(18)에서 가속도항에 의해 힘이 변한다. 로봇에서 식(17)에서 대응된 힘을 나타낸다.

$$F_{int} = K(X_0 - X) + B(V_0 - V) - M \frac{dV}{dt} \quad (17)$$

$$M_e \frac{dV}{dt} = F_{int} + F_{ext} \quad (18)$$

$$(M_e + M) \frac{dV}{dt} = K(X_0 - X) + B(V_0 - V) + F_{ext} \quad (19)$$

매니플레이터 자체의 위치 변화량  $X_0 - X$ 와 속도에 따른 속도 변화량  $V_0 - V$ , 그리고 가속도  $\frac{dV}{dt}$ 는 의해 파라메타 M, B, K에 의해 힘(Fint : Interface Force)을 발생시킨다. 식(18)에서 외란 혹은 외부적인 힘(Fext : external force)이 있다면  $\frac{dV}{dt}$ (가속도)에 의해 힘이 나타나는 것을 수식에서 보인다. 전체 시스템은 식(19)으로 표현된다.

□ 모델 2

일반적 임피던스제어기는 접촉면 위에서 힘제어 확장이다. 힘의 변화량에 따라 속도의 변화량은 임피던스로 두어 일반적인 임피던스제어식을 나타낸다(식(20, 21)).  $Z_{c1}$ 과  $Z_{c2}$ 는 일반적인 제어기를 구성한다.

$$F_{in} = (V_{in} - V_e)Z_{c1} + V_e Z_{c2} = V_e(Z_r + Z_e) \quad (20)$$

$$(V_e - V_{in})Z_{c1} + V_e(Z_r + Z_e) = V_e Z_{c2} \quad (21)$$

실제적인 매니플레이터의 접촉면과의 관계에서 식(22)으로 표현될 수 있다. 식(22)에서 환경과의 접촉시 위치제어만으로 제어가 불가능하며 힘제어가 필요하다. 이 식에서 매니플레이터는 힘과 속도의 동적 관계가 선행되어야 한다.

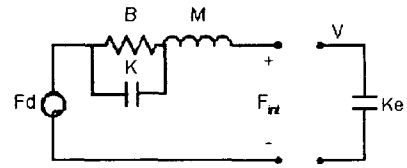


그림 2. 임피던스제어의 힘제어

Fig. 2. Force Control of Impedance Control

그림 2에서 1자유도에 대한 힘제어를 나타낸다. 접촉시 접촉 강성도 따라 1자유도를 따라 제어된다. Desired Force에 Interface Force와의 제어관계를 식(22)에서 나타낸다.

$$F_d - F_{int} = BV + M \frac{dV}{dt} \quad (22)$$

접촉환경은 전기적 등가적 파라메타 커패시터는 강성도(K)로 볼 수 있다. 추종 에러 힘이 제로에 접근하도록 파라메타 B, M을 가지고 수식에서 속도, 가속도가 적절하도록 제어한다.

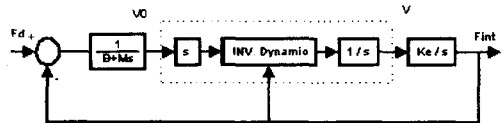


그림 3. 힘제어 블럭도

Fig. 3. Force Control Block Diagram

그림 2, 3에서 거의 접촉시 좌우되는 힘은 스프링 성분인 강성도(Ke)에서 나타난다. 1자유도에서는 접촉환경 강성도(Ke)에 의해 발생되지만 1자유도를 넘을 경우, 혹은 일정한 힘을 유지하면서 진행되는 Edge Following 경우에 접촉 감쇠(Be)에 의해 받는 힘이 강성도에 받는 힘보다 크다. 따라서 힘과 속도의 동적 관계를 고려하여 힘제어가 되도록 제어기를 구성한다.

4. 실험

가 실험조건

실험에서 PC는 로봇제어기와 F/T제어기 사이에서 데이터를 처리하는 제어기이다. 따라서 이러한 인터프리팅하는 과정에서 몇 가지 따르는 제약을 수반한다.

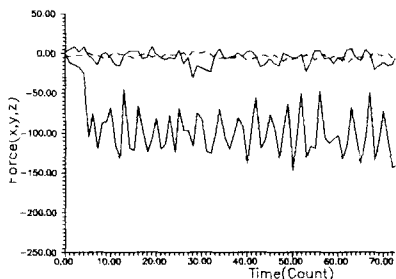
먼저 H/W적인 제약으로 실시간 처리가 곤란하다. 실험에서는 Robot Controller에 Direct Command 사용한다. 말단효과장치는 방향(F/T 센서가 Fz 방향)이 중력 방향을 향하며 수직평

면을 추종하도록 한다. 이러한 자세에서 접촉하기 이전에 6개의 힘성분을 Bias 상태로 세팅한다. 속도명령은 매 순간마다 힘/속도(임피던스)에 따라 명령이 지정되어져 수행되어야 하나 실험에서는 Scorbot ERVII이 제공하는 구간속도 Direct Command 사용한다.

