

팩인홀 작업을 효율적으로 수행하기 위한 컴플라이언스 해석

김병호***, 이병주*, 서일홍*, 오상록**

Compliance Analysis for Effective Peg-In-Hole Task

Byoung-Ho Kim***, Byung-Ju Yi*, Il Hong Suh*, and Sang-Rok Oh**

ABSTRACT

This paper deals with an analysis of the compliance characteristic for effective peg-in-hole task using robot hand without inter-finger coupling. We first observe the fact that some of coupling stiffness elements cannot be planned arbitrary. Next, we classify the task of inserting a peg-in-a-hole into two contact styles between the peg and the hole. Then, 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 location of compliance center on the peg and the coupling stiffness element existing between the translational and the rotational direction play important roles for successful peg-in-hole task. Simulation results are included to verify the feasibility of the analytic results.

Key Words : Peg-in-hole(팩인홀), Analysis of compliance characteristic(컴플라이언스 특성 해석), Robot hand(로봇 손).

1. 서론

로봇 손을 이용하여 물체를 잡고 조작하는 경우^[1-3]에는 실제로 손가락 구조에 힘 센서를 장착하기에 어려움이 따르고, 또한 힘 센서로부터 측정된 힘 신호에는 실질적으로 외란이 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 측정한 힘 신호를 사용하는 방법 대

신에 컴플라이언스(compliance) 제어 방법이 효과적으로 사용될 수 있다. 이와 관련하여 많은 연구자들이 파지 강성 또는 컴플라이언스 분야에 대하여 연구해 왔다^[4-7]. Nguyen^[4]은 로봇 손에 의해 파지된 물체의 컴플라이언스 제어를 위하여 2 차원 및 3 차원에서 손가락 끝에서의 강성을 가상의 스프링으로 모델링 하였다. Yokoi^[5]등은 직접 컴플라이언스 제어 방법을 제안하고, 병렬 팔 메커니즘에 적용하였다. Cutkosky^[6]등은 로봇 손가락의 컴플라이언스와 각 손가락의 서어보(servo) 이득, 그리고 파지 형태의 기하학적인 변화등에 의해 결정되는 다지 로봇 손의 컴플라이언스 모델에 관하여 해석하였다. 또한 Lee^[7]등은 로봇 손에 파지된 물

* 한양대학교 전자컴퓨터공학부

** 한국과학기술연구원 지능제어연구센터

체의 작업 공간에서 대각선 성분만을 갖는 강성 행렬을 정의하고, 이를 제어하기 위한 방법에 대하여 연구하였다. 최근에 Kim^[8]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 손가락의 제어를 기반으로 한 컴플라이언스 제어 방법을 제안하였다.

본 논문에서는 독립적인 손가락의 제어를 기반으로 한 컴플라이언스 제어 방법을 팩인홀(Peg-in-hole) 작업에 적용하고자 한다. 로봇 손을 이용한 팩인홀 작업과 관련하여 Whitney^[9]는 단단한 팩을 구멍에 삽입하기 위한 기하학적인 조건 및 힘 평형 관계를 분석하였고, Asada^[10]등은 팩의 삽입 속도 향상을 위한 방법을 연구하였으며, Matsuoka^[11]등은 다중 센서 정보를 기반으로 하여 팩의 자세를 제어하였다. 또한 Shimoga^[12]등은 로봇 손을 이용한 물체의 구속된 조작에 있어서 컴플라이언스 기준점을 물체가 외부 환경 또는 조립 물체에 최초로 접촉하는 접촉점에 설정하도록 언급하고 있다. 그러나 기존의 연구에서는 보다 효율적인 팩의 삽입을 위한 컴플라이언스 기준점에서의 강성값을 설정하는 방법에 관해서는 아직까지 언급되지 않았다.

따라서 본 논문에서는 로봇 손을 이용한 팩인홀 작업을 효율적으로 수행하기 위한 컴플라이언스 특성에 관하여 해석하고자 한다. 또한, 팩인홀 작업에서 보다 효율적으로 팩을 구멍에 삽입하기 위해서는 컴플라이언스 기준점의 위치와 작업 공간에서의 위치 이동 방향과 회전 방향간의 상호 간섭 강성의 역할이 중요함을 보인다.

