

## 효율적인 팩인홀 작업을 위한 컴플라이언스 특성 해석

### Analysis of Compliance Characteristic for Effective Peg-In-Hole Task

김 병호<sup>\*</sup>, 이 병주<sup>°</sup>, 서 일홍<sup>°</sup>, 오 상록<sup>\*</sup>

B.-H. Kim, B.-J. Yi, I. H. Suh, and S.-R. Oh

<sup>°</sup>: 한양대학교 전자컴퓨터공학부, <sup>\*</sup>: 한국과학기술연구원 지능제어연구센터

<sup>°</sup>: School of Electrical Eng. and Computer Science, Hanyang University

<sup>\*</sup>: Intelligent System Control Research Center, KIST

(E-mail: bj@email.hanyang.ac.kr)

**Abstract:** This paper deals with analysis of the compliance characteristic for effective peg-in-hole task using robot hand without inter-finger coupling. We first classify the task of inserting a peg-in-a-hole into three contact styles between the peg and the hole. Next, we analyze the conditions of the specified stiffness matrix in the operational space to successfully and more effectively achieve the given peg-in-hole task for each case. It is concluded that the position of compliance center on the peg and the role of a coupling stiffness element existing between the x-direction and the rotational direction are important.

**Keywords:** Peg-in-hole, Analysis of compliance characteristic, Robot hand.

#### 1. 서론

로봇 손을 이용하여 물체를 잡고 조작하는 경우 [1][2]에는 실제로 손가락 구조에 힘 센서를 장착하기에 어려움이 따르고, 또한 힘 센서로부터 측정된 힘 신호(force signal)에는 실질적으로 외란(noise)이 많이 포함되어 있기 때문에 매우 불안정하며, 로봇 매니플레이터에 비해 로봇 손가락의 운동 범위가 매우 작기 때문에 힘 신호를 이용하여 로봇 손가락의 정밀제어를 수행하는 것이 쉽지 않음을 경험하여 왔다. 로봇 손을 이용하여 물체를 조작하는 경우에 특히, 준정적인 상태에서 동작하는 경우, 힘 센서를 사용하여 측정된 힘 신호를 사용하는 방법 대신에 컴플라이언스(compliance) 제어 방법이 효과적으로 사용될 수 있다. 이와 관련하여 많은 연구자들이 파지 강성 또는 컴플라이언스 분야에 대하여 연구해 왔다[3][4][5]. 최근에 Kim 과 Yi[6]등은 로봇 손이 물체를 잡고 조작할 때, 파지한 물체의 컴플라이언스를 성공적으로 제어하기 위해 요구되는 손가락의 개수를 조사하고, 보다 효과적으로 컴플라이언스 특성을 구현하기 위한 로봇 손가락의

구조에 대하여 고려하였으며, 독립적인 손가락/관절의 제어를 기반으로 한 컴플라이언스 제어 방법을 제안하였다.

본 논문에서는 독립적인 손가락/관절의 제어를 기반으로 한 컴플라이언스 제어 방법을 팩인홀(Peg-in-hole) 작업에 적용하고자 한다. 로봇 손을 이용한 팩인홀 작업과 관련하여 Whitney[7]는 딱딱한 팩을 구멍에 삽입하기 위한 기하학적인 조건을 분석하고, 힘 평형 관계를 유도하였고, Matsuoka[8] 등은 로봇 손의 기본적인 운동을 근거로 한 팩인홀 과정에 비전(Vision) 정보와 접촉점의 위치 정보를 사용하여 팩의 자세를 제어하였다. Shimoga[9]등은 로봇 손을 이용한 물체의 구속된 조작에 있어서 컴플라이언스 기준점을 접촉점에 설정하도록 언급하고 있다. 이와 같은 기존의 연구에서는 보다 효율적인 팩의 삽입을 위해 작업점에서의 강성값을 설정하는 방법에 관해서는 아직까지 언급되지 않았다.

