

論 文
37~8~9

# SCARA형 로봇을 위한 손목 힘/토크 센서의 출력 해석

## The Output Analysis of Wrist Force/ Torque Sensor for SCARA Type Robots

高明三\*·河仁重\*\*·李範熙\*\*·高樂溶<sup>§</sup>  
(Myoung-Sam Ko · In-Joong Ha · Bum-Hee Lee · Nak-Yong Ko)

### 요 약

로봇이 컴플라이언스 동작에 의하여 정밀한 조립 작업을 하기 위해서는 힘/토크 센서를 필요로 한다. SCARA형 로봇에 장착되어 팩인홀작업(peg in hole insertion task)을 하기 위한 십자가 구조를 가진 손목 힘/토크 센서의 출력에 대하여 해석하였다.

먼저 센서 출력과 그로부터 구해지는 힘/토크 성분간의 관계를 구하였다. 그리고 팩인홀 작업시 팩과 홀의 접촉 위치에 따른 센서의 출력을 구하고, 역으로 센서의 출력으로부터 팩·홀 접촉의 상대 위치를 구하였다. 위에서 얻은 결과를 이용하여 실험실에서 제작한 손목 힘/토크 센서를 SCARA형 로봇에 부착하고, 컴플라이언스 알고리즘을 작성하여 팩인홀 작업을 수행하였다.

**Abstract-**In order for a robot to carry out a precise assembly task with compliant motion, a force / torque sensor is needed. The output of the cross-bar structured force / torque sensor which is used in a peg-in-hole insertion task and attached to a SCARA type robot, is analyzed. First, the relationship between the sensor outputs and the force / torque components obtained by the outputs is investigated. Second, in a peg-in-hole insertion task, the sensor outputs changing with the contact position of the peg and the hole, are analyzed. Also, the relative position of the peg and the hole is obtained from the sensor outputs. The peg-in-hole insertion task is successfully executed, using a SCARA type robot with a wrist force / torque sensor manufactured in our laboratory and the compliance algorithm from the results of this paper.

### 1. 서 론

대부분의 산업용 로봇은 주로 물건을 집어서 다

른 곳에 위치시키는 작업을 하여왔다<sup>1)</sup> 그러나 정밀한 부품의 조립, 평면의 추삭, 디버링(deburring), 그리고 크랭크를 돌리는 것과 같은 작업을 하기 위해서는, 로봇은 동작을 수행하는 중 외부와의 접촉에 의한 힘이나 충격에 대하여 반응하여 동작하는 기능, 즉 컴플라이언스(compliance)기능을 가져야 한다.<sup>2), 3)</sup>

능동 컴플라이언스의 실현을 위해서는 외부로부터

\*正會員 : 서울대 工大 制御計測工學科 教授 · 工博  
 \*\*正會員 : 서울대 工大 制御計測工學科 助教授 · 工博  
 §正會員 : 서울대 大學院 制御計測工學科 博士課程  
 接受日字 : 1987年 9月 23日  
 1次修正 : 1988年 6月 20日

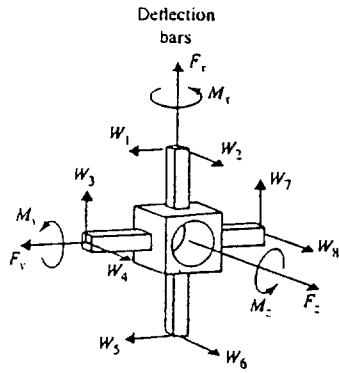
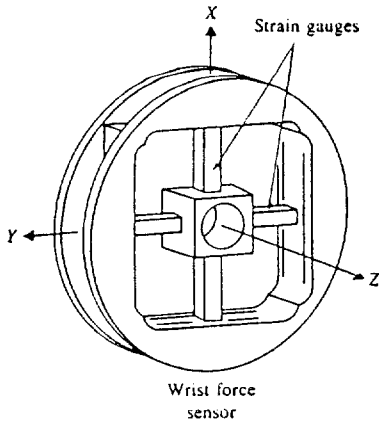


그림 1 Scheinman 손목 힘/토크 센서의 구조

Fig. 1 Structure of sheinman force/torque sensor.

터 로봇트 손(hand, end effector)에 가해지는 힘/토크 정보가 반드시 필요하다. 이 힘/토크 정보를 얻어내는 방법에는 로봇트의 팔목(wrist)에 센서를 다는 방법, 로봇트의 각 관절에 가해지는 토크로부터 손에 가해지는 힘/토크를 환산하는 방법, 작업대에 센서를 부착하는 방법등이 있다.<sup>4, 6, 7</sup> 이 중 로봇트의 팔목에 손목 힘/토크 센서를 부착하는 방법이 널리 쓰이고 있는데, 센서의 구조에는 여러가지 형태가 가능하나, 그림 1과 같은 십자가 모양의 구조를 각 면에 스트레인 게이지(strain gage)를 붙인 센서가 널리 알려져 있으며, 유연성(flexibility)이 있으면서 센서의 기능을 할 수 있도록 설계하여 수동 컴플라이언스와 능동 컴플라이언스 기능을 동시에 갖도록 설계한 것도 있다.<sup>8-13)</sup>