2. 독립 손가락 기반 컴플라이언스 제어

그림 1은 2차원 공간에서 세 손가락을 갖는 로봇 손을 이용한 팩인홀 작업을 나타낸다. 그림 1에서 작업 공간에서 주어진 강성 행렬 $[K_o]$ 와 손가락 끝 공간에서의 강성 행렬 $[K_f]$ 간의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다^[8].

$$[K_o] = [G_o^f]^T [K_f] [G_o^f], \quad (1)$$

여기서

$$[K_o] = \begin{bmatrix} K_{oxx} & K_{oxy} & K_{ox\phi} \\ K_{oxy} & K_{oyy} & K_{oy\phi} \\ K_{ox\phi} & K_{oy\phi} & K_{o\phi\phi} \end{bmatrix},$$

$[G_o^f]$ 는 작업 공간과 손가락 끝 공간간의 자코비안 행렬(Jacobian matrix)을 나타내고, $[G_o^f]^T$ 는 $[G_o^f]$ 의 전치 행렬(transpose matrix)을 나타낸다.

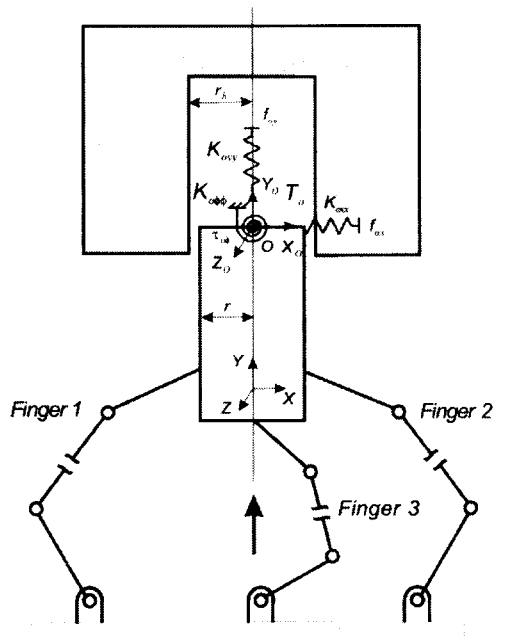


Fig. 1 Peg-in-hole task by a robot hand.

2차원의 작업 공간에서 주어지는 3×3 강성 행렬 $[K_o]$ 를 생성하기 위하여 로봇 손은 최소한 세 개의 손가락을 지녀야 하는데, 식 (1)을 벡터 형태로 재정리하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다^[8].

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

여기서

$$K_{oo} = [K_{oxx} \quad K_{oxy} \quad K_{ox\phi} \quad K_{oxy} \quad K_{oy\phi} \quad K_{o\phi\phi}]^T,$$

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

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

x_i 와 y_i 는 각각 i 번째 손가락의 파지점과 팩의 컴플라이언스 기준점간의 거리를 나타내는 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 0 으로 나타남을 확인할 수 있는데, 이것은 독립 손가락 기반 컴플라이언스 제어를 위해 각 손가락 공간에서 상호 간섭 강성 ${}^iK_{fy}$ ($i=1,2,3$) 를 제거하였기 때문에 결과적으로 이들의 합인 K_{oxy} 가 항상 0 이 됨을 의미한다. 또한, 세 번째 행은 팩의 x_o 축과 z_o 축을 중심으로 한 회전축과의 상호 간섭 $K_{ox\phi}$ 와 관련이 있다. 여기서 K_{ff} 의 모든 요소는 양수이어야 하고, y_1, y_2, y_3 는 모두 양수이기 때문에 K_{oxy} 는 항상 존재하게 된다.

한편, 그림 2 와 같이 변형된 파지 자세를 취하는 경우에 대하여 고려해 보자. 그림 2 는 세 번째 손가락의 접촉점이 컴플라이언스 기준점의 위쪽에 있는 경우인데, 이러한 경우 $[B_f^o]$ 의 3 행 5 열 요소가 $-y_3$ 로 바뀌게 되어 K_{oxy} 를 0 으로 설정하는 것이 가능하다^[8]. 그러나 팩인홀 작업에서는 이와 같은 파지 자세가 허용되지 않으므로 $K_{ox\phi}$ 를 0 으로 설정하는 것이 불가능하다. 따라서 항상 $K_{ox\phi}$ 가 존재하게 된다.

