

(論 文)

접촉센서의 형상과 힘/토크 정보를 이용한 로봇조립

강이석* · 김근묵** · 윤지섭*** · 조형석****

(1992년 7월 13일 접수)

Robotic Assembly Using Configuration and Force/Torque Information of Tactile Sensor System

E-Sok Kang, Geun Mook Kim, Ji Sup Yun and Hyung Suck Cho

Key Words : Tactile Sensor(접촉센서), Peg-in-hole Task(축 구멍 조립작업), Hole Search(구멍 검색), Orientation(자세), Hybrid Position/Force Control(복합위치 및 힘제어)

Abstract

A robot assembly method which uses configuration and force/torque information of tactile sensor system and performs chamferless peg-in-hole tasks is suggested and experimentally studied. When the robot gripes the peg with random orientation, the realignment of the peg to the hole center line is successfully performed with the gripping configuration information of the tactile sensor and the inverse kinematics of the robot. The force/torque information of the tactile sensor makes it possible to control the contacting force between mating parts during hole search stage. The suggested algorithm employs a hybrid position/force control and the experiments show that the algorithm accomplishes well peg-in-hole tasks with permissible small contacting force. The chamferless peg-in-hole tasks with smaller clearance than the robot repeatability can be excuted without any loss or deformation of mating parts. This study shows the possibility of precise and chamferless parts mating by robot and tactile sensor system.

1. 서 론

최근 제품의 수요가 다양화되고 수명이 점점 짧아지는 추세에 따라 다품종소량생산시스템의 필요가 더욱 커지고, 이러한 다품종소량생산시스템의 유연성(flexibility)와 생산성(productivity)를 향상시키는 주요 역할을 로봇 매니플레이터가 담당하게 되었다. 그러나 로봇의 응용분야 중 조립작업이 차지하는 비율은 아직 적은 실정인데 이처럼 조립작

업에의 응용이 적은 것은 용접, 도장, 탈착작업 등에 비해 고도의 정밀성과 지능도를 요구하기 때문이다. 조립작업은 조립될 부품간에 약간의 오차만 있어도 매우 큰 반력이 발생하여 조립이 불가능하게 되거나 부품이나 로봇에 치명적인 영향을 주게 되는 어려움을 갖고 있다. 이러한 조립작업은 조립될 부품의 기하학적 구조, 부품을 잡고 있는 기구(gripper or jig)의 강성과 부품사이의 마찰력 등을 고려해야 한다. 로봇을 이용한 조립작업에서 조립될 부품이 불균일과 로봇 자체의 반복정밀도는 조립될 부품의 위치정렬을 어렵게 만든다. 이러한 문제의 해결방안으로는 로봇 정밀도개선, 부품 재가공, 조립손목기구의 개발 등이 있으며, 로봇 정밀도개선이나 부품 재가공은 비용 등 난점이 많아,

*정회원, 충남대학교 기계설계학과

**정회원, 진해 기계창

***정회원, 한국원자력연구소

****정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

적절한 조립손목을 개발 이용하는 연구가 이제까지 대부분을 차지해 온 연구 동향이다. 미국 MIT의 CSDL 연구소에서는 로봇과 그리퍼(gripper) 사이에 설치하는 스프링 구조의 RCC(remote center compliance)라는 유연한 손목을 개발하였으며 D. E. Whitney⁽¹⁾는 RCC 변수들(parameters)이 조립작업에 미치는 영향을 분석하였고, 실험을 통하여 검증하였다. RCC는 조립시 발생하는 접촉 반력에 의해 조립될 부품 상호간의 상대오차가 감소하는 방향으로 RCC 손목 부분이 변형하도록 구조되어 있다. 그러나 이러한 유연성만으로는 조립시 무리한 힘을 받을 수 있고 조립이 허용되는 오차의 범위도 제한되는 단점을 지니고 있다.

Van Brussel H. 등^(2,3)은 5축 AACW(active adaptable compliance wrist)를 가지고 정밀한 부품의 조립을 위한 힘피드백(force feedback)이용의 이론적 가능성과 실험적 응용 연구를 하였다.

De Fazio⁽⁴⁾는 RCC 손목에 LED와 포토다이오드를 설치하여 RCC의 변형도를 측정하였는데, 측정할 수 있는 변위의 한계가 작기 때문에 감지능력이 떨어진다는 단점을 지니고 있었다.

Takeyasu K. 등^(5,6)은 Hi-T-hand라 불리는 T자형 스프링구조 손목에 스트레인 게이지를 설치하여 감지성을 부여하였다. 이는 유연성에 있어서는 RCC에 미치지 못하나 어느 정도의 유연성과 감지성을 동시에 지니고 있다는 장점을 가지고 있다.

조형석 등⁽⁷⁾은 유연성의 구조는 RCC의 원리를 이용하고, 감지성은 Hi-T-hand에서 채택한 스트레인 게이지 방식을 써서, 유연하고도 감지성있는 손목을 개발하였다. 윤지섭 등⁽⁸⁾은 로봇 그리퍼에 접촉센서를 부착하여 임의로 파지된 부품의 형상을 인식하는 알고리즘을 개발하고, 스텝핑 모터(steping motor)로 구동되는 미니 로봇(mini robot)에 적용하여 플러그를 콘센트에 삽입하는 작업을 수행하였다. 그러나 이와같은 노력에도 불구하고 로봇을 정밀부품의 조립에 응용하기에는 많은 문제점이 있다. 즉 다양한 부품을 다루기 위한 효과적인 그리퍼의 개발이 부족하고, 조립시스템의 보조장치 즉 지그, 고정구 또는 이송장치들의 낮은 위치정밀도 등이 산업용 로봇의 응용을 더욱 어렵게 만든다.

본 연구에서는 이와같은 조립될 부품사이의 위치오차를 극복하여, 로봇에 의한 정밀부품의 자동조립을 가능하게 하는 조립알고리즘을 제시하였다.

제안된 조립알고리즘은 임의로 파지된 자세를 인식하여 조립될 축과 구멍의 중심선을 일치시키는 알고리즘과 복합위치 및 힘제어(hybrid position/force control)를 적용하여 위치오차를 극복하여 주는 구멍검색 알고리즘으로 구성하였으며, 로봇을 이용한 자동조립에 제안된 알고리즘을 적용한 실험 결과를 보였다.

2. 조립알고리즘

2.1 접촉센서에 의한 자세인식

본 연구에 사용된 접촉센서 시스템은 로드사(Lord Co.)의 전기광학식 LTS210 접촉센서를 사용하였으며 Fig.1에 보는 바와 같이 파지된 평면상의 변형치를 감지하는 배열센서(array sensor)와 x, y, z 방향의 힘 및 토크를 감지하는 6축의 힘/토크센서(force/torque sensor)로 구성되어 있다. 배열센서는 10×16의 160개의 광학센서로 구성되어 있으며, 그 작동원리는 다음과 같다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 하나의 광학센서는 1.8×1.8 mm내의 물체를 감지할 수 있으며, 한 쌍의 LED와 photo TR 사이에 있는 탄성체패드