본 논문에서는 SCARA형 로봇트의 접근 벡터(approach vector)가 항상 작업대 평면에 대하여 수직으로 제한되어 있음을 고려하여, 그림 2와 같은 구조를 가진 센서가 SCARA형 로봇트에 장착되어, 전형적인 조립작업인 팩인홀작업(peg in hole insertion task)을 할 때, 팩에 가해지는 힘/토크 정보와 팩과 홀의 상대 위치 정보가 어떻게 센서 출력에 반영되는지 해석적으로 고찰하고, 그 결과를 이용하여 센서를 제작하고 팩인홀 작업의 알고리즘을 작성하여, 작업을 실행함으로써 결과의 실제적인 이용 가능성을 보이고자 한다. 따라서 그림 2와 같은 구조를 가진 힘/토크 센서를 대상으로 하여, 2장에서는 센서의 각 스트레인 게이지들로부터 얻어지는 전압 출력들과 그로부터 알아낼 수 있는 힘/토크 성분들과의 관계를 밝히고, 3장에서는 SCARA형 로봇트의 팩인홀 작업시 팩과 홀의 접촉 위

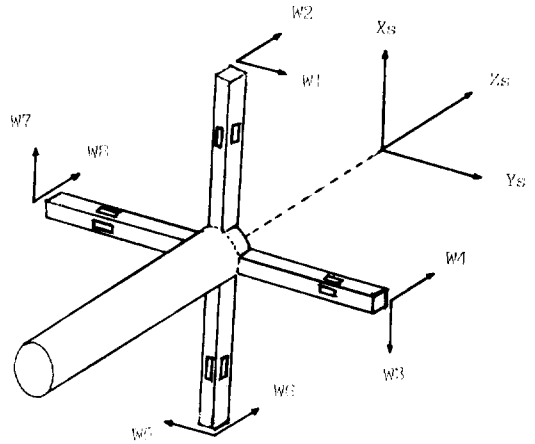


그림 2 손목 힘/토크 센서의 좌표축 정의.(센서 팩 일체)

Fig. 2 Definition of the coordinate frame of wrist force/torque sensor.(Sensor peg one body).

치에 따른 센서 출력에 대하여 해석하고, 역으로 센서 출력으로부터 팩·홀 접촉시의 위치 관계를 구한다. 4장에서는 그림 2와 같은 구조를 가진 힘/토크 센서를 제작하여 SCARA형 로봇트에 부착하여 2, 3장에서 얻은 결과를 이용하여 팩인홀 작업을 한 실험과 그 결과에 대하여 기술한다.

## 2. 센서 출력과 그로부터 구해지는 힘/토크 성분과의 관계

그림 2와 같은 구조를 가진 힘/토크 센서에서

는 마주보는 면에 위치한 스트레인 게이지들을 한 쌍으로 하여 2게이지법에 의해 하나의 출력 전압을 얻게되어 8개의 출력 전압을 얻을 수 있다.<sup>14)</sup> 그런데 힘/토크 센서로부터 얻고자 하는 힘/토크 성분들은 3차원상의 직교 좌표 x, y, z축 방향에 대한 힘과 토크  $F_x, F_y, F_z, T_x, T_y, T_z$ 의 6가지이며, 이 6개의 힘/토크 성분들은 각기 다른 5개의 힘/토크들의 선형 결합(linear combination)으로부터 얻어질 수 없다는 의미에서 서로 독립적인 성분들이다. 따라서 8개의 출력 성분 중 6개의 서로 독립인 출력들이 있다면 그 6개의 출력들로부터 6개의 힘/토크 성분을 모두 구할 수 있다.

8개의 센서 출력 중 6개의 힘/토크 성분들을 알아내는데 불필요한 2개의 출력들을 구해내는 방법은 다음과 같다.

그림 2와 같이 센서의 좌표계  $X_s, Y_s, Z_s$ 와 각각의 바(bar)에 가해지는 힘  $W_i$ 를 정의한다. 힘  $W_i$ 가 가해지면 그림 2의 i번째 스트레인 게이지 쌍으로부터 출력 전압  $S_i$ 가 나온다. 그리고 각 스트레인 게이지들은 이상적으로 부착되어 있어서 각 출력 성분들이 완전히 비결합(decoupling)되어 있다고 가정하면 (1)식에 의하여 센서 출력  $S_i$ 로부터 센서에 가해지는 힘/토크를 구할 수 있다.<sup>1)</sup>

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & C13 & 0 & 0 & 0 & C17 & 0 \\ C21 & 0 & 0 & 0 & C25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C32 & 0 & C34 & 0 & C36 & 0 & C38 \\ 0 & 0 & 0 & C44 & 0 & 0 & 0 & C48 \\ 0 & C52 & 0 & 0 & 0 & C56 & 0 & 0 \\ C61 & 0 & C63 & 0 & C65 & 0 & C67 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S1 \\ S2 \\ S3 \\ S4 \\ S5 \\ S6 \\ S7 \\ S8 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기에서

$C_{ij}$  : j번째 스트레인 게이지 쌍으로부터의 출력 전압이 i번째 힘/토크 성분 값에 미치는 영향에 관한 비례 상수.