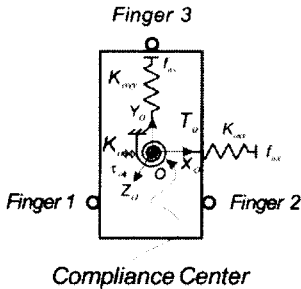


Fig. 2 A three-fingered grasp.

식 (2)에서 $[B_f^o]$ 의 두 번째 행과 세 번째 행을 제외한 행렬을 $[D_f^o]$ 라 하고, 벡터 K_{oo} 의 요소 중에서 K_{oxy} 와 $K_{ox\phi}$ 를 제외한 벡터를 K_{oo}^* 라 하면, 식 (2)는 다음과 같이 재정리할 수 있고,

$$K_{oo}^* = [D_f^o] K_{ff} \tag{3}$$

선형 프로그래밍 기법을 사용하여 K_{ff} 를 구할 수 있다^[8]. 결과적으로, $K_{oo\phi}$ 는 다음과 같이 정해진다.

$$K_{oo\phi} = [B_f^o]_3 K_{ff} \tag{4}$$

여기서 $[B_f^o]_3$ 는 $[B_f^o]$ 의 3 행을 나타낸다.

3. 팩인홀 작업을 위한 컴플라이언스 특성 해석

일반적으로 팩을 구멍에 삽입할 때 그림 3 과 같이 접촉이 일어나게 될 경우, 접촉으로 인한 반응력에 의해 팩이 컴플라이언스 기준점(compliance center)을 중심으로 반시계 방향으로 회전하는 효과가 생길 수 있다면, 보다 효율적인 삽입이 이루어질 수 있다. 본 절에서는 로봇 손을 이용한 팩인홀 작업에서 보다 효율적으로 팩인홀 작업을 수행하기 위한 컴플라이언스 특성을 해석하고, 컴플라이언스 기준점의 위치가 중요함을 제시하고자 한다. 여기서는 준 안정적인 상태에서 팩의 동작을 고려한다.

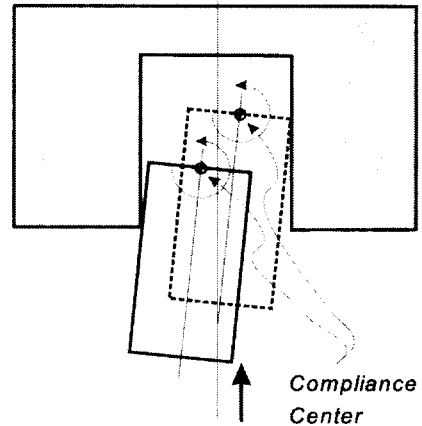


Fig. 3 Insertion of a peg into a hole: left or right-side contact.

3.1 팩의 왼쪽 부분이 구멍에 접촉할 경우

세 손가락을 갖는 로봇 손을 이용하여 2 차원에서 단단한 팩을 구멍에 삽입하는 작업의 경우, 그림 4 와 같이 팩의 왼쪽 부분이 구멍에 접촉하는 경우를 고려해 보자. 그림 4 에서 팩의 컴플라

이언스 기준점에 부착된 가상 스프링(virtual spring)에 작용하는 힘 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 x , y 및 회전 방향에 대한 가상 스프링의 미소 변위는 다음과 같고,

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

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

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

u_{oj}^d 와 u_{oj}^a 는 각각 j 축에 대한 원하는 위치와 실제 위치를 나타낸다.

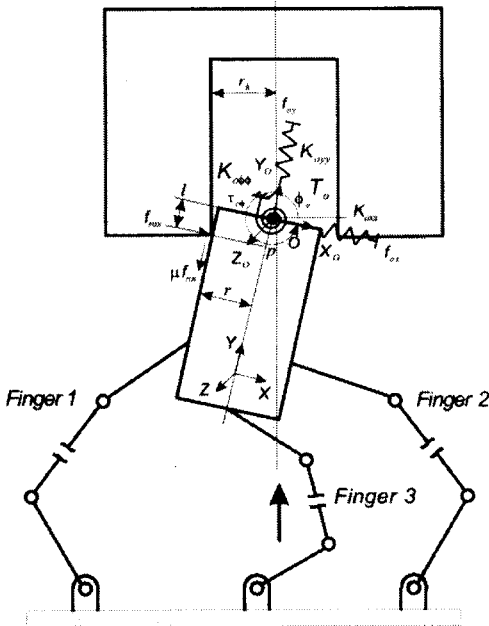


Fig. 4 Left-side contact.