따라서 본 논문에서는 팩인홀 작업을 원활하게 하기 위한 컴플라이언스 특성에 관한 해석을 수행

하며, 로봇 손을 이용한 팩인홀 작업에 있어서 보다 효율적으로 팩을 구멍에 삽입하기 위해서는 컴플라이언스 기준점과 작업 공간에서의 컴플라이언스 특성을 적절히 계획하여야 함을 제시하고자 한다.

## II. 독립 손가락/관절 기반 컴플라이언스 제어

그림 1은 2차원 공간에서 로봇 손을 이용한 팩인홀(Peg-in-Hole) 작업을 나타낸다.

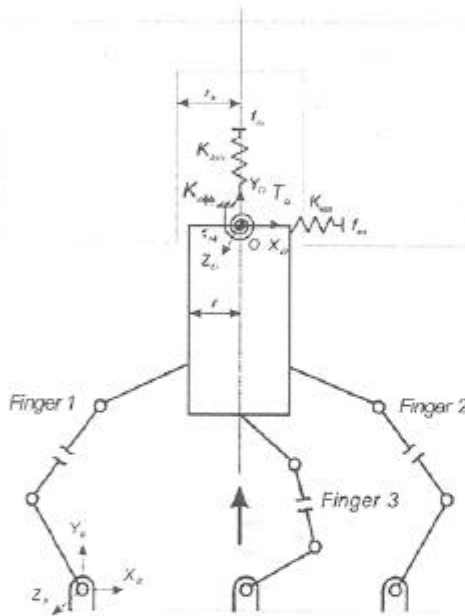


그림 1. 로봇 손을 이용한 팩인홀 작업.

Fig. 1. Peg-in-hole task by a robot hand.

그림 1에서 팩의 작업 공간  $O$ 에서의  $3 \times 3$  강성 행렬  $[K_o]$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$[K_o] = \begin{bmatrix} K_{ox} & K_{oy} & K_{ox\phi} \\ K_{oyx} & K_{oyy} & K_{oy\phi} \\ K_{ox\phi} & K_{oy\phi} & K_{ox\phi\phi} \end{bmatrix} \quad (1)$$

팩의 작업 공간에서 주어진  $3 \times 3$  강성 특성을 생성하기 위해서는 최소한 3개의 손가락이 필요하고, 세 손가락을 갖는 로봇 손을 이용할 경우, 각 손가락의 강성 특성은 다음과 같은 관계들 이용하여 구할 수 있다[6].

$$K_{oo} = [B_f^o] K_{ff} \quad (2)$$

여기서

$$K_{oo} = [K_{oxx} \ K_{oyy} \ K_{ox\phi} \ K_{oyx} \ K_{oy\phi} \ K_{ox\phi\phi}]^T$$

$$[B_f^o] = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ y_1 & 0.0 & y_2 & 0.0 & y_3 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 1.0 \\ 0.0 & -x_1 & 0.0 & x_2 & 0.0 & x_3 \\ y_1^2 & x_1^2 & y_2^2 & x_2^2 & y_3^2 & x_3^2 \end{bmatrix}$$

$$K_{ff} = [{}^1K_{fx} \ {}^1K_{fy} \ {}^2K_{fx} \ {}^2K_{fy} \ {}^3K_{fx} \ {}^3K_{fy}]^T$$

$y_i$  와  $x_i$  는 각각  $i$  번째 손가락의 접촉점으로부터 물체의 작업점(task position) 까지의 벡터 변수들을 나타내고, 모두 양수이며,  ${}^iK_{fx}$ ,  ${}^iK_{fy}$  는 각각  $i$  번째 손가락의  $x$  와  $y$  축에 대한 강성값을 나타낸다.

