

조립용 로봇의 힘·토크 센서 및 컴플라이언스 알고리즘의 개발

고 낙 용, 고 명 삼, 하 인 증, 이 범 희

서울대학교 제어계측공학과, 로봇·지능시스템 연구실

Development of Force/Torque Sensor and Compliance Algorithm  
for Assembly Robots

Nak Yong Ko, Myoung Sam Ko, In Joong Ha, Bum Hee Lee  
Dept. of Control & Instrumentation Engineering, Robotics & Intelligent Systems Lab.  
Seoul National University

ABSTRACT

The force/torque sensor for robot is developed. The compliance algorithm for peg-in-hole insertion task using the force/torque sensor is developed.

The system consists of an IBM PC, robot, force/torque sensor, strain meter, A/D board, and interface board. The IBM PC functions as a main processor and the robot controller as a slave processor. The sensor is constructed to measure  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$ ,  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  which are necessary to precisely execute a peg-in-hole insertion task by SCARA type assembly robot.

The outputs of sensor are analyzed. On the basis of the analysis, compliance algorithm for peg-in-hole insertion task is developed.

Some comments concerning the development of wrist force/torque sensor and compliance algorithm are given.

1. 서론

로봇의 작업형태는 물건을 집어서 다른 곳에 위치시키는 작업이 주를 이루어 왔다. 1), 2) 그러나, 로봇과 작업 대상 물간에 접촉에 의하여 발생하는 힘과 토크를 알 수 있으면, 로봇이 동작을 수행하는 중 외부와의 접촉에 의한 힘이나 충격에 대하여 반응할 수 있는 능력, 즉 컴플라이언스 기능을 가지게 된다. 3) 이러한 컴플라이언스 기능을 통하여, 팩인홀에 끼워서 조립하는 작업(peg-in-hole, 이하 팩인홀이라 명칭한다.)과 평면을 추적하는 작업, 디버링 작업, 크랭크를 돌리는 작업등과 같은, 단순한 위치제어만으로 성취하기 어려운 작업들을 할 수 있다. 4), 5)

컴플라이언스를 위해서 필수적인 힘·토크 정보를 얻어내는 여러가지 방법들이 있다. 1), 3), 4), 5), 6) 본 연구에서는 힘·토크 정보를 얻어내기 위하여 손목 힘·토크 센서 시스템(wrist force/torque sensor system)을 개발하고, 팩

인홀 작업에 대한 컴플라이언스 알고리즘을 개발하여 SCARA형 로봇인 TOSHIBA SR414H로 팩인홀 작업을 실행하였다. 7)

2. 전체 시스템의 구성과 기능

전체 시스템의 하드웨어 구성은 그림 1과 같다. 로봇의 마지막 링크의 끝에 힘·토크 센서가 부착되어 있다. 이 센서의 출력 전압은 스트레인 증폭기와 A/D 변환기를 통하여 IBM-PC로 입력된다. 입력된 센서로부터의 정보와 컴플라이언스 알고리즘에 따라서 IBM-PC는 로봇에 적절한 동작을 명령한다. 로봇은 입출력 채널의 명령에 따라 적절한 프로그램으로 분기하여 동작을 수행한다.

3. 손목 힘·토크 센서의 구조와 출력 해석

3.1 센서의 구조

본 연구에서 제작한 손목 힘·토크 센서의 구조는 그림 2와 같다. 이 센서는 상업적으로 이용할 목적이 아니고 팩인홀 작업에서 컴플라이언스 기능을 수행하기에 적합한 용도로 개발하였다.

크로스 바(cross bar) 형태를 가진 구조물의, 4개의 바(bar)에 각각 2개의 스트레인 게이지(strain gage)를 서로 마주보는 면에 부착하여 2 게이지법에 의하여 4개의 센서 출력 전압을 얻는다. 8)

3.2 스트레인 게이지의 부착 위치, 개수와 힘·토크 측정 성분과의 관계

일반적으로 그림 3과 같은 구조를 가진 센서에서는 16개의 스트레인 게이지로부터 2 게이지법에 의하여 8개의 출력을 얻을 수 있다. 그런데 힘·토크 센서를 사용하여 얻고자 하는 힘·토크는  $F_x, F_y, F_z, T_x, T_y, T_z$ 의 6가지가 된다. 따라서 8개의 출력중 서로 독립인 6개의 출력을 가려내다면, 그 6개의 출력으로부터 6개의 힘·토크 성분을 모두 구할 수 있다.