그러면 x 방향의 반응력 ($f_{rox} > 0$) 에 의해 유도되는 x , y 및 회전 방향에 대한 힘 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

$$f_{oy} = -\mu f_{rox}, \quad (7)$$

$$\tau_{o\phi} = f_{rox}(l + \mu r), \quad (8)$$

여기서 μ , l 및 r 은 각각 마찰 계수, 팩의 삽입

길이 및 팩의 반지름을 나타낸다.

팩이 구멍에 접촉할 때 나타나는 반응력에 의한 팩의 자세 변화를 확인하기 위하여 원하는 팩의 추종 경로를 의도적으로 접촉하는 구멍의 벽 내부에 두면, x 방향의 가상 스프링의 미소 변위 δu_{ox} 는 음수가 되고, 양의 방향으로의 반응력 및 마찰력이 발생되며, 동시에 이로 인한 토크에 의해 팩의 자세 변화가 일어나게 된다. 식 (5), (6) 및 (8)로부터, 컴플라이언스 기준점에서의 토크 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있고,

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

식 (9)를 재정리 하면, $\delta u_{o\phi}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

식 (10)에서 대 괄호안의 부호는 항상 양수이고, δu_{ox} 는 음수이기 때문에 팩의 왼쪽 부분이 구멍에 접촉하는 경우에 나타나는 팩의 자세 변화는 적어도 0 보다 크다. 따라서 삽입되는 팩은 컴플라이언스 기준점에 대하여 시계 반대 방향으로 회전하게 되므로 팩의 원활한 삽입이 가능해진다. 또한, l 이 0 이고 마찰이 없는 경우에도 $K_{ox\phi}$ 에 의해 성공적인 팩의 삽입이 가능해짐을 알 수 있다.

3.2 팩의 오른쪽 부분이 구멍에 접촉할 경우

그림 5는 로봇 손을 이용한 팩인출 작업에서 팩의 오른쪽 부분이 구멍에 접촉하는 경우를 나타내는데, 이 경우에 팩의 컴플라이언스 기준점에 부착된 가상 스프링에 작용하는 힘 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{ox} = f_r \{ \cos(\phi_0) + \mu \sin(\phi_0) \}, \quad (11)$$

$$f_{oy} = -f_r \{ \sin(\phi_0) + \mu \cos(\phi_0) \}, \quad (12)$$

$$\tau_{o\phi} = -r f_{ox} \sigma, \quad (13)$$

여기서

$$\sigma = - \left(\frac{\tan(\phi_0) - \mu}{1 + \mu \tan(\phi_0)} \right) \geq 0, \quad \phi_{0,\min} \leq \phi_0 \leq 2\pi,$$

$$\phi_{0,\min} = \frac{3\pi}{2} + \cos^{-1} \left(\frac{r}{r_h} \right),$$

$\phi_{0,\min}$ 와 r_h 는 각각 팩의 두 점이 구멍에 접촉하는 경우에 있어서 팩의 자세가 최소가 되는 ϕ_0 와 구

명의 반지름을 나타낸다.

그림 5 와 같이 팩의 오른쪽 부분이 구멍에 접촉하는 경우, 음의 방향으로의 반응력 및 마찰력이 발생되며, 동시에 이로 인한 토크에 의해 팩의 자세 변화가 일어나게 된다.