식(2)에서  $[B_f^o]$ 를 살펴보면, 두 번째 행의 모든 요소가 0으로 나타남을 확인할 수 있는데, 이것은 각 손가락 공간에서 상호간섭 요소  $K_{fx}$ 를 제거하였기 때문에 결과적으로 이들의 합인  $K_{oy}$ 가 항상 0이 됨을 의미한다. 또한 세 번째 행은 팩의  $x$  축과  $z_0$  축을 중심으로 한 회전축과의 상호 간섭  $K_{ox\phi}$ 와 관련이 있다. 여기서  $K_{ff}$ 의 모든 요소는 양수이어야 하고,  $y_1, y_2$ , 그리고  $y_3$ 는 모두 양수이기 때문에  $K_{ox\phi}$ 는 항상 존재하게 된다. 따라서 독립 손가락 기반 컴플라이언스 제어 방법을 적용하면, 작업 공간에서의 강성 행렬을 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$[K_o] = \begin{bmatrix} K_{ox} & 0 & K_{ox\phi} \\ 0 & K_{oyy} & 0 \\ K_{ox\phi} & 0 & K_{ox\phi\phi} \end{bmatrix} \quad (3)$$

즉, 그림 1과 같이 컴플라이언스 기준점이 과거점으로 구성되는 루프(loop)의 외부에 존재하는 과거

형태에서는  $K_{ox\phi}$ 가 항상 존재하게 된다.

식(2)로부터,  $K_{ox\phi}$ 는  $K_{oxx}$ ,  $K_{oyy}$  및  $K_{o\phi\phi}$ 에 의해 정해지며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{ox\phi} = [A_j^o][D_j^o]^* K_{oo}^* \quad (4)$$

여기서

$$[A_j^o] = [y_1 \ 0.0 \ y_2 \ 0.0 \ y_3 \ 0.0],$$

$$[D_j^o] = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 1.0 \\ 0.0 & -x_1 & 0.0 & x_2 & 0.0 & x_3 \\ y_1^2 & x_1^2 & y_2^2 & x_2^2 & y_3^2 & x_3^2 \end{bmatrix},$$

$$K_{oo}^* = [K_{oxx} \ K_{oyy} \ 0.0 \ K_{o\phi\phi}]^T.$$

### III. 팩인홀 작업을 위한 컴플라이언스 특성 해석

그림 1과 같이 로봇 손을 이용한 팩인홀(Peg-In-Hole)작업에서 팩이 구멍에 접촉하는 상황은 크게 다음과 같이 세 가지 유형으로 구분할 수 있다[7].

- (1) 팩의 왼쪽 한 점이 구멍에 접촉할 경우
- (2) 팩의 오른쪽 한 점이 구멍에 접촉할 경우
- (3) 팩이 구멍의 두 점에 접촉하는 경우

여기서 팩의 동작은 준 안정적인 동작(Quasi-static motion)으로 가정하고, 2차원 공간에서 기술하며, 팩과 구멍간의 마찰은 무시한다.

#### 1. 팩의 왼쪽 한 점이 구멍에 접촉할 경우

그림 2는 로봇 손을 이용한 팩인홀 작업에서 팩의 왼쪽 한 점이 구멍에 접촉하는 경우를 나타낸다. 그림 2에서 팩의 작업점에서의 힘 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_{ox} \\ f_{oy} \\ \tau_{o\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{oxx} & 0 & K_{ox\phi} \\ 0 & K_{oyy} & 0 \\ K_{ox\phi} & 0 & K_{o\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta u_{ox} \\ \delta u_{oy} \\ \delta u_{o\phi} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서

$$\delta u_{ox} = u_{ox}^d - u_{ox}^a,$$

$$\delta u_{oy} = u_{oy}^d - u_{oy}^a,$$

$$\delta u_{o\phi} = u_{o\phi}^d - u_{o\phi}^a.$$

그림 2에서 팩이 구멍의 모서리와 접촉할 때, 팩의 작업점에 작용하는 반응력(repulsive force)의 크기( $f_{max} > 0$ )에 대한 힘 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{ox} = -f_{max}, \quad (6)$$

$$f_{oy} = 0, \quad (7)$$

$$\tau_{o\phi} = f_{max}l, \quad (8)$$

여기서  $l$ 은 접촉점의 연장선과 팩의 중심선의 교점과 작업점간의 길이를 나타낸다.

