

지능 로봇트를 위한 전기식 그리퍼의 개발에 관한 연구
(Development of an Electric Gripper System for Intelligent Manipulators)

이진원 고명삼 이범희
(J.W.Lee M.S.Ko B.H.Lee)

서울대학교 공과대학 제어계측공학과
로봇틱스 및 지능 시스템 연구실

Most of industrial robots are reprogrammable for various operations, while the gripper is only used for on - off grasping. If the gripper has the intelligent ability to interact with its environment, it will be very useful in many fine motion application. For this purpose, an electric gripper system is developed through experiments and simulation. This paper describes a method of the contact position between the gripper and the grasped object by using strain gauge sensors, and presents the related experimental results.

1. 서 론

(1). 연구 목적

산업용 로봇트의 기능은 과거 단순한 pick-and-place 기능에서 다양한 기능으로 그 영역을 넓혀 가고 있다.

그러나 조립 분야의 경우는 큰 발전이 나타나고 있지 않다. 그 이유는 조립 작업시 part - mating 을 할때 0.25 - 0.0025 mm 정도 의 tolerance 를 요구 하게 되므로 이 tolerance 를 유지하기 위해서는 로봇트 자체의 높은 정밀도가 필요 하기 때문이다.

이러한 높은 정밀도를 유지하기 위해서는 로봇트 자체의 수행속도가 느려지게 되고, 또한 비용이 증가 하기 때문에 센서를 이용하여 기존의 로봇트의 기능 에 지능적인 능력을 부여 하여 조립작업을 실현 할 수 있도록 하는 방법이 이 문제에 대한 좋은 해결책이 될수 있다.

지금까지의 manipulator에 센서를 이용하는 연구는 힘/토크 센서 를 그리퍼 와 manipulator 사이에 연결 하여 물체가 그리퍼 를 통하여 manipulator 에 주는 힘을 측정할 수 있도록 하여 힘 제어 등에 사용 되어 왔다.

그러나 조립 작업시 물체와 직접 접촉하는 것은 그리퍼 이기 때문에 힘/토크 센서 만으로는 물체와 그리퍼 사이의 힘의 측정이 정확치 못하다.

현재의 그리퍼 기술은 산업용 로봇트가 각기 다른 작업에 reprogrammable 한데 비하여 로봇트에 사용 되는 그리퍼 의 대부분은 어떤 특정한 목적에만 쓰이고 있다.

또한, 공압으로 제어 되는 것이 대부분이기 때문에 물체를 잡을때의 힘이나 속도 등을 보다 정확히 제어할 수 없다. 이를 위해서는 일렉트릭 그리퍼 가 필요 하며, 이 일렉트릭 그리퍼 에 센서를 부착 하고 이를 이용하여 시스템이 지능적인 기능을 발휘 하도록 제어해 준다면 여러 작업에 유용하리라 생각 된다.

(2). 연구 배경

지금까지의 그리퍼에 대한 연구들을 살펴 보면 물체를 잡는 방법 자체에 관한 연구 [8],[9] 와 그리퍼가 물체와의 접촉시 받는 힘을 알아 내어 이를 제어하고 이의 분석 [3],[4],[5] 을 하는 연구 힘/토크 센서 를 manipulator 에 부착시켜 힘 제어를 하거나, 센서 정보와 힘의 관계를 파악해 내는 연구 [2], [7], 그리고 그리퍼 자체의 구조, 기능등 [1] 에 관한 연구등이 있다.

Jameson과 Leifer [8]는 안정된 grasp을 위한 grasp goal function 을 설정하고 이 함수에 대한 최적화를 하는 방법에 관하여 설명하고있다

Stokic[3]은 그리퍼 fingertip 에 힘 변환기를 달아 grip 시의 물체와 그리퍼와의 역학과 펙인홀 (peg-in-hole) 작업시 물체와 그리퍼 , 홀과의 역학을 분석 했다. 이때 물체가 그리퍼 에서 미끄러 지는 경우에 대해서는 생각하지 않았기 때문에 이 경우에 대한 분석이 필요 하다고 생각한다.

S.D. Kim [4] 는 on/off 제어를 이용하여 gripping 힘을 일정하게 제어하는 방법을 제시 하였다. 그러나 이 논문 에서는 공압을 동력원 으로 하였기 때문에 정확한 속도, 힘제어는 힘들게 된다.