그림 3과 같이 센서에 부착된 스트레인 게이지 쌍의 번호와 센서의 좌표계를 정의하면, 힘·토크와 센서의 출력 전압 사이의 관계를 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 1)

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & C_{16} & 0 & 0 & 0 & C_{17} & 0 \\ C_{21} & 0 & 0 & 0 & C_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{32} & 0 & C_{34} & 0 & C_{36} & 0 & C_{38} \\ 0 & C_{42} & 0 & 0 & 0 & C_{46} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{54} & 0 & 0 & 0 & C_{58} \\ C_{61} & 0 & C_{63} & 0 & C_{65} & 0 & C_{67} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \\ \epsilon_7 \\ \epsilon_8 \end{pmatrix} \quad \dots(1)$$

$\epsilon_i$  : 스트레인 게이지 쌍  $i$ 로 부터의 출력 전압(volt)  
 $i = 1, \dots, 8$

$C_{ij}$  : 스트레인 게이지 쌍  $j$ 의 출력전압이  $i$ 번째 힘.토크오크 성분에 미치는 영향에 관한 비례상수,  
 (N/volt,  $i = 1, 2, 3$ ;  
 Nm/volt,  $i = 4, 5, 6$ )

만일 스트레인 게이지 쌍 1,3,5,7의 감도가 서로 같고,  
 스트레인 게이지 쌍 2,4,6,8의 감도가 서로 같다면 다음과 같은 결과가 나온다.

$$\left. \begin{matrix} C_{13}:C_{17} & 1:-1 & C_{21}:C_{25} & 1:-1 \\ C_{32}:C_{34} & C_{36}:C_{38} & 1:1:1:1 \\ C_{42}:C_{46} & 1:1 & C_{54}:C_{58} & 1:-1 \\ C_{61}:C_{63}:C_{65}:C_{67} & 1:1:1:1 \end{matrix} \right\} \quad \dots(2)$$

식(1)의 우변의 첫째 행렬을  $c$ 라 하고, (2)가 성립한다면  $c$ 의 랭크(rank)는 다음 행렬  $C_1$ 의 랭크와 같다.

$$C_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \dots(3)$$

$C_1$ 의 rank가 6이므로  $c$ 의 rank가 6이 되며  $\epsilon_1 \sim \epsilon_8$ 로부터 6개의 힘.토크오크를 모두 구할 수 있다.

8개의 출력중  $\epsilon_i$ 와  $\epsilon_j$ 를 제외시키는 것은  $c$ 에서  $i$ 번째 열과,  $j$ 번째 열을 없애는 것과 같은 효과가 있다.  $C_1$ 에서  $i$ 번째 열과,  $j$ 번째 열을 없애면  $6 \times 6$  행렬의 rank가 6이면  $\epsilon_i, \epsilon_j$ 가 없어도 6개의 힘.토크오크 성분을 구할 수 있다.

8개의 열에서 2개를 제외시키는 방법의 수는  $8C_2 = 28$ 가지가 있다. 이들중  $i$ 번째 열과  $j$ 번째 열을 없애면  $6 \times 6$  행렬의 rank를 6으로 보존하는 경우의  $(i, j)$ 쌍은 다음과 같이 16가지가 있다.

$$\left. \begin{matrix} (1,2), (1,4), (1,6), (1,8) \\ (2,3), (2,5), (2,7), (3,4) \\ (3,6), (3,8), (4,5), (4,7) \\ (5,6), (5,8), (6,7), (7,8) \end{matrix} \right\} \quad \dots(4)$$

즉, (4)에 열거한  $(i, j)$ 쌍에 따른  $\epsilon_i, \epsilon_j$  출력이 없어도 6개의 힘.토크오크 성분을 구할 수 있다.