(N/volt ( $i=1, 2, 3$ ), N·m/volt ( $i=4, 5, 6$ ),  $j=1, 2, \dots, 8$ )

윗 식을 (2)와 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$F = C \cdot S \quad (2)$$

센서의 출력  $S_i$ 와  $S_j$ 가 없을 때는 (2)식의 C는 i번째와 j번째 열이 없는 형태로 변환되고, 변환된  $6 \times 6$  행렬의 랭크(rank)가 6으로 유지되면,  $S_i$ ,

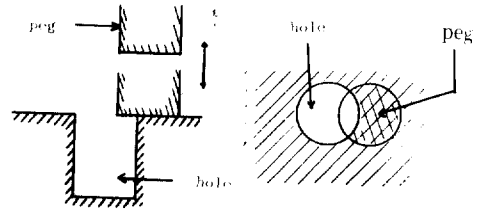


그림 3 팩인 홀

Fig. 3 Peg in hole insertion task.

...,  $S_8$  중  $S_i$ 와  $S_j$ 를 제외한 6개의 출력 성분이 서로 독립이어서  $S_i$ 와  $S_j$ 가 없더라도 6개의 힘/토크를 모두 구할 수 있다. 그런데 그림 3으로부터 C13은 음의 값, C17은 양의 값을 가짐을 알 수 있다. 모든  $C_{ij}$ 에 대한 양수, 음수의 판별은 다음과 같다.

$$\left. \begin{array}{l} C13 \rightarrow -, C17 \rightarrow +, C21 \rightarrow +, C25 \rightarrow - \\ C32 \rightarrow +, C34 \rightarrow +, C36 \rightarrow +, C38 \rightarrow + \\ C44 \rightarrow +, C48 \rightarrow -, C52 \rightarrow -, C56 \rightarrow + \\ C61 \rightarrow +, C63 \rightarrow +, C65 \rightarrow +, C67 \rightarrow + \end{array} \right\} (3)$$

여기에서 +는 양수임을, -는 음수임을 나타내고 있다.  $C_{ij}$ 의 양수, 음수에만 주목하여, C에서 변환된 행렬  $\underline{C}$ 의 랭크를 구할 수 있다.

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & - & 0 & 0 & 0 & + & 0 \\ + & 0 & 0 & 0 & - & 0 & 0 & 0 \\ 0 & + & 0 & + & 0 & + & 0 & + \\ 0 & 0 & 0 & + & 0 & 0 & 0 & - \\ 0 & - & 0 & 0 & 0 & + & 0 & 0 \\ + & 0 & + & 0 & + & 0 & + & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\underline{C}$ 의 랭크가 6이므로 C의 랭크도 6이 되어  $S_1, \dots, S_8$ 에서 6개의 힘/토크 성분을 모두 구할 수 있음을 확인할 수 있다. 그리고 C에서 i번째 열과 j번째 열을 제거한 행렬의 랭크는  $\underline{C}$ 에서 i번째 열과 j번째 열을 제거한 행렬의 랭크와 같다. 따라서  $\underline{C}$ 에서 i번째 열과 j번째 열을 없앴을 때  $\underline{C}$ 의 랭크를 6으로 유지하는 (i, j)쌍을 구하면, 8개의 센서 출력 중 6개의 힘/토크를 구함에 있어서 불필요한 2개의 출력 성분  $S_i, S_j$ 를 구한 것이 된다. 행렬  $\underline{C}$ 에서 2개의 열을 없애는 방법의 수는 28가지( ${}^8C_2 = 28$ )가 있고, 이들 중 i번째 열과 j번째 열을 제거한  $6 \times 6$  행렬의 랭크를 6으로 유지하는 (i, j) 쌍은 다음과 같다.

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

즉, 8 개의 센서 출력 중 (5)에 열거한(i, j)쌍에 따른 Si, Sj 출력이 없어도 6 개의 힘/토크오크 성분을 모두 구할 수 있다.

비슷한 방법을 사용하여, 몇 개의 센서 출력이 있을 때 그로부터 구할수 있는 힘/토크오크 성분들을 알아낼 수 있다. 예를 들어 센서의 출력 중 S2, S4, S6, S8만 있다면 식(1)은 식(6)으로 변환된다.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{32} & C_{34} & C_{36} & C_{38} \\ 0 & C_{44} & 0 & C_{48} \\ C_{52} & 0 & C_{56} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_2 \\ S_4 \\ S_6 \\ S_8 \end{bmatrix} \quad (6)$$

따라서 항상

$$F_x = F_y = T_z = 0 \quad (7)$$

가 되므로 S2, S4, S6, S8로부터 Fx, Fy, Tz는 구할 수 없고, Tx, Ty, Fz 성분만을 구할 수 있음을 알 수 있다.

### 3. 팩인홀 작업에서의 센서의 출력해석

조립용 로봇으로 팩인홀 작업을 할 때 손목 힘/토크오크 센서를 사용하는 이유는 센서의 출력으로부터 팩과 홀의 위치 관계를 알아내기 위해서이다. 3 장에서는 팩과 홀의 접촉시, 그들의 위치 관계에 따라서 센서의 출력이 어떤 형태로 나오게 되는지 해석하고, 역으로 센서의 출력으로부터 팩과 홀의 위치 관계를 알아내는 식을 유도한다.

그림 3 과 같이

- 1) 팩이 센서의 -Zs 방향에 있고
- 2) 팩의 접근 벡터(approach vector)는 항상 홀의 길이 방향과 일치하여 팩의 밑면과 홀의 주위면이 접촉할 때는 그림 3에 보인 바와 같이 면을 이루고, 접촉면의 각 점에 가해지는 압력 P는 전 접촉면에 대하여 일정하다고 가정한다.