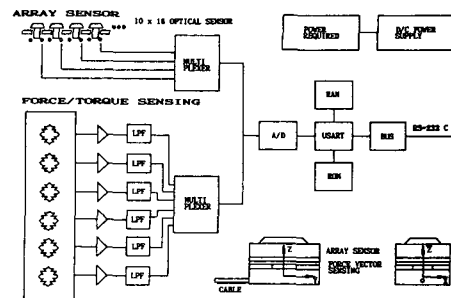


Fig. 1 Overview of the tactile sensor system

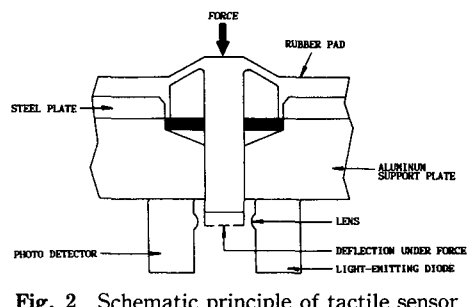


Fig. 2 Schematic principle of tactile sensor

(elastomer pad)에 부착되어 있는 플라스틱 핀이 존재한다. 광학센서가 접촉힘을 받아 탄성체패드가 변형되면 플라스틱 핀이 하강하여 LED에서 photo TR로 전달되는 빛을 차단하여 변형치에 비례하는 출력전류를 얻을 수 있다. 총 160개의 출력전류는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 멀티플렉서(multiplexer)에 의해 하나씩 선택되어 A/D변환기를 통하여 디지털신호로 변환되어 컴퓨터에 RS232C로 직렬 접속된다. 힘/토크 센서는 스트레인 게이지로 구성되어 있으며, 증폭기와 로우패스필터(low-pass filter) 및 멀티플렉서를 통하여 A/D변환기에 접속된다.

출력신호는 배열센서와 마찬가지로 A/D변환기를 통하여 USART(universal synchronous/asynchronous receiver transmitter)에 의해 컴퓨터와 접속된다. 접촉센서의 감지성능은 Table 1에서 보는 바와 같으며, 컴퓨터와 신호 전송 속도는 최고 38.4 kbps이며, 9600 bps로 전송될 경우 160개의 모든 배열센서 신호의 전송에는 약 0.2 sec, 6개의 힘/토크센서 신호를 전송할 경우 약 13.9 msec가 소요된다.

접촉배열센서는 탄성체패드의 탄성때문에 접촉부위 주변의 비접촉부위에도 변형치가 나타나지만 접촉부위와의 변형치 차이로부터 접촉부위를 알아 낼 수 있다. 접촉배열센서는 전체 광학센서의 수가 상대적으로 적다. 따라서 임의의 형상으로 접촉하는 부품보다는 선 혹은 점접촉하는 부품의 감지특성이

우수하다. 접촉센서를 부착한 로봇 그리퍼(gripper)가 평면 부품을 파지할 경우 두개의 그리퍼 조우(gripper jaw)가 평행하게 구동되어야만 접촉부위의 변형치들이 같아진다. 실험에 사용된 로봇은 Rhino사의 model XR-3로 부품의 파지력이 약하여, 부품의 파지에 도움이 되도록 원형축 부품의 로봇 그리퍼 파지부분을 평면가공하여 사용하였으며, 또한 접촉배열센서의 인식을 용이하게 하기 위하여 Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 축(peg)에 1개의 인식선(prominent line)과 인식선상에 1개의 불연속점을 인식점으로 만들어 주었다.

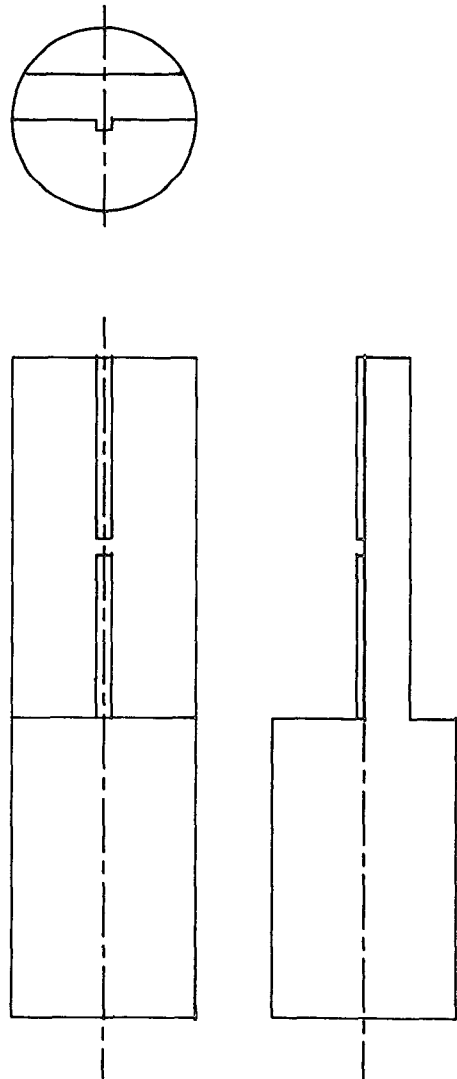


Fig. 3 Peg with prominent line

Table 1 Specification of tactile sensor system

Array sensor		
Number of array	10×16	
Size of array	1.8×1.8 mm	
Max. deflection	0.76 mm	
Force/torque sensor		
	Measuring range	Resolution
F_x (N)	±44.5	0.0445
F_y (N)	±44.5	0.0445
F_z (N)	±57.8	0.0890
T_x (Nm)	±1.36	0.011
T_y (Nm)	±1.36	0.011
T_z (Nm)	±1.13	0.011

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	2	4	30	4	0	0	0	0	0
1	0	2	4	22	4	0	0	0	0	0
2	0	2	2	22	6	0	0	0	0	0
3	0	0	0	12	25	2	0	0	0	0
4	0	0	0	12	25	0	0	0	0	0
5	0	0	0	10	19	0	0	2	0	0
6	0	0	0	8	19	2	0	0	0	0
7	0	0	0	10	10	2	0	0	0	2
8	0	0	0	0	10	2	0	0	0	0
9	0	0	0	0	19	2	0	0	0	0
A	0	0	0	0	10	19	2	0	0	0
B	0	0	0	0	10	23	4	0	0	0
C	0	0	0	0	12	23	2	0	0	0
D	0	0	0	0	0	16	23	4	0	0
E	0	0	0	0	0	12	25	2	0	0
F	0	0	0	0	0	0	8	8	25	2

(a) Array data of Configuration
 (b) Sorting result of recognized prominent line

Fig. 4 Array data of configuration from tactile sensor and the result of sorting

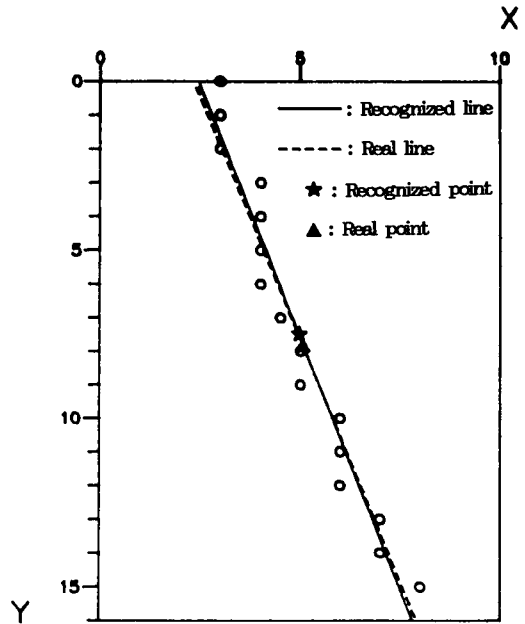


Fig. 5 Results of configurational recognition

로봇 그리퍼가 축을 파지한 후 접촉센서의 배열을 검사하며 결과 예를 Fig. 4(a)에 보인다. 이렇게 검사한 배열데이터를 행(row)별로 최고 변형치를 갖는 16개의 좌표를 구하여 인식하는 것이 열(column)별로 최고 변형치를 갖는 10개의 좌표를 구하여 인식하는 것 보다 최대오차가 $\pm 0.95^\circ$ 만큼 작기 때문에 행별로 최고 변형치를 갖는 좌표를 구한다. 이때 최고 변형치가 중복될 때에는 Fig. 4(b)에서와 같이 이들의 X좌표 평균값을 최고 변형치의 좌표로 한다. 이와같은 방식으로 16개의 최고 변형치를 갖는 좌표들을 구하여 이들을 최소자승법(least square method)에 의해 Fig. 5에서와 같이 인식선의 기울기를 구한다. 한편 인식점의 좌표는 인식선상의 변형치들을 구한 것들을 검사하여 최저 변형치를 갖는 좌표로 구한다. 이 경우 동일한 최저 변형치가 존재하는 경우에는 Y좌표의 평균값을 취한다.