$\epsilon_2, \epsilon_4, \epsilon_6, \epsilon_8$ 에 의하여 구할 수 있는 힘.토크오크 성분은  $c$ 에서 1,3,5,7 열을

제외한 행렬로 부터 다음과 같이 알아낸다.

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{32} & C_{34} & C_{36} & C_{38} \\ C_{42} & 0 & C_{46} & 0 \\ 0 & C_{54} & 0 & C_{58} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_2 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_6 \\ \epsilon_8 \end{pmatrix} \quad \dots(5)$$

식(5)에서 항상  $F_x = F_y = T_x = 0$ 이다. 즉  $\epsilon_2, \epsilon_4, \epsilon_6, \epsilon_8$ 에 의하여  $F_x, F_y, T_z$ 는 구할 수 없고,  $F_z, T_x, T_y$  성분만을 구할 수 있다.

### 3.3 센서의 출력값 해석

다음과 같은 가정하에 팩.홀의 접촉 상태와 센서의 출력 전압 사이의 관계를 해석한다.

- 가정1) SCARA 형 로봇트를 이용하여 팩의 Approach vector는 항상 홀의 방향과 일치시킨다.
- 가정2) 팩의 밑면과 홀의 주위가 접촉할 때는 항상 그림4(a)처럼 면을 이루며, 접촉면의 각점에 작용하는 압력  $P$  (Pressure=force/area)는 전 접촉면에 대하여 일정하다.
- 가정3) 팩과 홀의 반지름은 똑같이  $r$ 이다.

이와 같이 가정하면 팩 인출 작업에서는  $F_x, F_y, T_z$  성분의 힘은 발생하지 않는다. 따라서 실제로 제작한 센서는 그림 3의 8개의 스트레인 게이지 쌍 중에서 2,4,6,8번만을 부착하고, 각 스트레인 게이지 쌍에 대하여  $\frac{1}{2}$  게이지 회로를 그림 5에서와 같이 구성하여  $F_z, T_x, T_y$ 를 측정할 수 있게 하였다.

$S_1, S_2, S_3, S_4$ 를 다음과 같이 정의하고, 팩과 홀이 접촉 하였을 때의 센서의 출력을 해석한다.

- $S_1$  : 스트레인 게이지 쌍 2의 출력 전압
- $S_2$  : 스트레인 게이지 쌍 8의 출력 전압
- $S_3$  : 스트레인 게이지 쌍 6의 출력 전압
- $S_4$  : 스트레인 게이지 쌍 4의 출력 전압

(1) 팩.홀 접촉면의 중심 대칭선이 센서의  $x_s$ 축과 일치 하는 경우

그림 6 처럼 팩과 홀이 접촉했을 때의 센서 출력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_1 &= A_1 \cdot T_y + B_1 \cdot F_z \\ &= A_1 \cdot \int_A P \cdot x \cdot dA + B_1 \cdot \int_A P \cdot dA \quad \dots(6) \\ &= A_1 \cdot P \cdot A_{cx} + B_1 \cdot P \cdot A_r \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_2 &= A_2 \cdot T_x + B_2 \cdot F_z \\ &= A_2 \cdot \int_A P \cdot y \cdot dA + B_2 \cdot \int_A P \cdot dA \quad \dots(7) \\ &= B_2 \cdot P \cdot A_r \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_3 &= -A_3 \cdot T_y + B_3 \cdot F_z \\ &= -A_3 \cdot \int_A P \cdot x \cdot dA + B_3 \cdot \int_A P \cdot dA \quad \dots(8) \\ &= -A_3 \cdot P \cdot A_{cx} + B_3 \cdot P \cdot A_r \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_4 &= -A_4 \cdot T_x + B_4 \cdot F_z \\ &= -A_4 \cdot \int_A P \cdot y \cdot dA + B_4 \cdot \int_A P \cdot dA \quad \dots(9) \\ &= B_4 \cdot P \cdot A_r \end{aligned}$$