위와 같이 가정하면 센서에 Fx, Fy, Tz 성분의 힘/토크오크가 가해지지 않으므로

$$S1 = S3 = S5 = S7 = 0 \quad (8)$$

이다. 따라서 (1)절, (2)절에서는 접촉면의 무게 중

심(centroid)이 (Xs, Ys) 평면상의 Xs축상에 있는 경우와, 1 사분면에 있는 경우에 대하여 S2, S4, S6, S8을 구하고 (3)절에서는 역으로 S2, S4, S6, S8로부터 팩과 홀의 위치 관계를 구한다.

(1) 팩·홀 접촉면의 무게 중심이 Xs축 상에 있는 경우

그림 4 와 같이 팩과 홀이 접촉했을 때의 센서 출력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_2 &= -A_2 \cdot T_y + B_2 \cdot F_z \\ &= -A_2 \cdot \int_A P \cdot (-X) \cdot dA + B_2 \cdot \int_A P \cdot dA \\ &= A_2 \cdot P \cdot A_{cx} + B_2 \cdot P \cdot A_r \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} S_4 &= A_4 \cdot T_x + B_4 \cdot F_z \\ &= A_4 \cdot \int_A P \cdot Y_i \cdot dA + B_4 \cdot \int_A P \cdot dA \\ &= B_4 \cdot P \cdot A_r \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} S_6 &= A_6 \cdot T_y + B_6 \cdot F_z \\ &= A_6 \cdot \int_A P \cdot (-X) \cdot dA + B_6 \cdot \int_A P \cdot dA \\ &= -A_6 \cdot P \cdot A_{cx} + B_6 \cdot P \cdot A_r \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} S_8 &= -A_8 \cdot T_x + B_8 \cdot F_z \\ &= -A_8 \cdot \int_A P \cdot Y \cdot dA + B_8 \cdot \int_A P \cdot dA \\ &= B_8 \cdot P \cdot A_r \end{aligned} \quad (12)$$

여기에서,

Ai : 스트레인 게이지 쌍 i의 출력 전압의 토크오크 (Tx, Ty)에 대한 비례 상수, (volt/N·m or volt/kg·f·m)

Bi : 스트레인 게이지 쌍 i의 출력 전압의 힘(Fz)에 대한 비례상수 (volt/N or volt/kg·f)

로서, 센서에 일정한 힘과 토크오크를 가했을 때 나오는 센서의 출력 전압으로부터 실험적으로 구해지며(4 장 참조),  $\int_A \cdot dA$ 는 그림 4의 빗금 친 면적에 대한 적분이다.

실제로 팩의 반지름이 r일때 홀의 반지름은 r + dr(dr > 0)이나, dr은 조립시의 여유(clearance)로

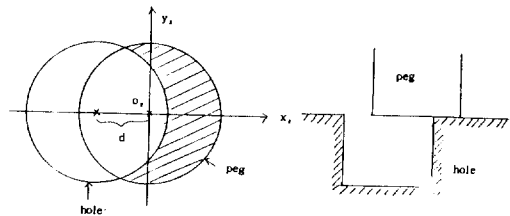


그림 4 팩과 홀의 접촉(1)  
Fig. 4 Contact of peg and hole(1).

서 실제 조립 작업에 있어서 r에 비해 매우 작으므로 계산 상의 편의를 위하여 홀의 반지름도 r로 하여 식(9)~(12)의 Ar, Acx, Acy를 구하면 다음과 같다.

$$Ar = \int_A dA = d \cdot r \cdot D + \pi \cdot r^2 - 2r^2 \cdot \arcsin D \quad (13)$$

$$Acx = \int_A X \cdot dA = d \cdot r^2 \cdot \arcsin D - d^2 \cdot r \cdot D/2 \quad (14)$$

$$Acy = \int_A Y \cdot dA = 0 \quad (15)$$

여기에서 D는 다음과 같다.

$$D = \sqrt{1 - (d/2r)^2} \quad (16)$$

그림 4의 (Xs, Ys) 평면상에서 빗금친 접촉면의 무게 중심(centroid)인 (Xcl, Ycl)은 다음과 같다.

$$Xcl = (\int_A X \cdot dA) / (\int_A dA) = Acx / Ar \quad (17)$$

$$Ycl = (\int_A Y \cdot dA) / (\int_A dA) = 0 \quad (18)$$

Xcl과 Ycl을 이용하여 S2, S4, S6, S8을 구하면

$$S2 = A2 \cdot Fz \cdot Xcl + B2 \cdot Fz \quad (19)$$

$$S4 = A4 \cdot Fz \cdot Ycl + B4 \cdot Fz \quad (20)$$

$$S6 = -A6 \cdot Fz \cdot Xcl + B6 \cdot Fz \quad (21)$$

$$S8 = -A8 \cdot Fz \cdot Ycl + B8 \cdot Fz \quad (22)$$

이고, 식(17), (18)과

$$Fz = P \cdot Ar \quad (23)$$

을 이용하면 식(19)~(22)는 식(9)~(12)와 같음을 알 수 있다.