Fig. 5는 축(peg)이 임의로 로봇 손에 파지될 때 축이 어떤 자세(orientation)와 위치로 파지되었는가를 인식한 결과이다. 이때 인식된 결과와 실제 축이 파지된 자세와 위치를 비교하여 보았다. 인식된 자세를 나타내는 인식선은 실선으로 표시하고 실제 파지된 자세는 점선으로 표시하였다. 실제 파지된 자세와 인식된 자세와의 기울기 오차는 0.8° 로 실제 파지된 자세보다 0.8° 크게 인식되었다. 또한 실제 파지된 인식점 위치와 인식된 인식점 위

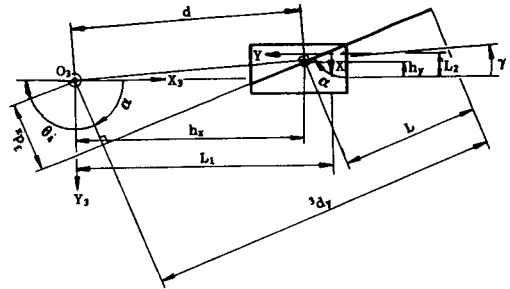


Fig. 6 Relationship between array sensor frame and joint (4) frame, and compensation of position due to pitching angle of joint(4)

치와의 오차는 센서좌표계에 대해 X방향으로 0.16 mm, Y방향으로 0.6 mm이었다.

앞에서 구한 축이 파지된 자세와 인식점의 좌표 정보를 가지고 로봇의 각 관절을 제어하기 위하여 센서좌표계의 정보를 관절좌표계로 변환한다. 이때 센서좌표계에 대해 축이 파지된 기울기를 α , 인식점의 좌표를 (a_x, a_y) , 접촉센서의 해상도 1.8×1.8 mm를 고려한 관절(4)좌표계에 대한 위치를 (h_x, h_y) , 관절(4)좌표계의 원점으로부터 인식점까지의 거리를 d , 각도를 γ 라 하면

$$h_x = L_1 - 1.8a_y \quad (1)$$

$$h_y = -L_2 + 1.8a_x \quad (2)$$

$$d = \sqrt{h_x^2 + h_y^2} \quad (3)$$

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{h_y}{h_x}\right) \quad (4)$$

가 된다.

여기서 센서좌표계는 접촉센서의 센서표면좌표계를 나타내며, 축이 파지된 기울기 α 를 고려하여 조립축과 구멍의 자세를 일치시키기 위한 로봇 손목의 보정선회각 θ_4 는

$$\theta_4 = 180^\circ - \alpha \quad (5)$$

이며, 이러한 정보를 가지고 관절(4)를 구동하였을 때 관절(4)좌표계에 대한 축 끝단의 위치는 인식점에서 축 끝단까지의 거리를 L 이라 하면,

$$^3d_x = -d \cos \alpha + \gamma \quad (6)$$

$$^3d_y = d \sin \alpha + \gamma + L \quad (7)$$

이 된다. 본 연구에서는 로봇 관절(1), (2), (3)을 동시에 구동하여 조립작업을 수행하며, 작업공간(task oriented space)에서 구멍(hole)의 위치를 입력정보로 역기구학적 해를 구함으로써 로봇을 구동하게 된다.

2.2 힘/토크센서에 의한 구멍 검색

로봇 그리퍼(gripper)가 축을 파지한 상태에서 접촉센서의 표면과 조립될 축은 일체를 이루고 있다고 가정하며, 축의 파지상태에 따른 힘/토크의 변화는 무시한다. 힘/토크 센서의 6축 힘/토크 정보에 의해 힘-모멘트 관계식으로 부터 모멘트 팔(moment arm)의 길이를 구할 수 있고 이것으로부터 구멍 중심과 축 중심간의 상대 위치오차를 알아낼 수 있다. 이것을 도식적으로 표시하면 Fig. 7과 같다.

축의 자유물체도와 평형상태를 고려하면, 구멍이 축에 가하는 반력 $F_{x_p}, F_{y_p}, F_{z_p}$ 중에서 반력 F_{y_p} 가 O_p 에 대하여 모멘트를 발생시켜 O_p 에서의 토크 T_{x_p}, T_{z_p} 와 평형을 이루며, O_p 로부터 반력 작용점까지의 x, z 방향의 거리를 각각 R_x, R_z 라 하면 $T_{z_p} = R_x F_{y_p}, T_{x_p} = R_z F_{y_p}$ 가 성립한다. 따라서 구멍 중심과 축 중심의 상대위치오차(e_x, e_y)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_x = \frac{T_{z_p}}{F_{y_p}}, \quad R_z = \frac{T_{x_p}}{F_{y_p}} \quad (8)$$

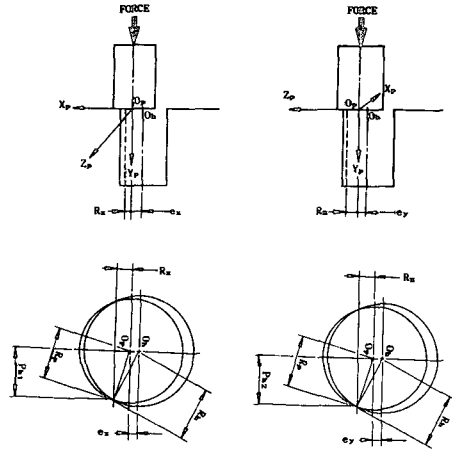


Fig. 7 Geometric analysis of contact state during hole search stage

$$e_x = \text{sgn}(R_x) (\sqrt{R_h^2 - Ph_1^2} - |R_x|)$$

$$e_y = \text{sgn}(R_z) (\sqrt{R_h^2 - Ph_2^2} - |R_z|) \quad (9)$$

여기서,

$$Ph_1 = \sqrt{R_p^2 - R_x^2}, \quad Ph_2 = \sqrt{R_p^2 - R_z^2}$$

이다.

힘/토크 센서로부터 출력되는 힘/토크 벡터(force/torque vector)를 $F_c = [F_{x_c} \ F_{y_c} \ F_{z_c} \ T_{x_c} \ T_{y_c} \ T_{z_c}]^T$ 라 하고 이것을 축(peg)이 파지된 센서표면좌표계로 변환한 힘/토크 벡터를 $F_s = [F_{x_s} \ F_{y_s} \ F_{z_s} \ T_{x_s} \ T_{y_s} \ T_{z_s}]^T$, 축이 임의로 파지된 자세를 고려한 힘/토크 벡터를 $F_r = [F_{x_{rs}} \ F_{y_{rs}} \ F_{z_{rs}} \ T_{x_{rs}} \ T_{y_{rs}} \ T_{z_{rs}}]^T$, 이것을 축좌표계로 변환한 힘/토크 벡터를 $F_p = [F_{x_p} \ F_{y_p} \ F_{z_p} \ T_{x_p} \ T_{y_p} \ T_{z_p}]^T$ 라 하고 이것을 도식적으로 살펴보면 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10과 같다.