$A_i$  :  $T_j$ 에 의한 스트레인 게이지 쌍  $i$ 의 출력전압의

비례상수  $(i = 1, 2, 3, 4$   
 $j = y, x, t, x$ )

$B_i$  :  $F_z$ 에 의한 스트레인 게이지 쌍  $i$ 의 출력전압의  
비례상수  $i = 1, 2, 3, 4$

식(6)-(9)에서의  $A_r, A_{cx}, A_{cy}$ 는 다음과 같다.

$$A_r = \int_A dA = d \cdot r \cdot D + \pi r^2 - 2r^2 \sin^{-1}(D) \quad \dots (10)$$

$$A_{cx} = \int_A x dA = d \cdot r^2 \sin^{-1}(D) - \frac{d^2 r \cdot D}{2} \quad \dots (11)$$

$$A_{cy} = \int_A y dA = 0 \quad \dots (12)$$

$$D = \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2r}\right)^2} \quad \dots (13)$$

그림 6의  $(x_s, y_s)$  평면상에서 접촉면의 centroid,

$(x_{c1}, y_{c1})$ 은 다음과 같이 구해진다.

$$x_{c1} = \frac{\int_A x dA}{\int_A dA} = \frac{A_{cx}}{A_r} \quad \dots (14)$$

$$y_{c1} = \frac{\int_A y dA}{\int_A dA} = 0 \quad \dots (15)$$

$x_{c1}$ 과  $y_{c1}$ 를 이용해서  $s_1, s_2, s_3, s_4$ 를 구한다.

$$S_1 = A_1 \cdot F_z \cdot x_{c1} + B_1 \cdot F_z \quad \dots (16)$$

$$S_2 = A_2 \cdot F_z \cdot y_{c1} + B_2 \cdot F_z \quad \dots (17)$$

$$S_3 = -A_3 \cdot F_z \cdot x_{c1} + B_3 \cdot F_z \quad \dots (18)$$

$$S_4 = -A_4 \cdot F_z \cdot y_{c1} + B_4 \cdot F_z \quad \dots (19)$$

$F_z = P \cdot A_r$ 과 식(14), (15)를 이용하면 식(16)-(19)는 식(6)-(9)와 같음을 알 수 있다.

(2) 팩·홀 접촉면의 중심 대칭선이 센서의  $x_s$  축과  $\psi$ 의 각을 이루는 경우

그림 7에서와 같이 홀이 접촉했을 때의 센서 출력은 구한다. 접촉면의 centroid는 다음과 같이 계산된다.

$$x_{c2} = \frac{\int_A x dA}{\int_A dA} = \frac{A_{cx}}{A_r} \cos \psi = x_{c1} \cdot \cos \psi \quad \dots (20)$$

$$y_{c2} = \frac{\int_A y dA}{\int_A dA} = \frac{A_{cy}}{A_r} \sin \psi = x_{c1} \cdot \sin \psi \quad \dots (21)$$

센서의 출력  $s_1, s_2, s_3, s_4$ 는 다음과 같다.

$$S_1 = A_1 \cdot F_z \cdot x_{c2} + B_1 \cdot F_z + A_1 \cdot P \cdot A_{cx} \cdot \cos \psi + B_1 \cdot P \cdot A_r \quad \dots (22)$$

$$S_2 = A_2 \cdot F_z \cdot y_{c2} + B_2 \cdot F_z + A_2 \cdot P \cdot A_{cy} \cdot \sin \psi + B_2 \cdot P \cdot A_r \quad \dots (23)$$

$$S_3 = -A_3 \cdot F_z \cdot x_{c2} + B_3 \cdot F_z - A_3 \cdot P \cdot A_{cx} \cdot \cos \psi + B_3 \cdot P \cdot A_r \quad \dots (24)$$

$$S_4 = -A_4 \cdot F_z \cdot y_{c2} + B_4 \cdot F_z - A_4 \cdot P \cdot A_{cy} \cdot \sin \psi + B_4 \cdot P \cdot A_r \quad \dots (25)$$

각 출력들의 첫째 항들은 식(6)-(9)의 첫째 항에  $\cos \psi$ 나  $\sin \psi$ 를 곱한 형태들을 가짐을 알 수 있다.