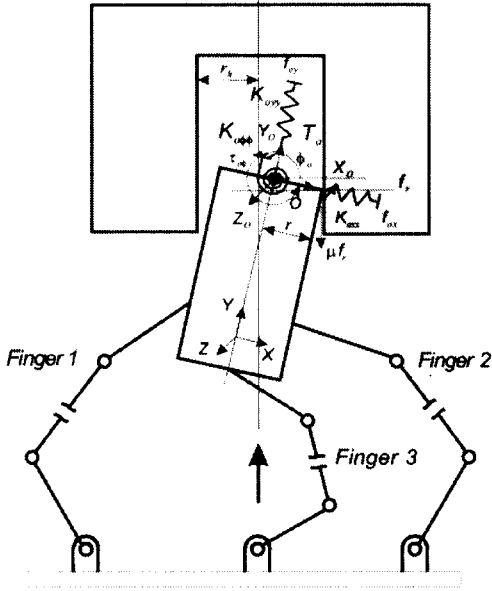


Fig. 5 Right-side contact.

식 (5), (11) 및 (13)으로부터, 컴플라이언스 기준점에서의 토크 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있고,

$$\begin{aligned} & K_{ox\phi}\delta u_{ox} + K_{oy\phi}\delta u_{oy} \\ & = -rK_{ox\sigma}\sigma\delta u_{ox} - rK_{oy\sigma}\sigma\delta u_{oy} \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)를 재정리 하면, δu_{oy} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta u_{oy} = -\left(\frac{K_{ox\phi} + rK_{ox\sigma}\sigma}{K_{oy\phi} + rK_{oy\sigma}\sigma} \right) \delta u_{ox} \quad (15)$$

식 (15)에서 대 괄호안의 부호는 항상 양수이고, δu_{ox} 는 양수이기 때문에 팩의 오른쪽 부분이 그림 5 와 같이 구멍에 접촉하는 경우에 나타나는 팩의 자세 변화는 적어도 0 보다 작다. 따라서 삽입되는 팩은 컴플라이언스 기준점에 대하여 시계 방향으로 회전하게 되므로 팩의 삽입이 어려워짐을 알 수 있다.

한편, 그림 5 에서 팩의 컴플라이언스 기준점

이 그림 6 과 같이 이동된 경우를 고려해 보자.

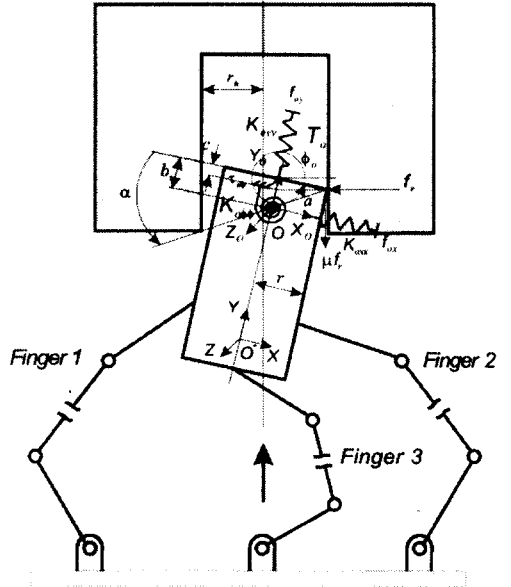


Fig. 6 Right-side contact(in case that the location of compliance center is modified).

그림 6 에서 팩의 끝점과 반응력 벡터의 연장선과 팩의 중심선이 만나는 점간의 거리 c 와 팩의 컴플라이언스 기준점과 접촉점간의 거리 a , 그리고 α 각은 각각 다음과 같다.

$$c = r|\tan(\phi_0)|, \quad (16)$$

$$a = \sqrt{r^2 + b^2}, \quad (17)$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{r}{a}\right), \quad (18)$$

여기서 b 는 팩의 끝점과 컴플라이언스 기준점간의 거리를 나타내는 변수이다.

그림 6 에서 b 를 c 보다 크게 설정하면, x 방향의 반응력 ($f_x > 0$)에 의해 유도되는 x , y 및 회전 방향에 대한 힘 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{ox} = f_r \{ \cos(\phi_0) + \mu \sin(\phi_0) \}, \quad (19)$$

$$f_{oy} = -f_r \{ \sin(\phi_0) + \mu \cos(\phi_0) \}, \quad (20)$$

$$\tau_{o\phi} = af_{ox}\lambda \quad (21)$$

여기서 λ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{\sin(\alpha) + \cos(\alpha) \tan(\phi_0)}{1 + \mu \tan(\phi_0)}$$

$$\frac{\mu \{ \cos(\alpha) - \sin(\alpha) \tan(\phi_0) \}}{1 + \mu \tan(\phi_0)}$$

λ 는 변수 b 에 의해 적절히 α 각을 정하면, 항상 양수가 된다.