Fig. 9는 접촉센서에 부착된 좌표계를 나타낸 것으로 좌표계($X_c \ Y_c \ Z_c$)는 힘/토크 센서좌표계를 나타내고, 좌표계($X_s \ Y_s \ Z_s$)는 센서표면좌표계를 나타낸다. 이들 좌표계 사이의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} dX_c \\ dY_c \\ dZ_c \\ d\phi_{xc} \\ d\phi_c \\ d\phi_{zc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & r_{z1} - r_{y1} \\ 0 & 1 & 0 & -r_{z1} & 0 & r_{x1} \\ 0 & 0 & 1 & r_{y1} - r_{x1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX_s \\ dY_s \\ dZ_s \\ d\phi_{xs} \\ d\phi_{ys} \\ d\phi_{zs} \end{bmatrix} \quad (10)$$

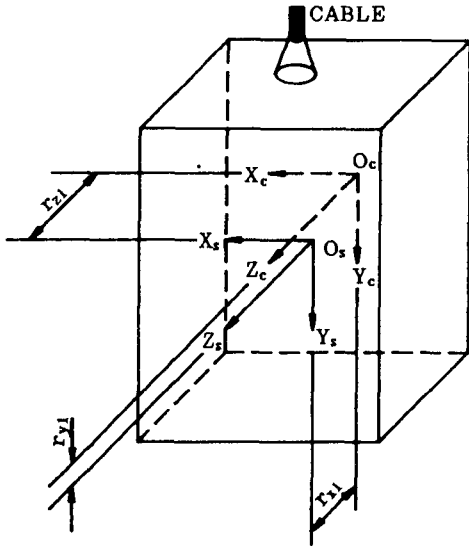


Fig. 8 Frame assignments for tactile sensor

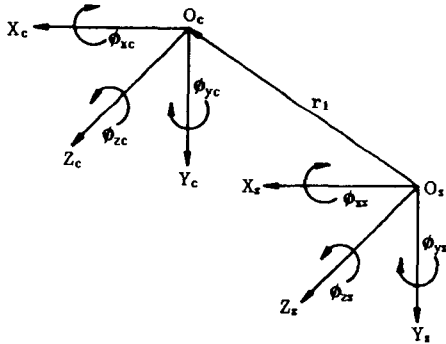


Fig. 9 Relationship between sensor center frame and sensor surface frame

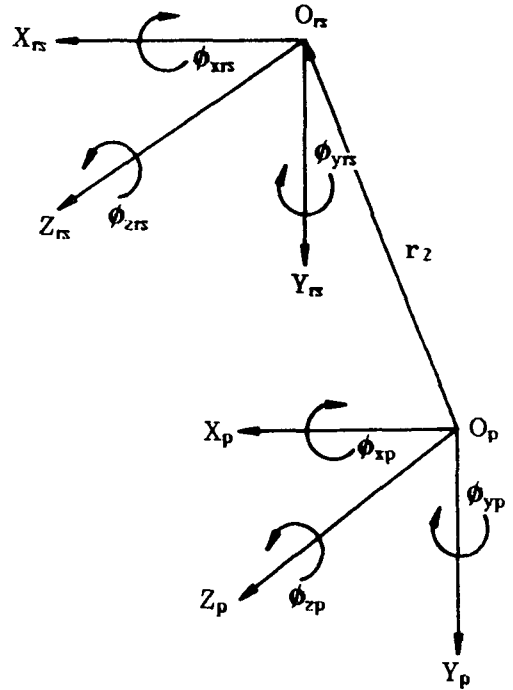


Fig. 10 Relationship between sensor surface frame and peg frame

$$R = \begin{bmatrix} \cos(90^\circ - \alpha) & -\sin(90^\circ - \alpha) & 0 \\ \sin(90^\circ - \alpha) & \cos(90^\circ - \alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \sin \alpha & -\cos \alpha & 0 \\ \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

즉

$$d_c = [J_s] d_s \tag{11}$$

이며

$$F_s = [J_s]^T F_c \tag{12}$$

이고, 센서표면좌표계의 인식선 기울기 α 를 고려한 힘/토크 벡터 F_r 은 다음과 같다.

$$F_r = [J_r] F_s \tag{13}$$

여기서

$$J_r = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}$$

이다.

센서표면좌표계를 파지된 축의 자세를 고려하여, 축좌표계와 자세를 일치시킨 좌표계를 ($X_{rs} Y_{rs} Z_{rs}$), 축좌표계를 ($X_p Y_p Z_p$)라 하고 힘/토크 벡터 F_r 을 축좌표계로 변환하면

$$\begin{bmatrix} dX_{rs} \\ dY_{rs} \\ dZ_{rs} \\ d\phi_{xrs} \\ d\phi_{yrs} \\ d\phi_{zrs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & r_{z2} - r_{y2} \\ 0 & 1 & 0 & -r_{z2} & 0 & r_{x2} \\ 0 & 0 & 1 & r_{y2} - r_{x2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX_p \\ dY_p \\ dZ_p \\ d\phi_{xp} \\ d\phi_{yp} \\ d\phi_{zp} \end{bmatrix} \tag{14}$$

즉

$$d_{rs} = [J_p] d_p \quad (15)$$

이다

축좌표계에서의 힘/토크 벡터 F_p 는

$$F_p = [J_p]^T F_r \quad (16)$$

즉

$$\begin{bmatrix} F_{x_p} \\ F_{y_p} \\ F_{z_p} \\ T_{x_p} \\ T_{y_p} \\ T_{z_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_{z2} & -r_{y2} & 1 & 0 & 0 \\ r_{z2} & 0 & -r_{x2} & 0 & 1 & 0 \\ -r_{y2} & r_{x2} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{x_{rs}} \\ F_{y_{rs}} \\ F_{z_{rs}} \\ T_{x_{rs}} \\ T_{y_{rs}} \\ T_{z_{rs}} \end{bmatrix} \quad (17)$$

이다. 따라서 센서로부터 출력되는 힘/토크 벡터를 축좌표계 (peg frame)으로 변환하면 다음과 같다.

$$F_p = \begin{bmatrix} J_p^T & J_r & J_s^T \end{bmatrix} F_c \quad (18)$$

여기서

$$\begin{aligned} F_{x_p} &= F_{x_c} \sin \alpha - F_{y_c} \cos \alpha \\ F_{y_p} &= F_{x_c} \cos \alpha - F_{y_c} \sin \alpha \\ F_{z_p} &= F_{z_c} \\ T_{x_p} &= -F_{x_c}(r_{z2} \cos \alpha + r_{z1} \sin \alpha) \\ &\quad - F_{y_c}(r_{z2} \sin \alpha + r_{z1} \sin \alpha) \\ &\quad + F_{z_c}(r_{y2} + r_{y1} \sin \alpha + r_{x1} \cos \alpha) \\ &\quad + T_{x_c} \sin \alpha - T_{y_c} \cos \alpha \\ T_{y_p} &= F_{x_c}(r_{z2} \sin \alpha + r_{z1} \sin \alpha) - F_{y_c}(r_{z2} \cos \alpha \\ &\quad + r_{z1} \cos \alpha) - F_{z_c}(r_{x2} + r_{y1} \cos \alpha + r_{x1} \sin \alpha) \\ &\quad + T_{x_c} \cos \alpha + T_{y_c} \sin \alpha \\ T_{z_p} &= F_{x_c}(r_{x2} \sin \alpha - r_{y2} \sin \alpha - r_{y1}) + F_{y_c}(r_{x2} \sin \alpha \\ &\quad + r_{y2} \cos \alpha + r_{x1}) + T_{z_c} \end{aligned} \quad (19)$$

이다.