만일  $A_1=A_2=A_3=A_4=A$ ,  $B_1=B_2=B_3=B_4=B$  이면,

$$S_1 + S_3 = S_2 + S_4 = 2B \cdot P \cdot A_r = 2B \cdot F_z \quad \dots (26)$$

가 되어,  $s_1, s_2, s_3, s_4$ 에서  $F_z$ 에 의한 영향을 제거하여 순수한 토크에 의한 출력값의 성분을 알아낼 수 있다.

그리고 출력 성분중  $F_z$ 에 의한 값을  $S_{Fz}$ 라 하면

$$S_{Fz} = \frac{S_1 + S_3}{2} = \frac{S_2 + S_4}{2} \quad \dots (27)$$

임을 알 수 있다.

그러나 실제로는  $A_1=A_2=A_3=A_4$ ,  $B_1=B_2=B_3=B_4$  이므로, 센서에서 얻은 출력  $s_1, s_2, s_3, s_4$ 를 보정(calibration)하여  $A_1=A_2=A_3=A_4$ ,  $B_1=B_2=B_3=B_4$ 인 경우의 출력값으로 환산하는 과정이 필요하다.  $s_1, s_2, s_3, s_4$ 를 보정하려면  $s_1, s_2, s_3, s_4$ 에 보정인수(calibration factor)  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 를 곱한다.  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 는 실험에 의해서 구한 스트레인 게이지 쌍 2, 8, 6, 4의 감도의 역수에 비례한다.

$$(\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 : \alpha_4) = (1/s_{v_2} : 1/s_{v_8} : 1/s_{v_6} : 1/s_{v_4}) \quad \dots (28)$$

$s_{v_i}$  : 스트레인 게이지 쌍  $i$ 로 부터의 출력의 감도

(volt/torque)

(3) 팩과 홀의 접촉시의 상대 위치 결정

팩이 홀의 입구 부분에 접촉했을 경우의 홀에 대한 팩의 위치는 그림 7에서 알 수 있듯이  $d$ 와  $\psi$ 에 의해서 결정된다.

$r \ll 2d$ 라 가정하고, 접촉면의 centroid가 그림 7과 같이  $(x_s, y_s)$ 상의 1 사분면에 있는 경우 식(22)-(25)로부터 다음과 같이  $d$ 와  $\psi$ 가 구해진다.

$$\psi = \tan^{-1} \left( \frac{S_2 - S_{Fz}}{S_1 - S_{Fz}} \right) \quad \dots (29)$$

$$d = \frac{\pi \cdot r}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{8 S_T}{r^2 \cdot \pi^2 \cdot A \cdot P \cdot \cos \psi}} \right) \quad \dots (30)$$

$$S_T = S_1 - S_{Fz} \quad \dots (31)$$

접촉면의 centroid가  $x_s$  축이나  $y_s$  축 상에 있는 경우  $s_1, s_2, s_3, s_4$ 의 대소관계는 표 1과 같다.

표 1. 접촉면의 centroid의 위치와 센서 출력값들과의 관계(1)

Table 1. Relationships between centroid position of contact surface and sensor outputs (1)

Centroid의 위치	$s_1, s_2, s_3, s_4$ 의 대소
$+x_s$ 축상	$s_1 > s_3, s_2 = s_4$
$+y_s$ 축상	$s_1 = s_4, s_2 > s_3$
$-x_s$ 축상	$s_1 < s_3, s_2 = s_4$
$-y_s$ 축상	$s_1 = s_3, s_2 < s_4$

접촉면 centroid가  $x_s$ 나  $y_s$  축상에 있지 않는 경우,  $s_1, s_2, s_3, s_4$ 의 대소 관계로부터, 팩·홀 접촉면의 centroid가  $(x_s, y_s)$  상의 어느 4분면 상에 있는지 알 수 있고, 식(29)에서와 같은 방법으로  $\psi$ 를 구할 수 있다.

팩·홀 접촉면의 centroid의 위치와  $s_1, s_2, s_3, s_4$ 의 대소 관계, 그리고  $\psi$ 는 표 2와 같이 요약된다.