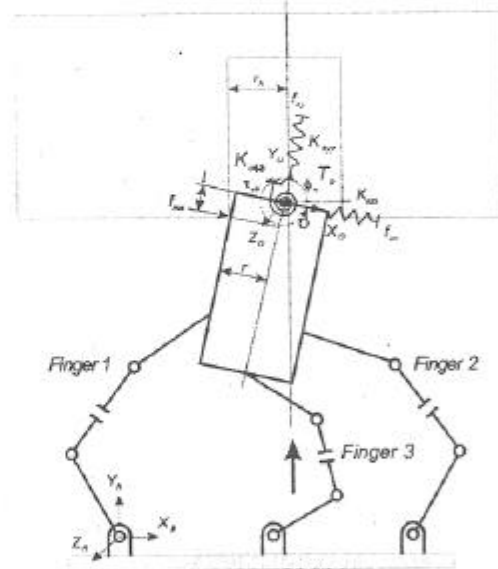


그림 2. 팩인홀 작업: 왼쪽 점 접촉.

Fig. 2. Peg-in-hole task : One left point contact.

식(5), 식(6) 및 식(8)으로부터, 컴플라이언스 기준점에 대한 토오르크 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_{ox\phi}\delta u_{ox} + K_{o\phi\phi}\delta u_{o\phi} \\ = -K_{oxx}l\delta u_{ox} - K_{ox\phi}l\delta u_{o\phi} \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)로부터  $\delta u_{o\phi}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta u_{\phi} = - \left( \frac{K_{axx}l + K_{ax\phi}}{K_{o\phi\phi} + K_{ax\phi}l} \right) \delta u_{ax} \quad (10)$$

그러면 펙의 왼쪽 부분과 구멍의 한 점이 접촉하고 있는 현재 상태, 즉 펙의  $x$  축 위치 오차가 0보다 작은 경우( $\delta u_{ax} < 0$ ), 다음 상태에서 펙의 자세 변화  $\delta u_{\phi}$ 는 식(10)으로부터  $l$ ,  $K_{axx}$ ,  $K_{ax\phi}$  및  $K_{o\phi\phi}$ 에 의해 정해지며, 항상 0보다 크게 됨을 확인할 수 있다. 따라서 펙의 위치 오차에 의해 왼쪽 부분이 구멍에 접촉하는 경우는 펙에 작용하는 반응력의 작용으로 인하여 펙이 컴플라이언스 기준점을 중심으로 왼쪽 방향으로 회전하게 되어 보다 원활한 삽입이 가능해진다. 또한 식(10)에서  $l$ 이 0인 경우에도  $K_{ax\phi}$ 에 의해 펙의 자세 변화가 일어날 수 있음을 알 수 있다.

## 2. 펙의 오른쪽 한 점이 구멍에 접촉할 경우

그림 3은 로봇 손을 이용한 펙인홀 작업에서 펙의 오른쪽 한 점이 구멍의 내벽에 접촉하는 경우를 나타낸다.

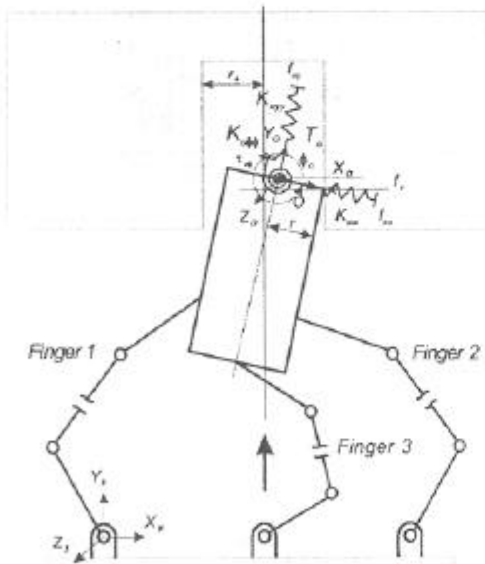


그림 3. 펙인홀 작업: 오른쪽 점 접촉.