여기서, α 는 축이 접촉센서에 파지된 기울기이며, 제어되는 힘은 F_{y_p} 로 이것은 축과 구멍의 y방향 접촉력을 의미한다. 이 힘을 제어하는 방법은 로봇을 구동하여 축과 구멍의 접촉력이 일정하게 되도록 로봇 운동을 제어하는 것으로 F_{y_p} 가 요구하는 값보다 커지면 축을 들어올리고, 요구하는 값보다 작아지면 밀어내리는 동작을 하도록 로봇 운동(robot motion)을 제어하게 된다. 이렇게 함으로써 로봇자체의 컴플라이언스(compliance)를 이

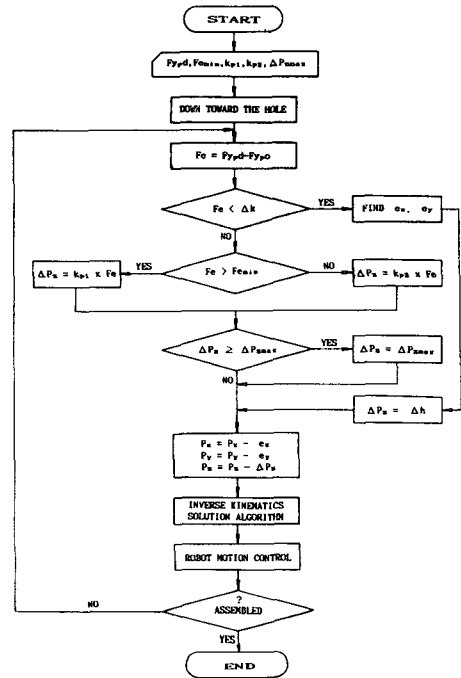


Fig. 11 Hole search and force control algorithm

용하여 축과 구멍사이의 접촉력을 제어하게 된다. F_{y_p} 가 원하는 구간내에 있을 때 T_{x_p} 와 T_{z_p} 정보를 가지고 축 중심과 구멍 중심사이의 위치오차(position error)를 구한다. 이렇게 접촉력을 제어하고 구멍을 검색하는 알고리즘이 Fig. 11에 있다. Fig. 11에서 F_e 는 축과 구멍사이의 y방향 요구접촉력($F_{y_p}d$)과 측정된 접촉력($F_{y_p}o$) 사이의 오차를 나타내고, $F_{e_{min}}$ 과 ΔK 는 축과 구멍 사이의 상대위치 오차(e_x, e_y)를 구하기 위한 접촉력의 허용오차 범위이다. ΔPz 와 ΔPz_{max} 은 로봇자체의 컴플라이언스를 이용하여 적절한 접촉력을 갖도록 하기 위한 로봇 손목의 z방향 변위와 각각의 시도에서의 허용 최대변위이고, Δh 는 구멍탐색준비를 위한 축의 z방향 변위를 나타낸다.

3. 실험

3.1 실험방법

전체시스템은 로봇 시스템과 접촉센서 시스템(tactile sensor system), IBM PC/AT로 구성되어 있다. 로봇 시스템은 크게 동력원, 구동장치, 제어 시스템, 인식장치와 주변장치로 구성되어 있으며,

접촉센서 시스템(tactile sensor system)은 접촉형상을 인식하는 배열센서 시스템(array sensor system)과 힘/토크센서 시스템(force/torque sensor system)으로 구성되어 있다. 접촉센서가 부착된 로봇 손에 축(peg)이 임의로 파지되면, 배열센서시스템(array sensor system)의 데이터로부터 축이 파지된 기울기와 인식점의 좌표를 인식하고, 힘/토크센서 시스템에 의해 힘/토크 벡터를 읽고, 기억해 둔다. 파지된 인식선의 기울기와 인식점의 좌표 정보를 가지고 구멍의 위치로 움직이기 위한 로봇관절각을 구한 다음 로봇을 구동하여 구멍의 위치로 축을 정위치 정렬 시킨다. 이때 축과 구멍사이의 위치오차는 구멍검색 알고리즘을 통하여 얻는다. 이 알고리즘은 접촉력이 요구되는 값보다 클때에는 올리고 작을 때에는 내리는 동작을 하도록 하여 로봇 자체의 컴플라이언스를 이용하여 원하는 접촉력에 이르도록 하는 힘제어 알고리즘과 이러한 접촉력이 요구되는 범위에 있게되면 접촉센서의 힘/토크 정보로부터 위치오차의 량을 검색하는 부분으로 구성되어 있다. 구멍검색을 통하여 얻은 위치오차(e_x, e_y)와 Z방향 변위 ΔP_z 를 기저부(base frame)에 기준한 위치벡터에 더하여 역기구학적으로 관절각을 구하여 로봇을 구동시킨다.

실험에서 사용한 로봇시스템은 RHINO XR-3 SYSTEM으로 5개의 관절을 가지고 있으며, 위치서보를 하기 위하여 각 모터마다 광학 엔코더가 붙어있어 이로부터 출력되는 펄스 수로 위치정보를 얻어낼 수 있으며, 로봇의 위치 반복정도(repeatability)는 1 mm이다. 실험은 로봇 손에 축을 임의로(randomly) 파지시킨 후, 구멍의 위치정보를 주었을 때 임의로 파지한 축의 자세와 인식점의 위치를 인식하여 축의 자세를 구멍의 자세와 일치시킨 후 축을 구멍에 삽입하게 된다. 실험에서는 틈새율(Cr)이 0.01인 구멍 직경 30.0 mm, 축 직경 29.4 mm인 것을 사용하였으며, 축 구멍조립 작업(peg-in-hole task)을 수행하기 위해서는 로봇의 위치 반복정도는 최소한 0.3 mm가 되어야 하며, 따라서 실험에 사용된 로봇의 위치반복정도 1 mm를 고려할 때 조립작업은 불가능하다. 이와 같은 축과 구멍사이의 틈새(clearance)가 사용될 로봇의 위치반복정도보다 작은 경우에도 조립작업을 가능하게 하기 위하여 복합 위치 및 힘제어를 적용한 구멍검색 알고리즘을 이용하여 조립작업을 수행하였다.

축 구멍 조립작업은 (a) 접근단계, (b) 구멍검

색단계, (c) 삽입단계의 3단계로 나누어진다. 접근단계는 로봇이 임의로 파지한 축의 자세를 인식하여 구멍의 자세와 일치시킨 후 삽입위치로 이동하여 구멍에 접근하게 된다. 구멍검색단계에서 축과 구멍의 상대적인 위치오차가 없다면 축 구멍 조립작업이 성공적으로 수행되지만, 축과 구멍사이의 위치오차가 존재하는 경우에는 이러한 상대적인 오차를 없애는 방향으로 로봇을 제어하기 위하여 축과 구멍의 상대적인 위치오차를 인식하는 것이 필요하며, 이러한 상대적인 위치오차를 보다 정확하게 인식하기 위하여 축과 구멍사이의 접촉력이 원하는 범위내에 있도록 제어하는 것이 필요하다. 이와같이 구멍검색(hole search)과정에서는 접촉력을 적정한 범위내에 있도록 제어하면서 힘과 토크 정보로부터 축과 구멍의 상대적인 위치오차(e_x, e_y)를 인식하게 한다. 축과 구멍의 접촉력이 원하는 범위내에 있도록 힘을 제어하면서 축과 구멍의 상대적인 위치오차를 없애는 방향으로 위치제어를 하는 복합 위치 및 힘제어를 적용한 Fig. 11의 구멍검색 및 힘제어 알고리즘(hole search and force control algorithm)을 통하여 구멍의 중심(center)을 찾아 축과 구멍을 조립하는 것이다.