식 (5), (19) 및 (21)로부터, 컴플라이언스 기준점에 대한 토오크 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있고,

$$K_{\alpha\phi} \delta u_{\alpha} + K_{\phi\phi} \delta u_{\phi}$$

$$= a K_{\alpha\alpha} \lambda \delta u_{\alpha} + a K_{\phi\phi} \lambda \delta u_{\phi} \quad (22)$$

식 (22)를 재정리 하면, δu_{ϕ} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta u_{\phi} = - \left(\frac{K_{\alpha\phi} - a K_{\alpha\alpha} \lambda}{K_{\phi\phi} - a K_{\phi\phi} \lambda} \right) \delta u_{\alpha} \quad (23)$$

식 (23)으로부터 팩의 자세 변화 δu_{ϕ} 는 다음과 같이 주어지는 식 (24) 또는 식 (25)의 조건이 만족되면, 적어도 0 보다 크고, 팩의 자세가 컴플라이언스 기준점에 대하여 반시계 방향으로 회전하게 되어 팩의 원활한 삽입이 가능해진다.

$$\delta u_{\phi} = - \left(\frac{K_{\alpha\phi} - a K_{\alpha\alpha} \lambda}{K_{\phi\phi} - a K_{\phi\phi} \lambda} \right) \delta u_{\alpha} > 0, \quad (24)$$

$$K_{\alpha\phi} > a K_{\alpha\alpha} \lambda, K_{\phi\phi} < a K_{\phi\phi} \lambda$$

$$\delta u_{\phi} = - \left(\frac{K_{\alpha\phi} - a K_{\alpha\alpha} \lambda}{K_{\phi\phi} - a K_{\phi\phi} \lambda} \right) \delta u_{\alpha} > 0, \quad (25)$$

$$K_{\alpha\phi} < a K_{\alpha\alpha} \lambda, K_{\phi\phi} > a K_{\phi\phi} \lambda$$

식 (24)와 식 (25)에서 a 는 팩의 반지름 r 과 컴플라이언스 기준점의 위치에 따라 정해지는 b 에 의해 결정되고, λ 는 α, μ, ϕ_0 에 의해 정해지며, $K_{\alpha\phi}$ 는 식 (3)과 (4)에 의해 결정된다. 결과적으로 식 (24)와 식 (25)에 나타낸 강성 조건의 물리적 의미는 로봇 손을 이용하여 성공적인 팩인홀 작업을 수행하기 위해 근본적으로 고려해야 할 조건으로서, 작업 공간의 강성값을 임의로 설정할 수 없음을 보여주고 있으며, 작업 공간의 각 축에 대한 강성값은 a 와 λ 를 고려하여 식 (24) 또는 식 (25)의 조건을 만족하도록 계획하여야 함을 의미한다.

다음은 그림 6에서 컴플라이언스 기준점 O 가 O^* 로 이동된 경우를 고려해 보자. 이와 같은 경우에는 2장에서 설명한 바와 같이 $K_{\alpha\phi}$ 를 0으로

설정하는 것이 가능하기 때문에 δu_{ϕ} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta u_{\phi} = \left(\frac{a K_{\alpha\alpha} \lambda}{K_{\phi\phi}} \right) \delta u_{\alpha} \quad (26)$$

즉, 컴플라이언스 기준점이 파지점으로 구성된 다각형 내부에 위치하면, 팩의 자세 변화 δu_{ϕ} 는 항상 적어도 0 보다 크게 됨을 알 수 있다.