(2) 팩·홀 접촉면의 무게 중심이 1사분면에 있는 경우

그림 5와 같이 팩과 홀이 접촉했을 경우의 센서 출력력을 구한다. (Xs, Ys)평면 상의 접촉면의 무게 중심(Xc2, Yc2)는 다음과 같다.

$$Xc2 = (\int_A X \cdot dA) / (\int_A dA) = (Acx / Ar) \cos \theta = Xcl \cdot \cos \theta \quad (24)$$

$$Yc2 = (\int_A Y \cdot dA) / (\int_A dA) = (Acx / Ar) \sin \theta = Xcl \cdot \sin \theta \quad (25)$$

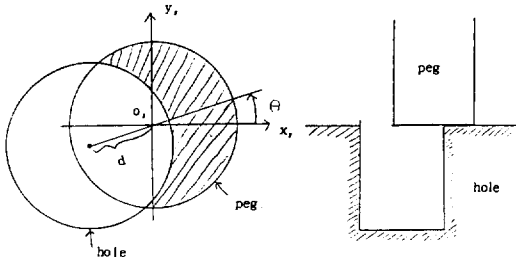


그림 5 팩과 홀의 접촉(2)

Fig. 5 Contact of peg and hole(2).

식(24), (25)를 이용하여 센서 출력 S2, S4, S6, S8을 구하면 다음과 같다.

$$S2 = A2 \cdot Fz \cdot Xc2 + B2 \cdot Fz = A2 \cdot P \cdot Acx \cdot \cos \theta + B2 \cdot P \cdot Ar \quad (26)$$

$$S4 = A4 \cdot Fz \cdot Yc2 + B4 \cdot Fz = A4 \cdot P \cdot Acx \cdot \sin \theta + B4 \cdot P \cdot Ar \quad (27)$$

$$S6 = -A6 \cdot Fz \cdot Xc2 + B6 \cdot Fz = -A6 \cdot P \cdot Acx \cdot \cos \theta + B6 \cdot P \cdot Ar \quad (28)$$

$$S8 = -A8 \cdot Fz \cdot Yc2 + B8 \cdot Fz = -A8 \cdot P \cdot Acx \cdot \sin \theta + B8 \cdot P \cdot Ar \quad (29)$$

각 출력들의 첫번째 항들은 식(9)~(12)의 첫째 항에  $\cos \theta$ 나  $\sin \theta$ 를 곱한 형태를 가진다.

만일  $A2 = A4 = A6 = A8 = A$ ,  $B2 = B4 = B6 = B8 = B$ 이면,

$$S2 + S6 = S4 + S8 = 2B \cdot P \cdot Ar = 2B \cdot Fz \quad (30)$$

가 되어, 각 출력 값에서 힘 Fz에 의한 출력 성분을 알 수 있고, 각 출력 값에서 힘에 의한 영향을 제거하여, 순수한 토오크에 의한 출력 성분을 알 수 있다. 출력 값에서 Fz에 의한 값을 Sfz라하면 Sfz는 식(31)과 같다.

$$Sfz = B \cdot Fz = (S2 + S6) / 2 = (S4 + S8) / 2 \quad (31)$$

(3) 팩·홀 접촉시의 상대 위치 결정

팩이 홀의 입구 부분에 접촉했을 경우, 홀에 대한 팩의 위치는 그림 5에서 알 수 있듯이 d와  $\theta$ 에 의해 결정된다.

접촉면의 무게 중심이 그림 5와 같이 (Xs, Ys)평면의 1사분면 상에 있는 경우, 식(26)~(29)를 이용하면 S2, S4, S6, S8로부터 식(32), (33)과 같이  $\theta$ 와 d가 구해진다.

$$\theta = \arctan\{(S4 - Sfz) / (S2 - Sfz)\} \quad (32)$$

$$d = (\pi \cdot r / 2) \cdot \frac{1}{(1 - \sqrt{1 - (8St) / (r^3 \cdot \pi^2 \cdot A \cdot P \cdot \cos \theta)})} \quad (33)$$

여기에서  $St = S2 - Sfz$  (34)

이고, 식(33)은 d가 2r에 비해 매우 작다고 가정하여,

$$\sqrt{1 - (d/2r)^2} \cong 1 \quad (35)$$

로하여 근사시켰다. (실제 조립 작업에서 d는 로봇의 반복 정밀도 범위(repeatability bound) 이내에 있어서 매우 작은 값이다.) 실제 작업시 P를 측정하지 못하므로 식(33)에 의해 d를 구할 수 없다. 식(33)은 St, P의 변화에 따른 d의 변화를 수식으로 설명하고 있다.

접촉면의 무게 중심이 Xs축이나 Ys축 상에 있는 경우 S2, S4, S6, S8의 대소 관계는 표 1과 같다.

접촉면의 무게 중심이 Xs나 Ys축 상에 있지 않

표 1 팩·홀 접촉시의 상대 위치 결정(1)

Table 1 Relative location of peg and hole in contact (1).

무게 중심의 위치	S2, S4, S6, S8의 대소 관계
+ Xs 축상	S2 > S6, S4 = S8
+ Ys 축상	S2 = S6, S4 > S8
- Xs 축상	S2 < S6, S4 = S8
- Ys 축상	S2 = S6, S4 < S8

표 2 팩·홀 접촉시의 상대 위치 결정

Table 2 Relative location of peg and hole in contact (2).