표 2. 접촉면의 centroid의 위치와 센서 출력값들과의 관계 (2)

Table 2. Relationships between centroid position of contact surface and sensor outputs (2)

centroid의 (x <sub>s</sub> , y <sub>s</sub> )상의 위치	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> 의 대소관계	ψ
1 사분면	S <sub>1</sub> > S <sub>3</sub> S <sub>2</sub> > S <sub>4</sub>	$\tan^{-1}\left(\frac{S_2 - S_{Fz}}{S_1 - S_{Fz}}\right) + x_s$ 로부터 CCW방향
2 사분면	S <sub>1</sub> < S <sub>3</sub> S <sub>2</sub> > S <sub>4</sub>	$\tan^{-1}\left(\frac{S_3 - S_{Fz}}{S_2 - S_{Fz}}\right) + y_s$ 로부터 CCW방향
3 사분면	S <sub>1</sub> < S <sub>3</sub> S <sub>2</sub> < S <sub>4</sub>	$\tan^{-1}\left(\frac{S_4 - S_{Fz}}{S_3 - S_{Fz}}\right) - x_s$ 로부터 CCW방향
4 사분면	S <sub>1</sub> > S <sub>3</sub> S <sub>2</sub> > S <sub>4</sub>	$\tan^{-1}\left(\frac{S_1 - S_{Fz}}{S_4 - S_{Fz}}\right) - y_s$ 로부터 CCW방향

4. 팩 인 홀 작업에서의 컴플라이언스

4.1 센서 출력의 프리 프로세싱(pre-processing)

센서로부터의 출력 전압 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>를 먼저 프리 프로세싱하여, 새로이 구해진 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>에 의하여 컴플라이언스 동작을 결정한다. 프리 프로세싱에는 영점 조정(zero adjustment)과 보정(calibration)이 있다.

- (1) 영점 조정 : 실제로 센서와 작업 대상물 사이에 힘이 작용하지 않더라도 센서로부터의 출력 전압은 0이 되지 않는다. 따라서 센서 출력들로부터 이러한 편차값들을 항상 빼준다.
- (2) 보정 : 3.3.(2)절에서 언급한 바와 같이 α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub>, α<sub>3</sub>, α<sub>4</sub>를 구하여 영점 조정된 센서 출력값에 α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub>, α<sub>3</sub>, α<sub>4</sub>를 곱하여, A<sub>1</sub>=A<sub>2</sub>=A<sub>3</sub>=A<sub>4</sub>, B<sub>1</sub>=B<sub>2</sub>=B<sub>3</sub>=B<sub>4</sub> 일 경우의 센서 출력값들로 환산한다.

4.2 팩-홀 접촉시의 위치 관계 결정

3.3.(3)절의 표 1, 표 2에 의하여, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>로부터 팩-홀 접촉면의 centroid의 위치를 알아낼 수 있다.

팩이 홀안으로 완전히 조립되었을 때의 센서 출력값은

$$S_1 = S_2 = S_3 = S_4 > S_{th} \quad (32)$$

와 같이 된다. 여기에서 S<sub>th</sub>는 실험에 의해서 결정되는, 팩의 밀면이 홀의 밀면에 완전히 밀착되었음을 나타내는 센서의 출력값이다.

4.3 컴플라이언스 알고리즘

팩 인 홀 작업을 위해서 먼저 팩을 홀에 접근(approach)시킨다. 이때는 팩과 홀이 접촉했을 때, 그 위치관계를 알아낼 수 있을 만큼 팩이 홀에 접근한다고 가정한다.

IBM PC에서는 센서의 출력값을 받아들여 팩과 홀의 위치관계를 알아낸 후, 적절한 컴플라이언트 동작(compliant motion)을 하도록 로봇에 명령한다.

IBM PC에 프로그램된 컴플라이언스를 위한 알고리즘의 흐름도는 그림 8과 같다.

5. 실험 및 결과

센서 출력값의 힘과 토크에 대한 감도는 다음 표 3, 표 4와 같다.