결과적으로 컴플라이언스 기준점의 위치를 팩과 구멍의 기하학적인 조건에 따라 적절히 설정하는 것이 팩의 원활한 삽입을 위해 중요하고, 작업 공간에서의 강성값을 식 (24) 또는 식 (25)의 조건을 근거로 하여 적절히 계획해 주면, 효율적인 팩인홀 작업이 가능함을 알 수 있다. 또한, 이러한 강성값은 이미 알려져 있는 최적화 기법을 사용하여 구할 수 있다. 한편, 작업 공간에서의 상호 간섭 $K_{\alpha\phi}$ 가 원활한 팩의 삽입을 위해 적절히 이용될 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과 및 검토

본 장에서는 팩이 구멍에 접촉할 때 효율적인 팩의 삽입을 위한 팩의 자세 변화를 확인하고자 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 5 관절 구조의 세 손가락을 갖는 로봇 손^[8,13]이 사용되었고, 팩의 작업 공간에 설정된 강성 행렬은 다음과 같다.

$$[K_o] = \begin{bmatrix} K_{\alpha\alpha} & K_{\alpha y} & K_{\alpha\phi} \\ K_{\alpha y} & K_{yy} & K_{y\phi} \\ K_{\phi x} & K_{\phi y} & K_{\phi\phi} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 100 & 0 & 1.37 \\ 0 & 1500 & 0 \\ 1.37 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

여기서 팩의 삽입 방향 y 는 x 방향에 비해 큰 강성을 갖도록 하였고, 회전 방향에 대해서는 원활한 팩의 삽입이 가능하도록 컴플라이언스를 크게 설정하였으며, 상호 간섭 강성 $K_{\alpha\phi}$ 는 식 (4)에 의하여 결정되었다.

로봇 손가락의 파지점은 각각 다음과 같다. 첫 번째 손가락의 파지점 $(-x_1, -y_1)$ 은 $(-0.03, -0.06)$, 두 번째 손가락의 파지점 $(x_2, -y_2)$ 은 $(0.03, -0.06)$ 그리고 세 번째 손가락의 파지점 $(x_3, -y_3)$ 은 $(0.0, -0.1)$ 이 설정되었다. 여기서 나타낸 파지

접 좌표는 팻의 컴플라이언스 기준점의 좌표계에 대한 각 손가락의 파지점의 기하학적 거리를 나타낸다. 팻과 구멍의 재질은 단단한 나무로 가정하였고, 마찰계수는 μ 는 0.3, 팻의 초기 자세는 350° 로 설정하였다.

첫 번째 시뮬레이션은 그림 4의 작업을 대상으로 하여 팻이 받는 반응력으로 인한 팻의 자세 변화를 확인하고자 한다. 여기서 팻의 삽입 거리 l 은 0.03m로 고정하였다. 두 번째 시뮬레이션은 그림 5의 경우에 대한 팻의 자세 변화를 확인하였으며, 세 번째 시뮬레이션은 그림 6과 같이 컴플라이언스 기준점이 이동된 경우를 다루었다. 여기서 팻의 끝점과 컴플라이언스 기준점간의 거리 b 는 0.05m로 설정하였다.

시뮬레이션 결과는 각각 그림 7, 그림 8 및 그림 9에 나타내었다. 그림 7은 팻의 왼쪽 부분이 구멍에 접촉하고 있는 동안에 팻의 자세가 시계 반대 방향으로 적절히 변화되고 있음을 보여준다. 그림 8 (a)의 경우에는 팻의 자세가 감소하고 있는 반면, 그림 8 (b)의 경우에는 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 그림 8 (b)의 경우는 팻의 삽입이 효율적으로 이루어질 수 있지만, 그림 8 (a)의 경우에는 팻의 삽입이 방해받게 됨을 알 수 있다. 또한, 그림 9로부터 세 번째 시뮬레이션이 수행되는 동안 식 (25)에 기술된 조건이 모두 만족되고 있음을 확인할 수 있다. 결과적으로 효율적인 팻인출 작업을 위해 팻의 컴플라이언스 기준점의 위치와 작업 공간에서의 상호 간섭 강성 $K_{\alpha\phi}$ 의 역할이 중요함을 알 수 있다.

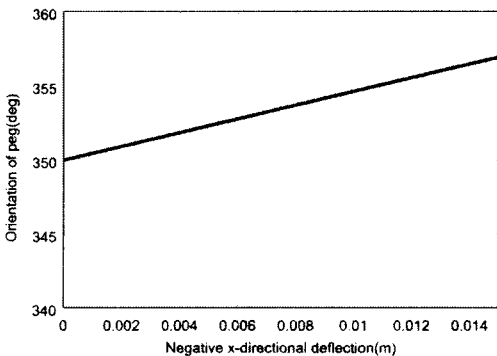


Fig. 7 Orientation of the peg for left-side contact.