무게 중심의 (Xs, Ys)상의 위치	S2, S4, S6, S8의 대소 관계	$\theta$
1 사분면	S2 > S6 S4 > S8	$\arctan\{(S4 - Sfz) / (S2 - stz)\}$ + Xs로부터 CCW 방향 f
2 사분면	S2 < S6 S4 > S8	$\arctan\{(S6 - Sfz) / (S4 - Sfz)\}$ + Ys로부터 CCW 방향
3 사분면	S2 < S6 S4 < S8	$\arctan\{(S8 - Sfz) / (S6 - Sfz)\}$ - Xs로부터 CCW 방향
4 사분면	S2 > S6 S4 < S8	$\arctan\{(S2 - Sfz) / (S8 - Sfz)\}$ - Ys로부터 CCW 방향

은 경우, S2, S4, S6, S8의 대소 관계로부터 팩·홀 접촉면의 무게 중심이 (Xs, Ys)상의 어느 사분면 상에 있는지 알 수 있고, 식(2)와 같은 방법으로  $\theta$ 를 구할 수 있다. 팩·홀 접촉면의 무게 중심의 위치에 따른 S2, S4, S6, S8의 대소 관계와  $\theta$ 값은 표2와 같이 요약된다.

따라서 표1과 표2를 이용하면 팩인홀 작업시 팩이 홀의 입구 부분에 접촉했을 때 센서의 출력으로부터 팩과 홀의 상대 위치를 알아낼 수 있다.

4. 센서의 제작 및 팩인홀 작업에 관한 실험 및 결과

SCARA형 로봇으로, 3장에서 유도한 식들을 이

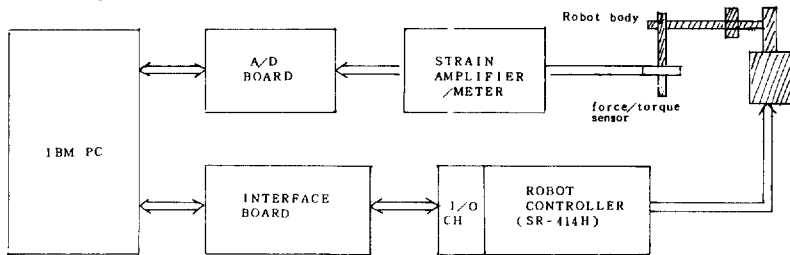


그림 6 실험을 위한 시스템의 구성도  
Fig. 6 Block diagram of the system for experiment.

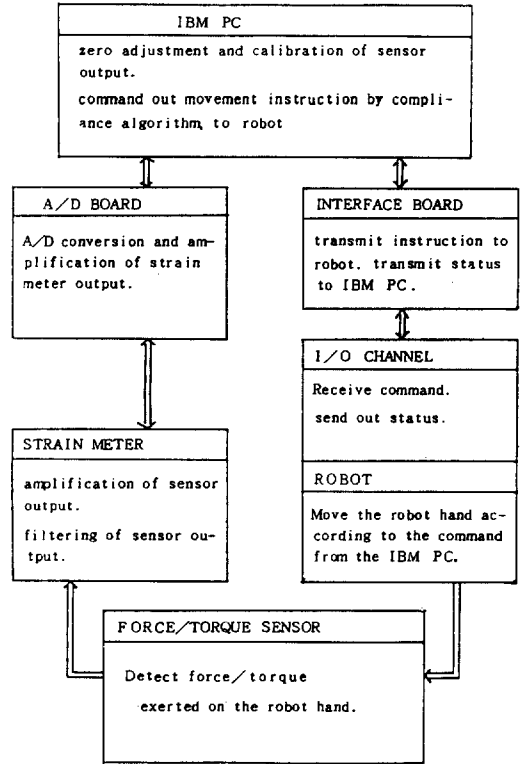


그림 7 시스템의 부분별 기능  
Fig. 7 Function of the system components.

용된 컴플라이언스 알고리즘에 의하여, 센서에 연결된 팩을 홀에 조립하는 작업을 수행하였다. 로봇의 마지막 링크의 방향(orientation)은 고정되어 있으며 팩의 밑면과 홀의 주위면을 항상 평행하게 유지시킨 상태에서 실험하였다.

실험을 수행하기 위한 전체적인 시스템의 구성은 그림 6과 같으며, 각 구성부의 기능은 그림 7과 같다. IBM PC는 스트레인 게이지로부터 신호를 받아서 팩과 홀이 접촉했을 경우, 그들의 상대 위치를 판단하고, 팩의 홀에 대한 위치 오차를 수정하도록, 로봇의 I/O 채널을 통하여, 로봇에 명령

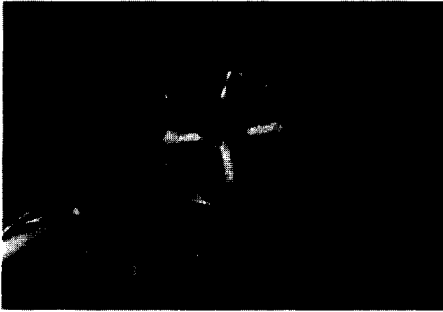


그림 8 제작한 센서의 구조  
Fig. 8 Structure of the sensor.

을 내린다.