Brown [5] 는 깨지기 쉬운 물체를 잡을때 중요시 되는 impact force 를 줄이기 위해서 DC servo motor 의 새로운 제어 방법을 제시하고 있다.

그러나 이 방법은 센서를 사용 하여 힘을 측정하는 것이 아니라 모터 의 상태 변수의 변화량을 이용하여 힘을 측정해냈기 때문에 정확한 측정이 필요하고, 또한 잡는 물체의 stiffness나 무게등을 알고 있다고 가정하고 제어 했기 때문에 일반적으로 쓰일수 없다.

Maple 과 Becker [2]는 힘/토크 센서 에서 나온 힘 정보를 이용하여 cartesian - based force feedback control을 하는 방법을 제시하며, 이 방법을 이용하면 그리퍼 의 힘 정보를 이용하여 manipulator 의 compliant motion 에 적용 시킬수

있다.

Cunningham 과 Brooks [7]은 smart 힘/토크 센서에서의 strain gauge 센서에 대한 calibration과 bias 힘에 대한 처리, 또한 센서 정보로부터의 힘의 유도 등을 나타냈으며, Fiorini [1]은 JPL smart hand의 구조, 기능, 제어 방법과 teleoperation의 기능을 소개하고 있다.

단순한 pick-and-place작업에서 벗어나 복잡한 작업을 실현하기 위한 sensor-based gripper의 실현을 목적으로 만들어진 smart hand는 센서의 정보를 가지고 자체의 micro-processor로 자율적으로 작동 되도록 하였다.

이상에서 보는 바와 같이 센서의 정보를 가지고 주어진 환경과의 대응 관계를 알아내어 이에 능동적으로 대응하는 그리퍼 시스템만이 복잡하고 다양한 기능을 수행하는 로봇 시스템의 end-effector가 될 수 있을 것이다.

본 논문에서는 이러한 그리퍼 시스템을 만족시키기 위하여 DC servo motor를 동력원으로 하고, 그리퍼 fingertip에 strain gauge 센서를 부착하여 물체의 인식을 정확히 해 내는 지능적인 그리퍼 시스템을 설계하고, 이 시스템을 기존의 PUMA 로봇 매니퓰레이터에 부착하여 주어진 작업에 적용해 보고자 한다.

2. 본 문

제작된 그리퍼를 PUMA manipulator에 붙여서 조립 작업을 수행하기 위해서는 여러 작업이 필요하다.

먼저 전체 시스템의 block-diagram을 살펴 보면 다음과 같다.

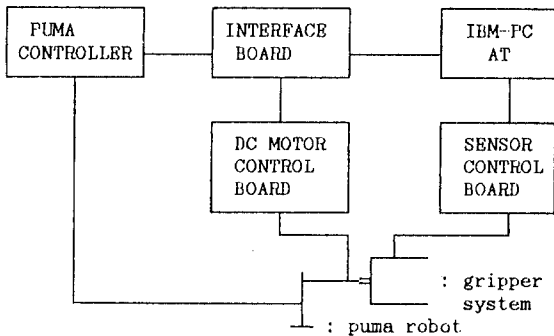


그림 1 SYSTEM 구성도

위와 같은 시스템을 구성하기 위해서는 기존의 PUMA 시스템, 즉 IBM PC-AT, interface board, puma controller 외에 DC motor control, sensor control board를 제작하여 interface시켜야 한다.

또한 기존의 PUMA 시스템의 software를 분석하고 그리퍼 시스템을 위한 software를 작성하고 이 전체 시스템에 대한 simulation을 병행시켜야 한다.

(1). Gripper System Hardware

그리퍼의 구성 요소는 10W DC servo motor와 fingertip의 위치를 알아내는 센서인 poten-

tiometer, grip 시의 힘을 알아내기 위한 센서인 strain gauge가 부착된 fingertip 등으로 구성되어 있다.

구조는 다음과 같다.