Fig. 3. Peg-in-hole task : One right point contact.

그림 3에서 펙의 작업점에 미치는 반응력의 크기( $f_r > 0$ )에 대한 힘 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{ax} = f_r \cos(\phi_0), \quad (11)$$

$$f_{ay} = -f_r \sin(\phi_0), \quad (12)$$

$$\tau_{\phi} = f_{ax} r \tan(\phi_0). \quad (13)$$

식(5), 식(11) 및 식(13)으로부터, 컴플라이언스 기준점에 대한 토크 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_{ax\phi} \delta u_{ax} + K_{o\phi\phi} \delta u_{\phi} \\ = r K_{axx} \tan(\phi_0) \delta u_{ax} + r K_{ax\phi} \tan(\phi_0) \delta u_{\phi} \end{aligned} \quad (14)$$

식(14)로부터  $\delta u_{\phi}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta u_{\phi} = - \left( \frac{K_{ax\phi} + r K_{axx} \eta}{K_{o\phi\phi} + r K_{ax\phi} \eta} \right) \delta u_{ax} \quad (15)$$

여기서 양수  $\eta$ 는 다음과 같고,

$$\eta = -\tan(\phi_0), \quad \phi_{0,\min} \leq \phi_0 \leq 2\pi \quad (16)$$

$\phi_{0,\min}$ 는 펙의 두 점이 구멍에 접촉하는 경우에 있어서 펙의 자세가 최소인  $\phi_0$ 를 나타내며, 펙의 반지름  $r$ 과 구멍의 반지름  $r_h$ 에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$\phi_{0,\min} = \cos^{-1} \left( \frac{r}{r_h} \right) \quad (17)$$

결과적으로 펙의 오른쪽 부분이 구멍의 내벽에 접촉하고 있는 현재 상태, 즉 펙의  $x$  축 위치 오차가 0보다 큰 경우( $\delta u_{ax} > 0$ ), 다음 상태에서 펙의 자세 변화  $\delta u_{\phi}$ 는 식(15)로부터  $\eta$ ,  $r$ ,  $K_{axx}$ ,  $K_{ax\phi}$  및  $K_{o\phi\phi}$ 에 의해 정해지는데, 항상 0보다 작게 됨을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 펙의 위치 오차에 의해 펙의 오른쪽 부분이 구멍에 접촉하는 경우, 펙에 작용하는 반응력의 작용으로 인하

여 팩이 컴플라이언스 기준점을 중심으로 오른쪽 방향으로 회전하게 되어 삽입이 어려워지게 됨을 의미한다.

한편, 팩의 오른쪽 부분이 구멍의 내벽에 접촉하는 경우에 있어서 컴플라이언스 기준점이 그림 4와 같이 이동된 경우를 고려해 보자.

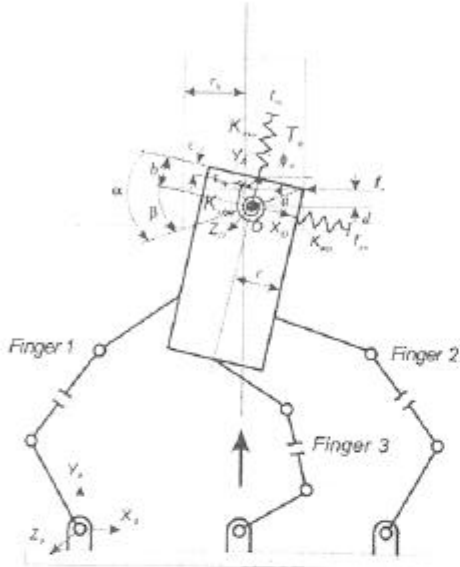


그림 4. 팩인홀 작업: 오른쪽 점 접촉(컴플라이언스 기준점이 이동한 경우).

Fig. 4. Peg-in-hole task : One right point contact (the case of shifting the position of compliance center).