대상 로봇으로는 TOSHIBA의 SCARA형 로봇인 SR-414H를 사용하였다. SR-414H는 I/O 채널의 값을 읽어들이어서 그에 따라 위치 수정을 위한 동작을 하도록 프로그래밍하였다.

제작한 센서의 구조는 그림8과 같으며 알루미늄을 재질로하였다. 실험의 설정상  $S1=S3=S5=S7=0$ 이므로, 그림2의 8개의 스트레인 게이지 쌍 중에서 2, 4, 6, 8 번째 스트레인 게이지 쌍들만 부착하였다. 대부분의 경우 로봇의 손목 센서는 로봇의 마지막 링크와 손 사이에 위치하게 되나, 이 실험에서는 센서와 팩을 한 몸체로 제작하여 팩에 가해질 힘이 손을 통하지 않고 직접 센서에 전달되게 하였다. 제작한 팩의 지름은 16mm이고 홀의 지름은 17mm이다.

팩의 끝부분에 팩의 길이 방향에 수직인 힘을 가하여  $T_x, T_y$ 에 대한 센서의 감도( $A_i$ )를 측정하였고(표3), 팩의 길이 방향으로 힘  $F_z$ 를 가하여 센서의  $F_z$ 에 대한 감도( $B_i$ )를 측정하였다.(표4)

팩과 홀의 위치관계중  $\theta$ 는 표1과 표2에 의해서 구해지나,  $d$ 의 경우는 식(33)에서  $P$ 를 알 수 없으므로

로 구할 수 없다. 실제로 본 실험에서는 표1과 표2에 의하여  $\theta$ 만을 구하고, 조립이 완료될때까지  $\theta$ 에 의한 위치 수정을 하도록 했다. 실제 센서의 출력( $S_i$ )에 각각  $C_i$ (식(36))를 곱하여, 실제 센서의 출력을  $A1=A2=A3=A4, B1=B2=B3=B4$ 인 경우의 출력 값으로 환산하여 표1과 표2를 적용하였다.

$$C_i = 2 / \{ (A_i/A3) + (B_i/B3) \} \tag{36}$$

팩인홀 작업을 위한 IBM PC내의 프로그램의 흐름도는 그림9와 같다. 그림9에서 팩의 위치를 조정(Adjust the peg position)할 때  $d$ 값을 모르므로,  $\theta$ 에 의해서 이동할 방향을 결정하여 일정한 거리(0.1mm)만큼 이동한 후 다시 루우프(loop)의 처음으로 되돌아 간다.

이와 같은 방법에 의하여 실험한 결과  $d > 2mm$ 인 경우에는 S2, S4, S6, S8의 값이 거의 비슷해지기 때문에 상대 위치를 판단해낼 수 없으나,  $d < 2mm$ 에서는 팩과 홀의 상대 위치를 판별하여 팩인홀 작업이 가능하다는 결과를 얻었다. 그림10에  $d=1.5mm$ 로 팩의  $-X_s$ 축 상에서 팩과 홀이 접촉했을 경우의 센서 출력을 도시하였다.  $t_1$ 에서 접촉이 일어난 후  $t_2 \sim t_3$ 에서 위치 수정을 하고,  $t_3$ 에서 다시 루우프의 처음부터 수행한다. S6의 값이 처음 접촉시 0.95 volt였고  $+X_s$  방향으로 위치를 0.1mm 수정한 뒤에는 0.85volt로 줄었으며, S2는 거의 0 volt로 유지된다. 이는 (19)~(22)를 팩과 홀이 팩의  $-X_s$  상에서 접촉했을 경우의 식으로 변환했을 때의 출력 패턴과 일치한다.

### 5. 결 론

로봇으로 능동 컴플라이언스를 실현하기 위해서 필요한 손목 힘/토크를 센서 가운데, 그림1과 같

표 3 센서의 토크( $T_x, T_y$ )에 대한 감도( $A_i$ )  
Table 3 Sensitivity( $A_i$ ) of sensor for torque( $T_x, T_y$ ).

No. of strain gage pair(i)	2	4	6	8
Sensitivity(volt/kg · f · m)	154.3	160.0	180.0	128.6
with respect to	$T_y$	$-T_x$	$-T_y$	$T_x$

표 4 센서의 힘( $F_z$ )에 대한 감도( $B_i$ )  
Table 4 Sensivity( $B_i$ ) of sensor for force( $F_z$ ).

No. of strain gage pair(i)	2	4	6	8
Sensitivity(volt/kg · f)	0.259	0.273	0.294	0.206

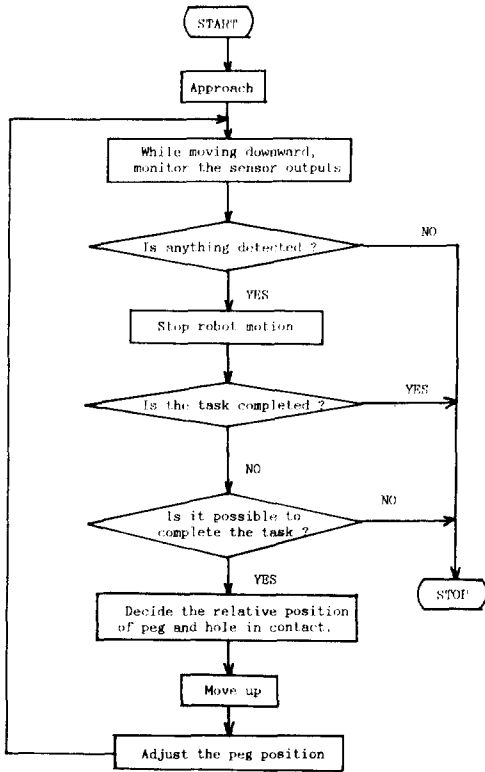


그림 9 팩인홀 작업을 위한 컴플라이언스 알고리즘  
 Fig. 9 Compliance algorithm for the peg in hole insertion task.