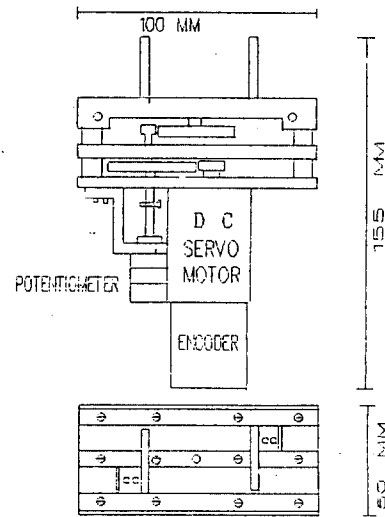


그림 2 GRIPPER 구성도

앞에서 언급한 DC motor board는 interface board를 통하여 들어온 IBM-PC에서의 DC motor command의 data를 PWM 방식의 signal로 변환시켜 DC motor로 전해준다. 이를 block-diagram으로 보면 다음과 같다.

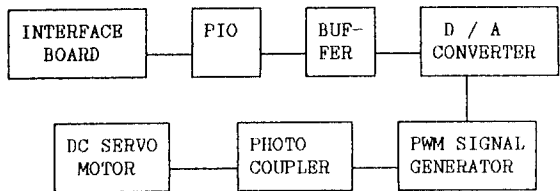


그림 3 DC MOTOR CONTROL BOARD

Sensor control board에서는 potentiometer와 strain gauge로부터 들어온 data를 처리하여 IBM-PC로 전달해 주는 역할을 하게 된다.

potentiometer로부터의 data는 A-D converter를 통하여 fingertip의 현재 위치를 알아내게 되며 fingertip이 받는 힘에 의한 strain gauge의 저항 값의 변화량은 전압으로 변환되어 이 전압 변

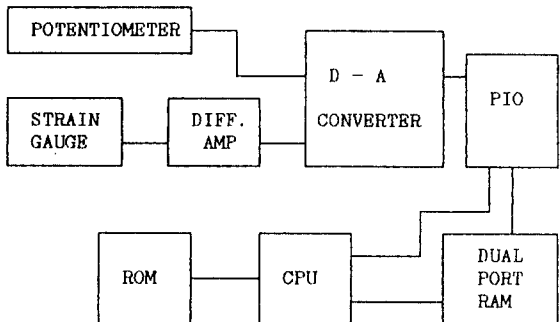


그림 4 SENSOR CONTROL BOARD

화량이 differential amp 를 통하여 증폭 된 다음 다시 A-D converter를 통하여 digital data로 처리 되게 된다.

이와 같은 data 들은 Dual Port RAM 을 통하여 IBM - PC 에 전달 되어 이 정보를 가지고 gripper 가 compliant motion 을 하게 된다.

(2) 센서 분석

지능 로봇을 구성하는 시스템중 센서는 매우 중요한 역할을 한다. 이는 외부와의 interaction 을 알아 내어 이에 대응 하는 기능을 수행하는데 필요하다.

본 시스템의 센서로는 그리퍼 fingertip 의 위치를 알아 내는 potentiometer 와 fingertip 이 물체와의 접촉 시의 힘의 크기와 접촉 하는 위치를 알아 내는 스트레인 게이지 (strain gauge) 가 있으며 이를 처리 하는 sensor board 가 구성되어 있다.

이때 스트레인 게이지의 data 는 게이지가 붙어 있는 물체의 재질 및 크기, 두께 등에 큰 영향을 받는다.

구성된 센서를 분석하기 위하여 스트레인 (strain) 과 스트레스 (stress) 에 관하여 알아 보면 스트레스란 물체에 외부로 부터 힘이 가해지면 이에 저항하는 응력이 스트레스가 된다.

이와 동시에 물체를 구성하고 있는 분자상태가 변화 하여 물체의 형상이 변화를 일으킨다. 이러한 변형을 스트레인 이라 한다.

$$\text{STRESS } \sigma = \frac{p}{A} \quad \text{kg cm}^2$$

$$\text{STRAIN } \epsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

이때 스트레스와 스트레인 과의 관계는 다음 그림과 같다.

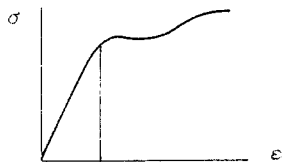


그림 5 스트레인과 스트레스

위의 그림에서 직선부분을 탄성 구역이라 한다.

이 탄성 구역 내에서는 재질에 가해지는 힘이 없어지면 원상태로 돌아오게 된다.