3.2 실험결과 및 고찰

구멍검색단계에서 상대적인 위치오차를 로봇에게 인식시키는 것이 필요하다. 이렇게 하기 위하여 축과 구멍이 접촉할 때 접촉센서시스템의 명세와 외부잡음(noise)에 의한 영향을 고려하여 힘과 토크로부터 신뢰성있는 상대적인 위치오차(e_x, e_y)를 얻기 위하여 접촉력은 10 N이 되도록 하였다. 접촉력을 제어하는 알고리즘은 수정된 비례제어를 사용하였으며, 이 제어기는 오차가 클때는 반응을 민감하게 하고 오차가 작을때에는 반응을 둔감하게 하기 위한 제어이득 k_{p1} 과 k_{p2} 값은 실험을 통하여 $k_{p1} = 2k_{p2}$ 가 되도록 하는 것이 효과적인 것으로 평가되었다. 제어이득을 점차 증가시키며 실험한 결과가 Fig. 12에 보인다. 여기서, (a)와 (b)는 제어기의 성능을 잘 나타내어 주는 것으로 처음 접촉력의 오차가 클 경우에는 오차에 대해 민감하게 반응을 하고 접촉력이 10 N부근에서는 오차에 대해 둔감하게 반응하는 것을 보여 준다. 그러나, 상승시간이 너무 길기 때문에 본 실험에서 채택한 제어이득 값은 오차가 다소 있더라도 상승시간이 비교적 짧은 제어이득 $k_{p1} = 1.0$ $k_{p2} = 0.5$ 을 사용하였다. 또