표 3. 센서의 힘(F<sub>Z</sub>)에 대한 감도

Table 3. Sensitivity of sensor for force(F<sub>Z</sub>)

	SV1	SV2	SV3	SV4
sensitivity (volt/Kg·f)	0.259	0.273	0.294	0.206
SV1/SV3	0.881	0.929	1.000	0.701

표 4. 센서의 토크에 대한 감도

Table 4. Sensitivity of sensor for torque

	SV1	SV2	SV3	SV4
sensitivity (volt/kg·f·m)	154.3	160.0	180.0	128.6
SV1/SV3	0.857	0.889	1.000	0.714

지름 16mm의 팩을 지름 17mm의 홀에 넣는 작업을 실행하는 경우, 접근 단계에서 d < 2mm가 되면 팩 인 홀 작업을 성공적으로 실행할 수 있었다.

6. 결론

컴플라이언스 기능을 가지고 팩 인 홀 작업을 하기 위한 힘-토크 센서와 컴플라이언스 알고리즘을 개발하여, 팩 인 홀 작업을 실행하였다.

팩 인 홀 작업시 팩의 밀면과 홀의 입구의 접촉면이 그림 4(a)처럼 완전히 평행해야 하는데, 만일 그림 4(b)처럼 한 점에서 접촉이 일어나면 팩과 홀의 상대위치를 잘못 판단하게 된다. 그런데 실제로 팩의 밀면과 홀의 입구의 접촉면을 완전히 평행하게 유지하기가 어려울 뿐 아니라, 평행하더라도 d가 작은 범위에서만 팩과 홀의 상대위치를 판단할 수 있다. 그런데 그림 9에 보인 바와 같이 팩이나 홀에 챔퍼(chamfer)를 만들면 이러한 문제를 해결할 수 있다.

로봇의 입출력 채널을 통하여 컴퓨터와 로봇을 연결하므로 로봇과 컴퓨터사이의 신호 전달에 시간 지연이 커서, 작업시간이 오래 걸리고 신호 전달상의 제약때문에 언하는대로 로봇을 제어할 수 없는 단점이 있다. 이러한 단점들은, 센서 출력값을 받아 외부로부터의 힘과 접촉에 의하여 경로를 적절히 수정할 수 있는 컴플라이언스 기능을 로봇 제어기(controller)와 언어 자체내에 포함시킨 로봇 시스템을 만들거나, 로봇 제어기의 서보(servo) 부분을 제외한 나머지 부분을 전용의 컴퓨터로 대체하는 방법등에 의하여 해결한다.

참고 문헌

- [1] B.Shimano and B.Roth, "On Force Sensing Information and Its Use in Controlling Manipulators" Proceedings of the 8th ISIR, pp.119-126.
- [2] J.Kenneth Salisbury, "Active Stiffness Control of Manipulator in Cartesian Coordinates", Proceedings of 19th IEEE Conference on Decision and Control, pp.95-100, 1980.
- [3] M.T. Mason, "Robot Motion", MIT Press, 1982, pp.305-321.
- [4] Wesley E. Snyder, "Industrial Robots. Computer Interfacing and Control", Prentice-Hall, 1985, pp.216-234.

- [5] J.J Craig, "Introduction to Robotics", Addison-Wesley, 1986, pp. 255-280.
- [6] G. Plank and G. Hirzinger, "Controlling a R Robots Motion speed by a Force-Torque-Sensor for Deburring Problems", IFAC Information Control Problems in Manufacturing Technology, Maryland, USA, 1982.
- [7] TOSHIBA, "SR-414H Operation, Maintenance manual SCOL-I Manual".
- [8] 한응교, "스트레인 게이지", 보성 문화사, pp.140-169.