그림 4에서 팩의 끝점과 반응력 벡터의 연장선과 팩의 중심선이 만나는 점간의 거리  $c$ 와 팩의 컴플라이언스 기준점과 접촉점간의 거리  $a$ 는 각각 다음과 같다.

$$c = r\eta \quad (18)$$

$$a = \sqrt{r^2 + b^2} \quad (19)$$

여기서  $b$ 는 팩의 끝점과 컴플라이언스 기준점간의 거리를 나타낸다.

팩의 끝점과 컴플라이언스 기준점간의 거리  $b$ 를  $c$ 보다 크게 설정하면, 팩이 구멍의 내벽과 접촉할 때, 팩의 작업점에 미치는 반응력(repulsive force)의 크기( $f_r > 0$ )에 대한 힘 관계식은 다음과

같이 나타낼 수 있다.

$$f_{ox} = f_r \cos(\phi_0), \quad (20)$$

$$f_{oy} = -f_r \sin(\phi_0), \quad (21)$$

$$\tau_{o\phi} = f_{ox} a \lambda \quad (22)$$

여기서  $\alpha$ 의 범위는 다음과 같고,

$$\alpha_{\min} \leq \alpha < \frac{\pi}{2}, \quad \alpha_{\min} = \tan^{-1}\left(\frac{c}{r}\right) \quad (23)$$

$\lambda$ 는 식(16), 식(17) 그리고 식(23)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있고, 항상 양수이다.

$$\lambda = (\sin(\alpha) + \cos(\alpha) \tan(\phi_0)) \quad (24)$$

식(5), 식(20) 및 식(22)로부터, 컴플라이언스 기준점에 대한 토크 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{ox\phi} \delta u_{ox} + K_{o\phi\phi} \delta u_{o\phi} = aK_{oxx} \lambda \delta u_{ox} + aK_{ox\phi} \lambda \delta u_{o\phi} \quad (25)$$

식(25)로부터  $\delta u_{o\phi}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta u_{o\phi} = -\left(\frac{K_{ox\phi} - aK_{oxx} \lambda}{K_{o\phi\phi} - aK_{ox\phi} \lambda}\right) \delta u_{ox} \quad (26)$$

식(26)으로부터 팩의 오른쪽 부분과 구멍의 한 점이 접촉하고 있는 현재 상태, 즉 팩의  $x$ 축 위치 오차가 0보다 큰 경우( $\delta u_{ox} > 0$ ), 다음 상태에서 팩의 자세 변화  $\delta u_{o\phi}$ 는  $\lambda$ ,  $a$ ,  $K_{oxx}$ ,  $K_{o\phi\phi}$  및  $K_{ox\phi}$ 에 의해 정해지며, 식(27) 또는 식(28)과 같은 조건을 만족하도록 적절히 설정하면, 팩의 자세가 왼쪽 방향으로 회전하게 되어 원활한 삽입이 가능해진다.

$$\delta u_{o\phi} = -\left(\frac{K_{ox\phi} - aK_{oxx} \lambda}{K_{o\phi\phi} - aK_{ox\phi} \lambda}\right) \delta u_{ox} > 0, \quad (27)$$

$$K_{ox\phi} > aK_{oxx} \lambda, \quad K_{o\phi\phi} < aK_{ox\phi} \lambda$$

$$\delta u_{\phi} = - \left( \frac{K_{\alpha\phi} - aK_{\alpha x}\lambda}{K_{\phi\phi} - aK_{\alpha\phi}\lambda} \right) \delta u_{\alpha} > 0, \quad (28)$$