이 탄성 구역내의 스트레인과 스트레스의 비례 관계를 hooke's law 라 한다.

$$\text{탄성계수 } E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \text{Kg cm}^2$$

스트레인 게이지는 strain과 저항 변화 사이의 일정한 관계를 알아내어 저항 변화량에 비례하는 변화 전압을 얻어 이 전압을 증폭한 다음 기록 하여 스트레인을 측정 할수있다.

실험에 사용된 센서는 직사각형의 한면을 고정시키고 직사각형에 수직 의 방향에서 힘이 가해질때의 deflection 에 의해서 생기는 스트레인의 변화를 스트레인 게이지 를 통해서 알아 내어 이 data 를 이용 해서 가해진 힘의 크기와 위치등을 알아 내는

것이다.

이를 위해서는 재질이 힘을 받을때의 deflection 의 분석이 필요 하다. 이 분석은 먼저 pure bending, 즉 그림 6과 같이 moment 만이 가해지는 상황의 해석이 필요 하다.

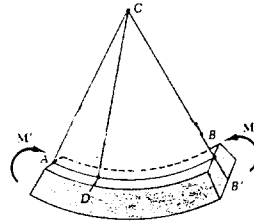


그림 6

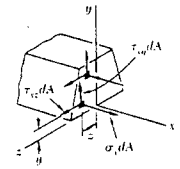


그림 7

pure bending 시의 물체가 받는 스트레스의 기본적인 식을 알아보면 위의 그림 6 에서 보는 바와같이 M moment 는 크기는 같고 방향이 반대인 힘으로 구성 되므로 어느 방향으로의 힘의 합은 영이 된다.

그림 7 을 중심으로 식을 써보면

- (1) X components : $\int \sigma \, dA = 0$
 - (2) moments about y axis : $\int Z \sigma \, dA = 0$
 - (3) moments about z axis : $\int (-Y \sigma \, dA) = 0$
- 이 된다.

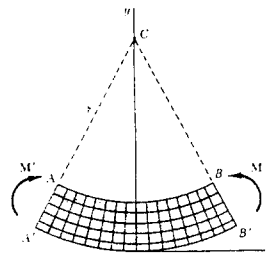


그림 8

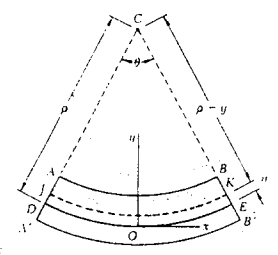


그림 9

그림 8 의 AB, A'B' 부분을 살펴 보면 AB 부분의 스트레스와 스트레인 값은 줄어들게 되고 (compression), A'B'부분의 스트레스, 스트레인은 늘어나게 된다 (tension). 이때 스트레인과 스트레스가 0 이 되는 부분이 물체의 중간 부분에 존재 하게 되는데 이를 neutral surface 라 한다.

그림 9 에서 y 는 neutral surface 에서의 거리라 생각하고 ρ 를 현 DE 의 반지름이라 생각 하면 현 DE 의 길이 L은

$$L = \rho * \theta$$

현 JK 의 길이 L'는

$$L' = (\rho - y) * \theta$$

이 때 JK 의 deformation 은

$$\delta = L' - L = (\rho - y) * \theta - \rho * \theta = -y * \theta$$

이 된다.

이때의 스트레인은 deformation 을 원 길이로 나눈 값이므로

$$\epsilon_x = \frac{\delta}{L} = \frac{-y \theta}{\rho \theta} = \frac{-y}{\rho}$$

위의 음 부호는 bending moment 가 양일때 beam 의 길이는 줄어들기 때문이다. ρ 를 neutral surface 로 부터 가장 긴 길이라 생각 하면 스트레인의 가장 큰 값은 다음과 같다.

$$\epsilon_m = \frac{c}{\rho} \quad \epsilon_x = -\frac{y}{c} \epsilon_m$$

위의 bending 이 탄성 범위 내에서 발생한다고 생각 하면 hooke's law 가 성립 되므로 양변에 탄성계수 E 를 곱하면 다음과 같다.

$$\sigma_x = -\frac{y}{c} \sigma_m$$

이 식을 식 1 에 넣으면

$$\int \sigma_x dA = \int \left(-\frac{y}{c} \sigma_m\right) dA = -\frac{\sigma_m}{c} \int y dA = 0$$