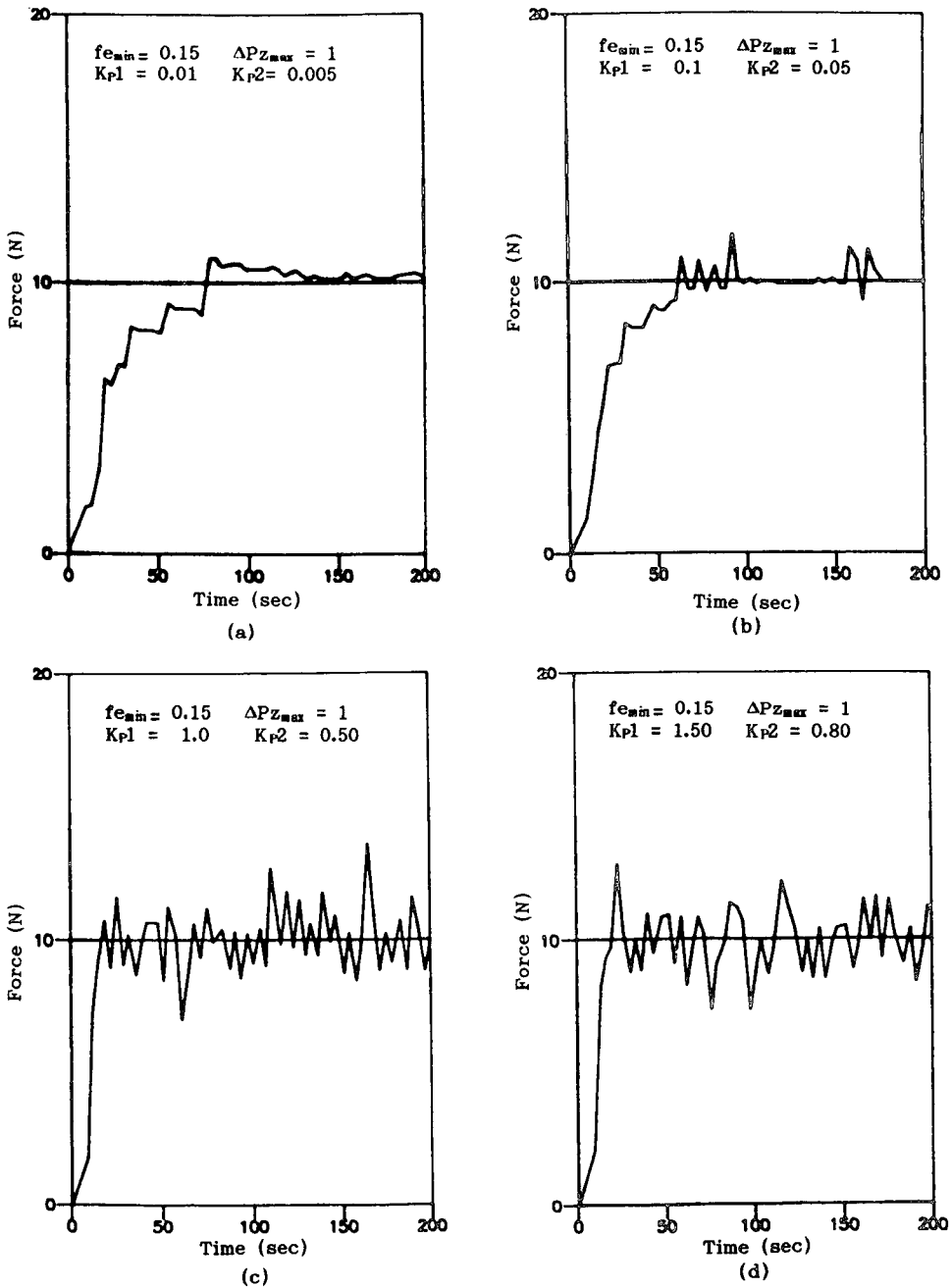


Fig. 12 Experimental results of force control

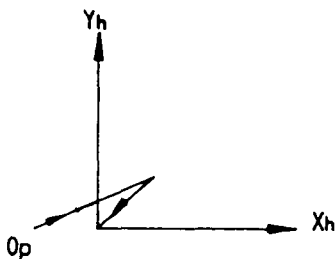
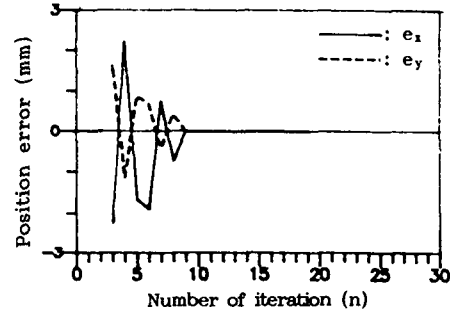
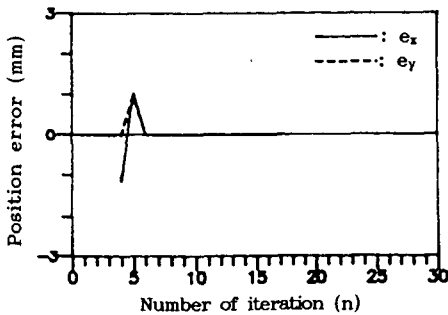
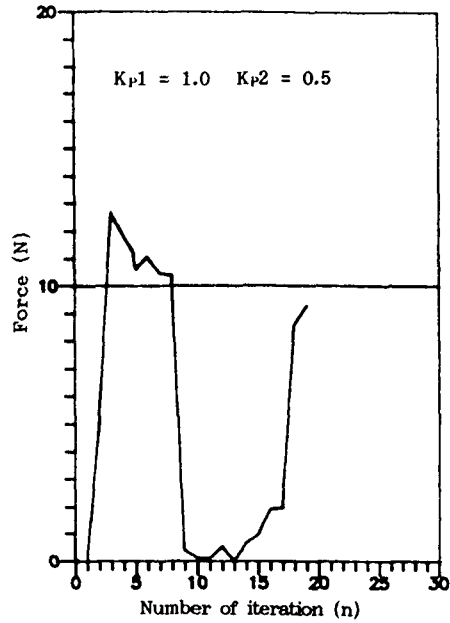
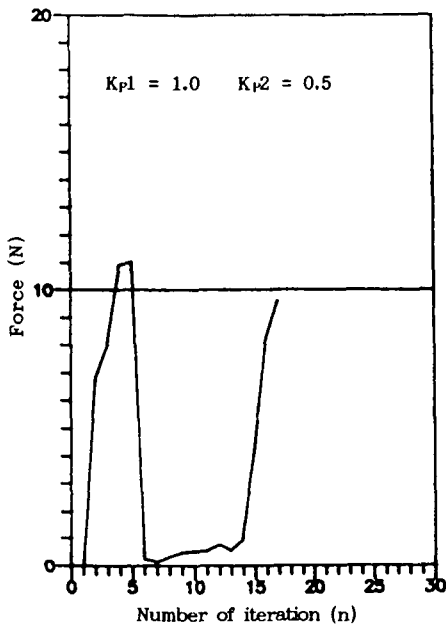
한 상대적인 위치오차(e_x, e_y)을 얻기위하여 힘/토크 정보를 샘플링하는 것은 축과 구멍사이의 접촉력이 9.5 N 이상 일때로 하였다.

Fig. 13은 축 구멍 조립작업의 실험결과로 반복 시도(iterative trial)에 따른 접촉력의 변화와 위치

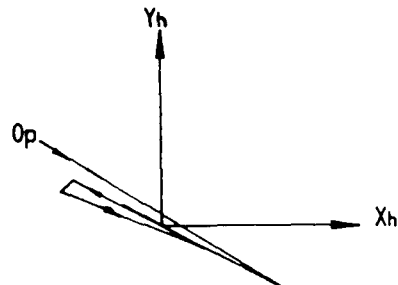
오차(e_x, e_y)의 감소 및 구멍검색의 경로를 보여 주고 있다. 실험(1)에서 보는 바와 같이 접근단계에서는 접촉력이 발생하지 않음을 볼 수 있으며, 1번째 반복(iteration)부터 접촉력을 증가시켜 4번째 반복에서 요구된 접촉력에 도달하여 상대적인 위치

오차를 제거시키는 방향으로 위치제어를 시작하였다. 구멍검색단계의 2번째 시도인 6번째 반복에서는 구멍검색을 완료하여 접촉력이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 삽입단계로 로봇이 구멍 중심을 따라 축을 삽입하고 있는 상태라는 것을 보

여 준다. 7번째 반복부터는 조금씩 삽입력이 증가하고 있는데 이것은 축과 구멍 측면의 마찰력에 기인한다. 15번째 반복부터 삽입력이 급격히 증가하는데 이것은 축이 완전히 삽입되어 축이 구멍의 바닥에 닿았음을 보여준다.



Trajectory of hole search.
experiment (1)



Trajectory of hole search.
experiment (2)

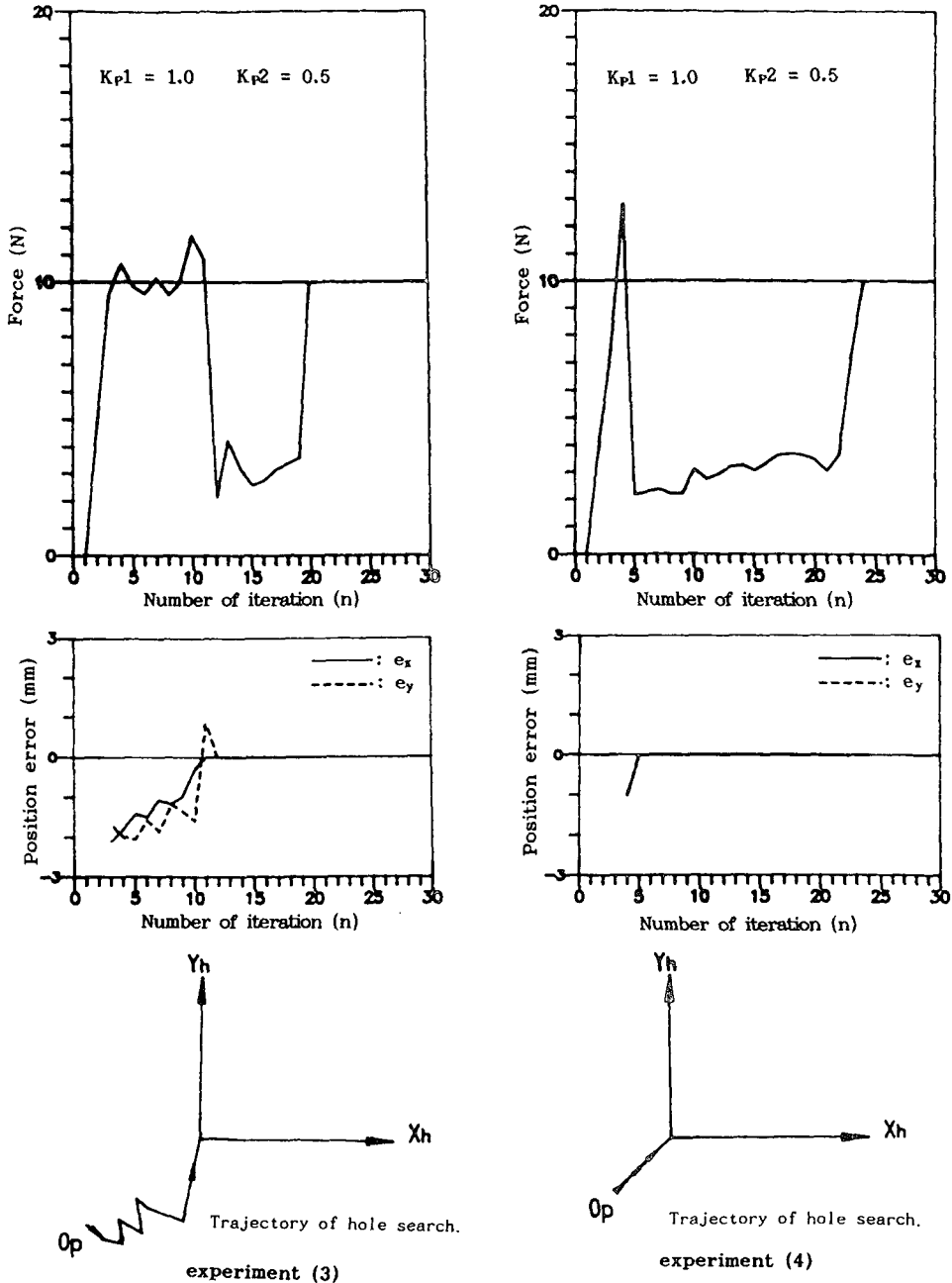


Fig. 13 Experimental results of peg-in-hole task

실험(2)는 반복구간(1~3)은 접근단계, 구간(4~9)은 구멍검색단계, 구간(10~17)은 삽입단계로 18번째 반복에서 축이 완전히 삽입되었다는 것을 보여 주고 있다. 실험(3)은 반복구간(1~3)은 접근단계, 구간(4~12)은 구멍검색단계, 구간