$$K_{\alpha\phi} < aK_{\alpha x}\lambda, K_{\phi\phi} > aK_{\alpha\phi}\lambda$$

예를 들어, 그림 4에서  $(\alpha, \phi_0)$ 를  $(45^\circ, 350^\circ)$ ,  $(K_{\alpha x}, K_{\phi y}, K_{\phi\phi})$ 를  $(100, 1500, 0.5)$ 로 설정하면, 식(4)에 의해  $K_{\alpha\phi}$ 는 1.37로 정해진다. 이때 팩이  $x_0$  축 방향으로 약 0.5[N]의 힘을 받을 경우, 식(28)을 만족하게 되고, 이 힘으로 인한 팩의 자세 변화  $\delta u_{\phi}$ 는 약  $0.7^\circ$  왼쪽 방향으로 회전하게 된다. 여기서  $r=0.03$ [m],  $y_1=0.06$ [m],  $y_2=0.06$ [m],  $y_3=0.1$ [m],  $x_1=0.03$ [m],  $x_2=0.03$ [m], 그리고  $x_3=0$ [m]이다.

결과적으로 로봇 손을 이용한 팩인홀 작업에서 팩의 원활한 삽입이 되기 위해서는 컴플라이언스 기준점의 위치를 팩과 구멍의 기하학적인 조건에 따라 적절히 설정하여야 하고, 원하는  $\delta u_{\phi}$ 의 정도에 따라 작업 공간에서의 강성값을 적절히 계획해 주어야 함을 알 수 있다. 이러한 강성값은 비선형 최적화 기법을 사용하여 구할 수 있다. 또한 팩의  $x_0$ 축과  $z_0$ 축을 중심으로 한 회전축과의 상호 간섭  $K_{\alpha\phi}$ 는 팩의 자세를 변화시켜 원활한 삽입이 가능해지도록 하는 요소로 활용할 수 있다.

이러한 해석을 바탕으로 팩이 구멍의 두 점에 접촉하는 경우에도 유사한 해석이 가능하며, 여기서는 생략한다.

## VI. 결론

본 논문에서는 로봇 손을 이용한 팩인홀(Peg-in-hole)작업에서 효율적인 삽입을 위한 컴플라이언스 기준점 설정 및 강성값 설정에 관하여 해석하였다. 이러한 해석을 통하여 로봇 손을 이용한 팩인홀 작업을 성공적으로 수행하기 위해서는 원하는 컴플라이언스 특성을 팩과 구멍의 기하학적 조건에 따라

신중하게 설정하여야 하고, 컴플라이언스 기준점의 위치 설정이 중요함을 확인할 수 있었다.

## 참고 문헌

- [1] T. Yoshikawa, and X.-Z. Zheng, "Coordinated dynamic hybrid position/force control for multiple robot manipulators handling one constrained object," *Int. Jour. of Robotics Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 219-230, 1993.
- [2] H. Maekawa, K. Tanie, and K. Komoria, "Dynamic Grasping Force Control Using Tactile Feedback for Grasp of Multifingered Hand," *Proc. of the Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2462-2469, April 1996.
- [3] V. Nguyen, "Constructing Force-Closure Grasps in 3-D," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 240-245, March 1987.
- [4] M.R. Cutkosky, and I. Kao, "Computing and controlling the compliance of a robotic hand," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 5, No. 2, pp. 151-165, 1989.
- [5] Y. T. Lee, H. -R Choi, W. K. Chung, and Y. Youm, "Stiffness Control of a Coupled Tendon-Driven Robot Hand," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 14, No. 5, pp. 10-19, Oct. 1994.
- [6] B. -H. Kim, B. -J. Yi, I. H. Suh, and S. -R. Oh, "A Biomimetic Compliance Control of Robot Hand by Considering Structures of Human Finger," Accepted on the 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation.
- [7] D. E. Whitney, "Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts," *Jour. of Dynamic systems, Measurement, and control*, Vol. 104, pp. 65-77, March 1982.
- [8] T. Matsuoka, T. Hasegawa, T. Kiriki, and K. Honda, "Mechanical Assembly based on Motion Primitives of Multi-fingered Hand," *Proc. of Advanced Intelligent Mechatronics*, 1997.
- [9] K. B. Shimoga and A. A. Goldenberg, "Grasp Admittance Center: Choosing Admittance Center Parameters," *Proc. of American Control Conference*, pp. 2527-2532, 1991.