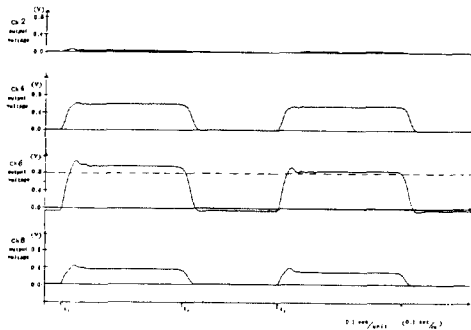


그림10 팩인홀 작업의 실험시 센서 출력의 동적 변화  
 Fig.10 Change of sensor outputs in the peg in hole insertion experiment.

은 구조를 가진 센서의 팩인홀 작업시의 출력을 해석하였다.

8 개의 센서 출력을 모두 사용하지 않고, 2 장의 (5)에 보인 바와 같은 센서의 출력들을 제외한 6 개의 센서 출력들만을 사용하여 6 개의 힘/토크 성분들을 모두 얻을 수 있다.

그리고 SCARA형의 로봇트를 사용하여 팩인홀 작업을 할 경우 3 장의 1), 2)와 같은 가정하에서 팩과 홀이 접촉했을 때, 팩·홀 접촉의 상대 위치에 다른 센서의 출력을 해석적으로 구하였고, 역으로 센서의 출력으로부터 팩과 홀의 상대적인 위치를 알아내는 식을 유도하였다.

본 논문에서 유도한 센서의 출력과 측정할 수 있는 힘/토크 성분과의 관계는 힘/토크 센서를 개발할 때 스트레인 게이지의 부착 위치와 갯수를 결정하는 데 이용할 수 있다. 그리고 센서의 출력으로부터 팩과 홀의 상대 위치를 알아내는 식들은 센서를 부착하여 팩인홀 작업을 할 때 상대위치 판별을 위한 기본식으로 이용될 수 있다.

실제로 그림 8 과 같은 손목 힘/토크 센서를 제작하여 SCARA형 로봇트에 부착하고, 표1, 표2를 이용하여 팩과 홀의 상대 위치를 판별하여, 팩인홀 작업을 실행할 수 있었다.

본 연구에서는 로봇트의 I/O 채널을 이용하여 로봇트에 위치 수정 명령을 전달하였으나 이 방법은 다른 로봇트 기종에 대해서도 똑같은 방법을 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있는 반면, 전달할 수 있는 명령이 제한되고 전달 속도가 느린 단점이 있으므로, 로봇트 제어기 자체에 센서 정보를 받아서 처리할 수 있는 기능을 갖도록 할 것이 요구된다. (본 연구는 한국과학재단 차관연구비 지원으로 수행되었음.)

참 고 문 헌

- 1) B.E. Shimano, B.Roth, "On Force Sensing Information and its Use in Controlling Manipulators", Proc. 9th ISIR, pp.119-126, 1979.
- 2) J.Kenneth Salisbury, "Active Stiffness Control of Manipulator in Cartesian Coordinate", Proc. 19th IEEE Conf. on Decision and Control, pp. 95-100, 1980.
- 3) M.Brady, M.T. Mason et al., "Robot Motion", MIT Press, pp.305-321, 1982.
- 4) Wesley E.Snyder, "Industrial Robots, Computer Interfacing and Control", Prentice Hall, pp.216-



- 234, 1985.
- 5) J.J. Craig, "Introduction to Robotics", Addison Wesley, pp.255-280, 1985.
  - 6) D.E. Whitney, "Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions", Trans. of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, pp.91-97, June 1977.
  - 7) M. H. Raibert, J. J. Craig, "Hybrid Position / Force Control of Manipulators", Trans. of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.102, pp.126-133, June 1981.
  - 8) H.V.Brussel, J.Simons, "The Adaptable Compliance Concept and its Use for Automatic Assembly by Active Force Feedback Accommodation", Proc. 9th ISIR, pp.167-181, 1979.
  - 9) Glan Giruad, "Generalized Active Compliance for Part Mating with Assembly Robots", Robotics Research, MIT Press, pp.949-960, 1984.
  - 10) Francois L'Hote et al., "Robot Technology. vol. 4, Robot Components and systems", Prentice Hall, pp.297-324, 1983.
  - 11) D.E. Whitney, "Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts", ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, pp.65-77, March 1982.
  - 12) 고 경철, "조립용 로봇의 유연성있고 감지성 있는 손목의 개발에 관한 연구", 석사 학위 논문, KAIST 생산 공학과, 1984.
  - 13) 고 복규, "능동적 적응에 의한 조립 작업에 관한 연구", 석사 학위 논문, KAIST 생산 공학과, 1985.
  - 14) 한 응교, "스트레인 게이지", 보성 문화사, pp. 140-169, 1976.
-