그러므로 neutral axis 에 관한 cross section 의 first moment 는 0 이 된다. 또한 식 2 로 부터

$$\int (-y) \left(-\frac{y}{c} \sigma_m\right) dA = M \quad \frac{\sigma_m}{c} \int y^2 dA = M$$

위의 integral 은 moment of inertia I 를 뜻하며 다음과 같은 식이 성립 된다.

$$\sigma_x = -\frac{My}{I} \quad \sigma_m = \frac{Mc}{I}$$

bending moment M 으로 생긴 deformation 은 neutral surface 의 곡률로 나타낼수 있다. 곡률은 반지름 의 역수로 정의 한다.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\epsilon}{c} = \frac{\sigma}{EC} = \frac{1}{EC} \frac{MC}{I} = \frac{M}{EI}$$

위의 식을 기초로 아래 그림 9,10과 같은 plate의 곡률을 분석하려면 위 식의 bending moment M 이고 정점으로 부터의 거리에 따라서 변화 하므로

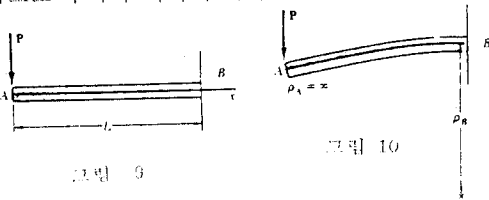


그림 9

그림 10

$M = -Px$ x : 고정점 으로부터의 거리 인 식이 된다.

곡률식은 탄성 범위 내에서 스트레인과 비례하므로 스트레인 게이지의 data는 고정점으로 부터의 거리에 비례하게 된다.

그러나 이상의 식은 힘 P 가 fingertip 의 중앙 에 주어진다는 가정을 전제로 하여 fingertip 에 대해 칭적으로 동작 할때만을 분석 할수있다.

그 이유는 위의 식에서 스트레인은 second moment I 와 비례하게 되는데 힘 P 가 중앙에 주어 지게 되면 계산이 간단해지나 대칭이 아니면 힘이 주어지는 경우마다 I 의 값이 변화 하므로 스트레인 게이지의 data 를 알아내더라도 이 스트레인이 힘 P 와 비례관계가 안되므로 gauge 의 data 를 제대로 힘을 알아낼수가 없다. 그러므로 이를 해결하기 위해 해서 FEM (finite element method)의 방법을 이용하여 비대칭일때의 재질의 deflection 을 구해내는 package를 사용하여 (ADINA, Automatic Dynamic Incremental nonlinear Analysis) 그 data 를 기초로 힘이 가해지는 위치와 strain gauge 의 관계를 알아 내어 실험에 응용할수 있다.

평면상의 곡률은 x,y 축을 그림 10과 같이 잡으면

다음과 같은 식이 된다.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}}$$

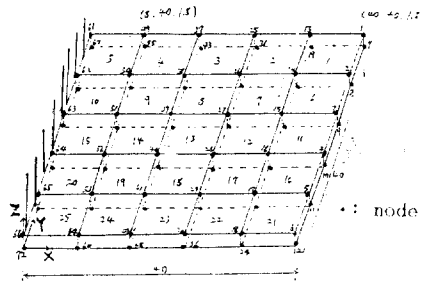
이 식에서 d^2y/dx^2 과 dy/dx 는 함수 $y(x)$ 로 표현 되는 curve의 2차, 1차 미분 값이다. 탄성 범위 내에서는 dy/dx 의 값이 비교적 적으므로 이 값의 제곱은 1에 비하면 매우 적을것이다. 그러므로 위 식 은

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} = \frac{\epsilon_m}{c}$$

그러므로 ADINA package 를 이용하여 d^2y/dx^2 의 값을 알아내면 이값은 스트레인과 비례하므로 스트레인 게이지의 data 를 이용하여 물체와의 접촉이 어디에서 일어났는지를 알수 있다.

그리퍼의 fingertip 은 아크릴 재질의 40*40*1.8 (mm) 크기의 판으로 만들어 졌으며 이 판이 그리퍼 평기어 에 물려서 좌우로 움직이게 된다. ADINA package 에서 다음 그림과 같이 각 node 를 정의 하고 각 node 의 위치 data 및 plate 의 탄성 계수및 포아손 비, 신 팽창계수 등의 data를 입력한다.