(13~20)은 삽입단계로 13번째 반복에서 삽입력이 일시적으로 증가하는 것을 보여 주고 있는데, 이것은 삽입도중 축과 구멍 측면사이에서 일시적 재밍(jamming)현상에 의한 것으로 사료된다. 다른 실험과 달리 구멍검색단계에서 축의 위치오차가 진동

(oscillation)이 거의 없이 감소하는 것을 보여 주고 있다. 이것은 로봇은 위치오차를 없애는 방향으로 축을 움직였지만 축과 구멍의 접촉력으로 인하여 축이 조금밖에 움직이지 않았다는 것을 알 수 있다. 실험(4)는 반복구간(1~4)은 접근단계, 구간(5)는 구멍검색단계, 구간(6~22)은 삽입단계로 구멍검색단계에서 한번의 위치오차 수정으로 구멍의 중심을 찾았음을 보여준다. 다른 실험에서 보다 삽입 구간이 긴 것은 ΔP_{2max} 를 작게 하였기 때문이다.

일련의 실험을 통하여 조립작업에 적용된 구멍검색알고리즘의 효과가 평가 되었다. 구멍의 중심에서 약 1 mm 반경이내에 축의 중심이 있을 때 구멍검색은 실험(1)과 (4)에서 보는 바와 같이 정성적이고도 정량적으로 수행되어졌으나 축의 중심이 약 1 mm반경 밖에 있을 경우에는 실험(2)와 (3)에서와 같이 구멍검색은 주로 정성적으로 수행되어 짐을 볼 수 있다. 실험(2)와 실험(3)은 구멍중심과 축 중심의 초기오차가 거의 같으나 구멍검색과정에 있어서 위치 오차의 감소경향과 검색의 경로는 전혀 다르다. 실험(2)는 다른 실험에서와 마찬가지로 구멍검색에 따라 위치 오차 정보를 가지고 Δh 만큼 축을 들어 올렸을 때 축과 구멍이 떨어진 비접촉상태에서 축을 움직였으나, 실험(3)은 구멍검색과정에서 위치오차정보를 가지고 축을 Δh 만큼 들어 올렸지만, 축과 구멍이 완전히 떨어지지 않은 접촉상태에서 오차교정 방향으로 축을 움직였을 때 마찰력이 작용한 것으로 사료된다.

모따기가 없는 직경이 29.4 mm인 축과 30.0 mm인 구멍으로 축 구멍 조립 작업(peg-in-hole task)을 수행하기 위하여 로봇의 위치반복정도는 최소한 0.3 mm를 요구하나 실험에 사용된 로봇의 위치반복정도는 1 mm로 로봇의 위치 반복정도만을 이용하여서는 조립이 불가능하다. 그러나 접촉센서에 의해 측정되는 힘/토크 정보를 이용하는 복합위치 및 힘제어(hybrid position/force control)의 구멍검색 알고리즘을 이용하여, 축중심과 구멍중심의 상대적인 위치오차를 인식하여 삽입위치를 제어하여 줌으로써 무리한 힘의 발생없이 구멍검색이 가능하였다.

4. 결 론

접촉센서의 형상정보와 힘/토크 정보를 이용하여

정밀부품의 로봇조립을 가능하게 하는 조립알고리즘을 제안하였고, 실험을 통하여 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 로봇이 임의로 축(peg)을 파지하였을 때 접촉센서의 형상정보를 이용하여 파지된 상태를 인식함으로써, 로봇 손에 파지된 축의 중심선 자세를 구멍의 중심선과 일치되도록 교정할 수 있었다.

(2) 접촉센서의 힘/토크 정보와 로봇자체의 컴플라이언스(compliance)를 이용하여 힘제어(force control)를 한 결과 축과 구멍 사이의 접촉력제어에 만족한 결과를 얻었다.

(3) 접촉센서에 의해 측정되는 힘/토크 정보를 이용하는 복합위치 및 힘제어(hybrid position/force control)에 의해 구멍검색을 구행함으로써 무리한 접촉력의 발생없이 구멍검색이 가능하였다.

따라서 제안된 조립알고리즘은 로봇이나 조립될 부품의 손상을 방지하면서 로봇의 위치반복정도(repeatability)보다 작은 틈새(clearance)를 갖는 축과 구멍의 조립을 가능케 하였으며, 로봇을 이용한 정밀조립의 가능성을 제시하였다.

참고문헌

- (1) Whitney, D.E., 1982, "Quasi-static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts," Trans. of the ASME, J. of Dynamic Systems, Measurements, and Control, Vol. 104, pp. 65~77.
- (2) Van Brussel H. and Simons, J., 1979, "Robot Assembly by Active Force Feedback Accommodation," Annals of the CIRP Vol. 28, pp. 397~401.
- (3) Van Brussel H. Thielemans H. and Simons, J., 1981, "Futher Development of the Active Adaptive Compliant Wrist(AACW) for Robot Assembly," Proc. 11th Int. Symp. on Industrial Robot, Tokyo, Japan, pp. 377~384.
- (4) De Fazio, T.L., 1980, "Displacement State Monitoring for the Remote Center Compliance(RCC) Realization and Application," Proc. 10th Int. Symp. on Industrial Robots, Milano, Italy, pp. 559~569.
- (5) Takeyasu, K., Goto, T. and Inoyama, T. 1976, "Precision Insertion Control and its Application," ASME of J. of Engineering for Industry,

- pp. 1313~1318.
- (6) Tatsuo Goto, Kiyoo Takeyasu and Tadao Inoyama, 1980, "Control Algorithm for Precision Insert Operation Robots," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-10, No. 1, pp. 19~25.
- (7) 조형석, 고경철, 1984, "유연하고 감지성있는 조립 전용손목의 개발에 대한 연구," 대한기계학회논문집, 제8권 제5호, pp. 488~497.
- (8) 윤지섭, 이재설, 박병석, 1988, "접촉센서를 이용한 로봇트 Gripper 내의 부품의 형상인식," 한국자동제어학술회의 Vol. 1, pp. 422~427.
- (9) Cho H.S. Warnecke H.J. and Gweon, D.G. 1987, "Robotic Assembly : A Synthesizing Overview," Robotica, Vol. 5, pp. 153~165.
- (10) Raibert, M.H. and Craig, J.J., 1981, "Hybrid Position Force Control of Manipulators," Trans. of the ASME, J. of Dynamic System, Measurement, and Control, Vol. 102, pp. 126~133.
- (11) Jeong K.W. and Cho, H.S., 1989, "Development of a Pneumatic Vibratory Wrist for Robotic Assembly," Robotica, Vol. 7, pp. 9~16.
- (12) Kang E.S., Cho H.S. and Gweon D.G., 1990, "Assembly of Prismatic Parts Using a Pneumatic Vibratory Wrist," Proc. 11th Int. Conference on Assembly Automation, Dearborn, U.S. A., MS90-820.
- (13) Stefan Begej, 1988, "Planar and Finger-shaped Optical Tactile Sensors for Robotic Applications," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 5, pp. 472~484.
- (14) Asada H. and Slotine, J.J.E. 1986, "Robot Analysis and Control," John Wiley and Sons.
- (15) Craig J.J., 1989, "Introduction to Robotics 2nd Ed.," Addison-Wesley Publishing Co.