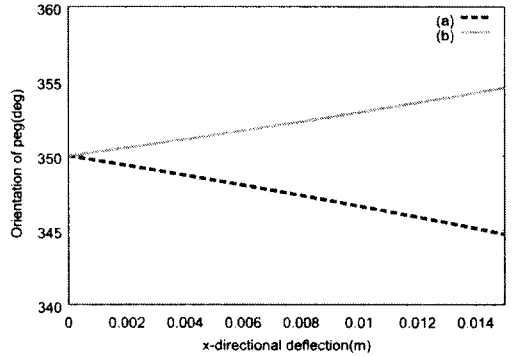


Fig. 8 Orientation of the peg for right-side contact : (a) is the case that the compliance center lies in the peg tip and (b) is modified case.

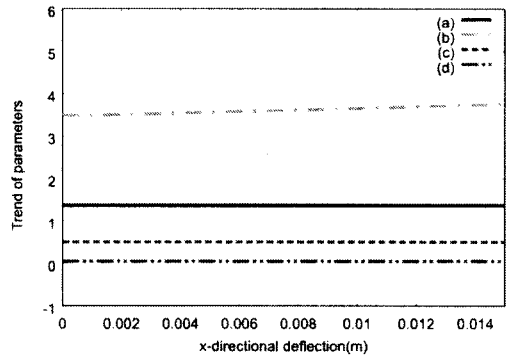


Fig. 9 Trend of parameters: (a) $K_{\alpha\phi}$ (b) $aK_{\alpha\lambda}$ (c) $K_{\alpha\phi}$ (d) $aK_{\alpha\phi}\lambda$

5. 결론

본 논문에서는 로봇 손을 이용한 팻인출 작업을 보다 효율적으로 수행하기 위한 컴플라이언스 특성에 대하여 관하여 해석하였다. 이러한 해석을 통하여 로봇 손을 이용한 팻인출 작업을 성공적으로 수행하기 위해서는 원하는 컴플라이언스 특성을 팻과 구멍의 기하학적 조건에 따라 신중하게 설정하여야 하고, 컴플라이언스 기준점의 위치와 작업 공간에서의 위치 이동 방향과 회전 방향간의 상호 간섭 강성이 성공적인 팻의 삽입을 위해 중요함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 로봇 손을 이용한 조립 작업 분야에 유용하게 이용될 수 있다.

후 기

이 논문은 2000 년 한양대학교 교내연구비 지원으로 연구 되었음.

참고문헌

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. T. Hasegawa, T. Matsuoka, T. Kiriki, and K. Honda, "Manipulation of an object by a multi-fingered hand with multi-sensors," *Proc. of Int. Conf. on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, pp. 174-179, 1996.
3. H. Maekawa, K. Tanie, and K. Komoria, "Dynamic Grasping Force Control Using Tactile Feedback for Grasp of Multifingered Hand," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2462-2469, April 1996.
4. V. Nguyen, "Constructing Force-Closure Grasps in 3-D," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 240-245, March 1987.
5. K. Yokoi, M. Kaneko, and K. Tanie, "A Compliance Control Method Suggested by Muscle Networks In Human Arms," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 385-390, 1988.
6. 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.
7. 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.
8. 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," *Proc. Of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3880-3887, 2000.
9. 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.
10. H. Asada, Y. Kakumoto, "The Dynamic Analysis and Design of a High-Speed Insertion Hand Using the Generalized Centroid and Virtual Mass," *Jour. of Dynamic systems, Measurement, and control*, Vol. 112, pp. 646-652, 1990.
11. 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.
12. K. B. Shimoga and A. A. Goldenberg, "Grasp Admittance Center: Choosing Admittance Center Parameters," *Proc. of American Control Conference*, pp. 2527-2532, 1991.
13. B. -J. Yi, I. H. Suh, and S. -R. Oh, "Analysis of a five-bar finger mechanism having redundant actuators with applications to stiffness and frequency modulation," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 759-765, 1997.