이때 node 61 부터 node 72 까지는 그리퍼의 평기어 부분과 물려 있는 부분이기 때문에 고정 되어 있다고 본다.



node

각 node 에 plate 의 탄성 범위 내의 힘이 가해 졌다고 입력을 하면 이 fingertip 의 deflection data 및 각 node 위치에서의 스트레인의 변화량을 알수 있다.

plate 에서의 스트레인 변화량은 스트레인 게이지 의 부착으로 알수 있다. 이때 게이지 를 부착하는 위치와 부착 각도에 따라 data 는 많은 차이가 나게 된다. 실험에 사용된 스트레인 게이지는 다음 그림 12과 같이 3개의 스트레인 게이지가 한 중심에서 45도의 각도를 가지고 위치하고 있다.

이를 plate 의 node 51,52 번 중앙에 부착 했다.

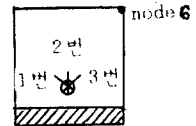
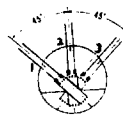


그림 12 스트레인 게이지 그림 13 부착 위치

Node 3, 4 번 중앙에 힘이 가해지면, 즉 plate 중앙 끝 부분에 힘이 가해지면 스트레인 게이지 2의 값은 ADINA package data 를 통해서 얻은 X축 방향 스트레인 변화량 이 된다. 그리고 1,3 스트레인 게

이 지의 data 는 힘이 가해지는 축에 45도 각도로 위치 하고 있으므로 다음과 같은 관계에 의해서 data 가 결정 된다.

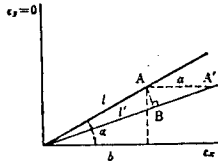


그림 14 주스트레인과 각도와의 관계

위의 그림 14와 같이 X축 방향에 주스트레인이 작용하고 Y축에는 스트레인이 0이라 할때 점 A는 A'로 이동하게 된다. 거리 AA'를 a, l의 X축 방향의 투영을 b라 할때 α방향의 스트레인은

$$\epsilon_{ax} = \epsilon_x * \cos^2 \alpha$$

그러므로 1,3 스트레인 게이지는 2 스트레인 게이지의 1/2 값을 가지게 된다. ($\cos^2 45 = 1/2$) 이상의 ADINA data 와 위의 공식을 이용하여 시뮬레이션을 해보면 다음 그림과 같다.

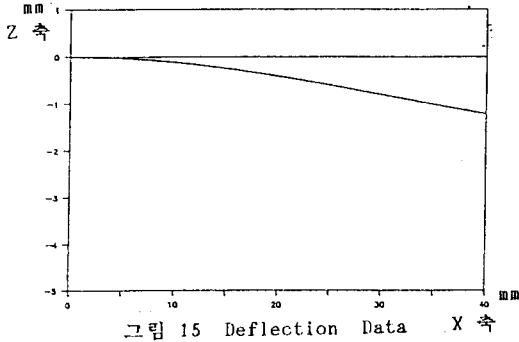


그림 15 Deflection Data X 축

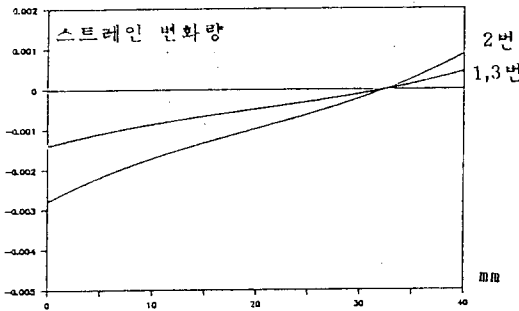


그림 16 시뮬레이션 결과

위의 그림은 node 15와 16 중앙에 일정한 힘이 가해졌을때 Z축 방향의 deflection 과 X축의 거리의 관계를 나타낸것이다.

아래 그림은 plate 의 스트레인 변화량을 X축의 길이에 따라 나타낸것이다. node 15 와 16 중앙에서 힘이 가해졌으므로 X축의 거리 32 mm에서의 스트레인 값은 0이 되며 스트레인 게이지가 위치한 곳이 node 51,52 의 중앙 이므로 X 축의 거리 8 mm에서 1,2,3 스트레인 게이지의 값이 나오게 된다.

이때 1,3번 스트레인 게이지는 2번 스트레인 게이지의 반값을 갖게 된다.