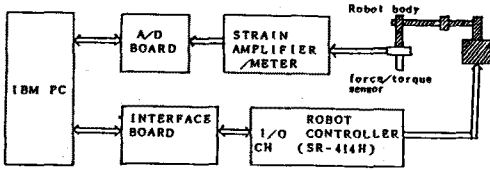


그림 1. 시스템의 하드웨어 구성도  
Fig.1 Block diagram of the hardware system

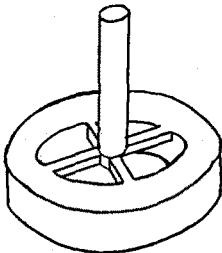


그림 2. 힘·토크 센서의 구조  
Fig.2 Structure of force/torque sensor

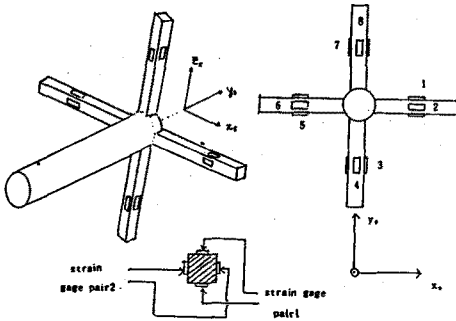


그림 3. 스트레인 게이지의 부착과 센서의 좌표계  
Fig.3 Cementing of strain gages and coordinate system of sensor

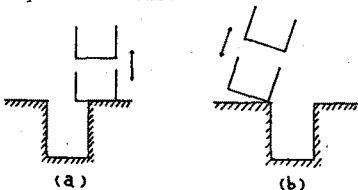


그림 4. 패과 홀의 접촉 (a) 면접촉 (b) 점접촉  
Fig. 4 Contact of peg and hole (a) surface contact (b) point contact

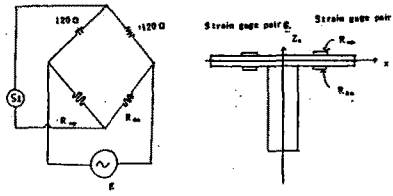


그림 5. 스트레인 게이지의 1/2 브리지 회로  
Fig.5 1/2 bridge circuit of strain gages

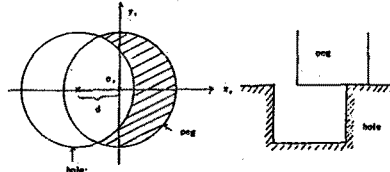


그림 6. 패·홀의 접촉면  
Fig.6 Contact surface of peg and hole (I)

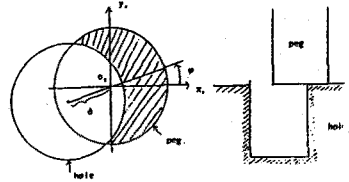


그림 7. 패·홀의 접촉면  
Fig.7 Contact surface of peg and hole (II)

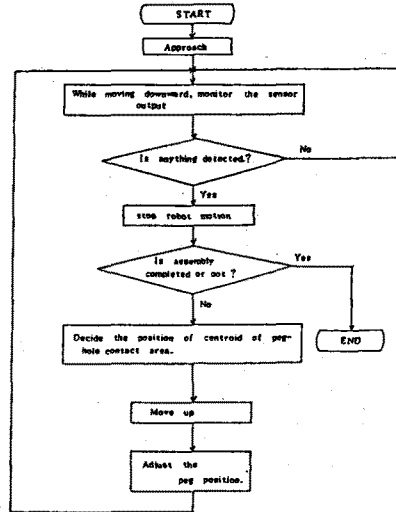


그림 8. 패 이 홀 자여움 의 하 컴플라이언스 알고리즘의 흐름도  
Fig.8 Flow chart of compliance algorithm for peg-hole insertion task

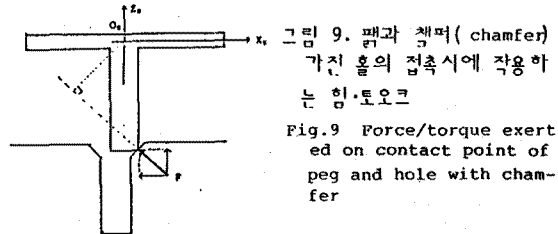


그림 9. 패과 챔퍼(chamfer) 가진 홀의 접촉시에 작용하는 힘·토크  
Fig.9 Force/torque exerted on contact point of peg and hole with chamfer