## 나 실험

실험에서 Contact Force가 Desired Force에 대한 일정한 힘이 유지되도록 Edge를 추종하도록 하였다. 표면을 따라 추종시 비례제어 결과 그림 4와 나타낸다.

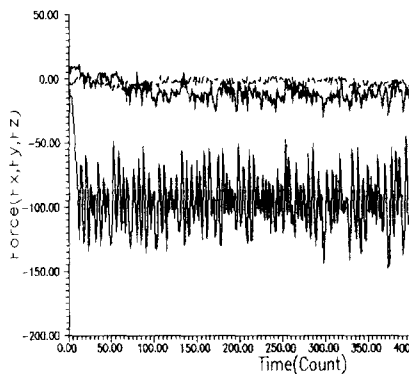
여기에서 비례제어는 힘과 위치의 변화량에 따라 추종하는 각을 구한다. 여기에서 비례제어는 자세를 보정하지않고 힘의 변화량만큼 속도 혹은 위치를 변화해줌으로써 출발위치에서 끝 위치까지 빠른 응답을 한다.



----- Fx  
 ——— Fy,Fz

그림 4. 비례제어

Fig. 4. Proportional Control



----- Fx  
 ——— Fy,Fz

그림 5. 임피던스제어

Fig. 5. Impedance Control

그림에서 로봇의 말단효과장치가 대상체 표면을 일정한 힘을 유지하면서 따라갈 때에 힘관계 센서출력을 나타낸다. 로봇의 말단효과장치는 수평축거리 40mm를 100(=0.933Kg)의 힘을 유지하면서 Edge 추종하도록 했다. 비례제어및 임피던스제어 최대오차는 약±50(±0.466Kg) 범위 내에서 추종함을 알 수 있다.

로봇이 시작점과 끝점의 이동시 일정한 힘을 유지하면서 미끄러지듯이 추종한다면 이상적인 제어기이다. 실험에서 힘/위치의 on/off제어와 1강성도에서 힘제어 이동에서 위치제어 구현시 빠른 응답을 구할 수 있었으나 정밀한 제어를 얻을 수 없었다.

그림 5와 그림 4에서 임피던스제어와 힘/위치 비례제어 에러 범위가 다르게 나타나고 비례제어 진동이 많은 이유는 속도항의 빠른 응답을 매순간마다 처리해야 하나 하드웨어적인 제약과 자세보정등으로 진동이 많고 추종 시간이 길다.

## 5. 결론

본 논문에서는 손목힘센서를 5축 다관절 로봇에 장착하여 임피던스제어를 적용하여 실험하였다. 이론적으로 임피던스제어는 많은 모델링과 시뮬레이션을 통하여 연구가 되어왔다. 지금까지 연구된 이론으로 임피던스제어의 실용가능성을 보여주었으며 실험에서 이론적 정의된 임피던스모델을 이용하여 실제적 임피던스제어를 하였다.

실험에서 위치/힘 비례제어와 임피던스제어를 하였다. 현재 손목힘센서 제어기의 입출력은 RS232C를 경유하여 데이터를 받고있는데 실시간이 되면 로봇의 제어가 더 간편하고 빠른 제어가 가능하리라 본다.

## 6. 참고문헌

- [1] Neville Hogan, "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I-Theory," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 107, pp. 1-7, 1985.
- [2] Neville Hogan, "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part II-Implementation," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 107, pp. 8-16, 1985.
- [3] Neville Hogan, "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part III-Applications," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 107, pp. 17-24, 1985.
- [4] Lonnie J.Love and Wayne J.Book, "Environment Estimation for Enhanced Impedance Control," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1854-1859, 1995.
- [5] Yasumasa SHOJI and Makoto INABA, "Stable Force Control of 1 Degree-of-Freedom Manipulator in Contacts Tasks," *Proceeding of 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1511-1515, 1993.
- [6] CHI-HAUR WU and RICHARD P.PAUL, "Resolved Motion Force Control of Robot Manipulator," *IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics*, Vol. SMC-12, pp. 266-275, 1982.
- [7] Mark W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*, JOHN WILEY & SONS, Inc. New York.