또한 이를 실험하기 위하여 그리퍼에 스트레인 게이지를 달아 DC motor 를 제어 하여 한 node 에

힘이 가해 지도록 하면 다음 그림과 같은 결과가 나온다.

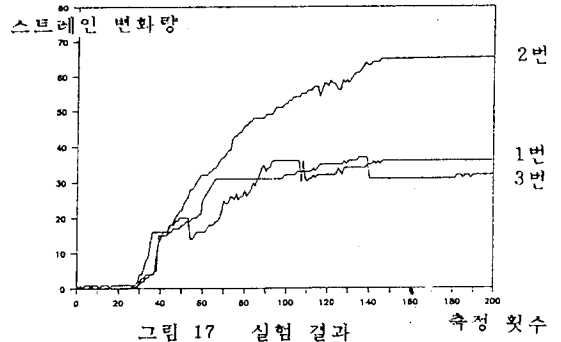


그림 17 실험 결과

그림의 Y축은 스트레인 의 변화량을 뜻하는데 증폭기를 통과한 값이 된다. X축은 sensor control board 에서 스트레인 게이지 1,2,3 의 스트레인 변화량을 읽는 횟수를 나타 낸다. 이 변화량이 Dual Port Ram 을 통하여 IBM-PC에 전달 되게 된다.

1,2,3 스트레인 게이지 의 data 가 32 부근에서 갑자기 튀게 되는 때는 물체와 fingertip 의 접촉 순간 이며 140 부근 에서 부터 스트레인 의 변화량이 일정한 값을 갖는 것은 그 지점에서의 motor 의 토크가 plate 의 deflection moment 의 크기 보다 작아 졌기 때문이다.

그러므로 이 지점 부터는 fingertip 의 운동이 멈춰져서 일정한 스트레인 값이 나타나게 된다. 이상의 과정을 각 node 마다 실험해 보면 각 node 와 스트레인 게이지 의 중심부분의 각도에 따라 스트레인 값에 큰 변화가 있음을 알수 있다.

예를 들어 node 17 에 힘이 가해 졌다면 node 17 에서 스트레인 게이지 1번과는 71.5도, 2번과는 26.5도, 3번과는 18.43도의 각도를 가지고 있게 된다.

그러므로 1,2,3번 스트레인 게이지의 출력비는 1:8:9 의 비를 가지게 된다. 시뮬레이션 결과 및 실험 결과는 다음 그림과 같다.

이상과 같은 실험을 각 node 에서 모두 수행하고 이의 실험 결과 와 시뮬레이션 결과를 모두 얻어 이를 토대로 그리퍼가 물체와 닿을때 정확한 인식을 할수 있다. 또한 스트레인 값의 크기가 gripping force 와 연관 되므로 이를 이용하여 물체를 더욱 안정되게 잡을수 있다.

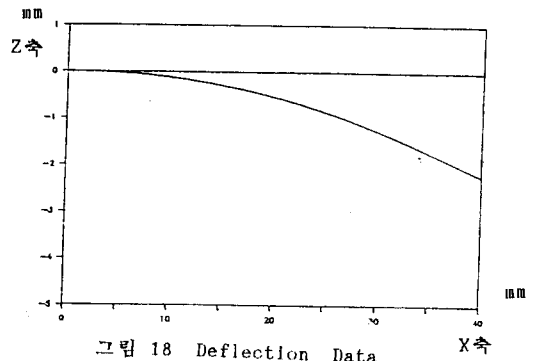


그림 18 Deflection Data X 축

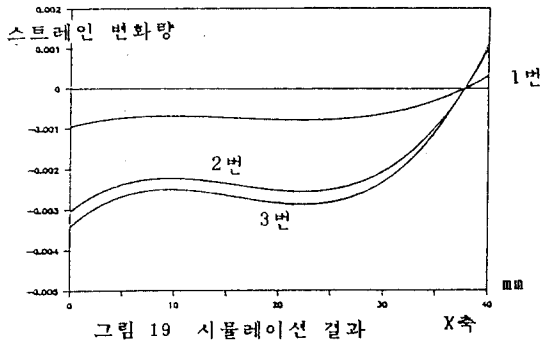


그림 19 시뮬레이션 결과

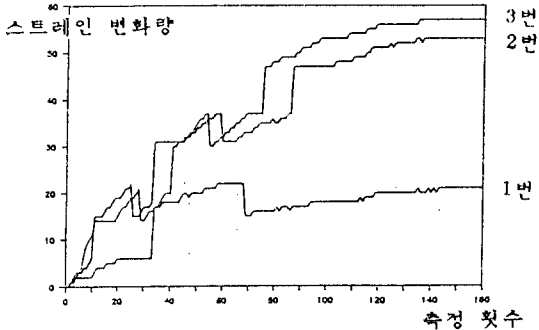


그림 20 실험 결과

3. 결 론

기존의 그리퍼는 로보트 프로그램에 따라 단순한 pick-and-place의 역할을 했다. 그러나 그리퍼 자체에 센서를 부착하여 지능적인 기능, 즉 외부의 환경에 대응하여 스스로 반응할 수 있는 기능을 수행할 수 있다면 한 그리퍼가 하나의 작업에만 적용되는 것에서 벗어나 여러 작업에서 다양한 기능을 수행하고, 또한 조립 작업시 물체의 상태를 알아 내는 것이 가능해 지므로 더욱 정확하고 안정성 높은 작업과 보다 많은 응용을 할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 그리퍼에 스트레인 게이지 센서를 부착하여 물체와 그리퍼의 fingertip과의 접촉 위치를 알아내고 힘을 제어 할 수 있는 시스템을 제작하여 지금까지 센서 정보 처리 기능이 전혀 없던 기존의 PUMA 로보트에 센서 정보를 처리할 수 있는 능력을 부여 하여 조립 작업을 제대로 수행 할 수 있도록 했다.

참 고 문 헌

[1] Paolo Fiorini, " A Versatile Hand for Manipulators " IEEE Control Systems Magazine, pp.20- 24, October 1988.
 [2] James A. Maples and Joseph J. Becker, " Experiments In Force Control of Robotic Manipulators," IEEE
 [3] Dragan Stokic and Miomir Vukobratovic, " Implementation of Force Feedback in Manipulation Robots," Int. J. Robotics Res., vol.5, no.1, Spring 1986.

[4] S.D. Kim, H.S. Cho, C.W. Lee, " Performance Enhancement of a Grasping Force Control System for Robot Grippers via a Modified On-Off Controller," Toward the Factory of the Future, pp.585-590

[5] M.K. Brown, " Computer Simulation of Controlled Impedance Robot Hand,"

[6] Daniel E. Whitney, " Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control," Int.J.Robotics Res., vol.6, no.1, Spring 1987.

[7] R.T Cunningham, T.L. Brooks, R.S. Dotson, " Smart Force/Torque Sensing Systems for Robots,"

[8] John W. Jameson and Larry J. Leifer, " Automatic Grasping: An Optimization Approach," IEEE Tran. on Syst, Man, and Cybern., vol. SMC-17, no.5, September/October 1987.

[9] Ronald S. Fearing, " Simplified Grasping and manipulation with Dextrous Robot Hands," IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA-2, no.4, December 1986.

[10] Kiyoshi Ohishi, Masato Nakao, Kouhei Ohnishi and Kunio Miyachi, " Microprocessor Controlled DC Motor for Load Insensitive Position Servo System," IECON'85 pp.339-344

[11] Roy Testman, " Sensor Resolution Questions for Flexible Robot Positioning," Conference on Applied Motion Control 1987 pp.145-149

[12] R.C. Luo, J.Y. Chang, " Robot Grasping Force Control Using Force/Slip Sensory Feedback System," IECON'85 pp.313-318

[13] S. Payandeh, A.A. Goldenberg, " A Knowledge-Based Approach to Grasping," IECON'88 pp.264-269

[14] Jacki Caro, Jacques Dufour, Alain Jakubowicz, " A Microprocessor-Based Position Control of a DC Drive Taking into Account the Load's Variations," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA- 22, no.6, November/December 1986

[15] Ren-Chyuan Luo, David Grande, " Servo-Controlled Gripper with Sensors for Flexible Assembly," IEEE 1984

[16] 한 응교, 스트레인 게이지 - 이론과 응용 -, 보성 문화사, 1976.7.15

[17] Ferdinand P. Beer, E. Russel Johnston, Jr. Mechanics of Materials SI Metric Edition, McGraw-Hill, 1987