로봇 손을 이용한 팩의 조립 및 분해 작업을 효율적으로 수행하기 위한 컴플라이언스 해석

Compliance Analysis for Effective Handling of Peg-In/Out-Hole Tasks Using Robot Hands

김 병 호, 이 병 주, 서 일 홍, 오 상 록
(Byoung-Ho Kim, Byung-Ju Yi, Il Hong Suh, and Sang-Rok Oh)

Abstract : This paper provides a guideline for the determination of compliance characteristics and the proper location of the compliance center in typical peg-in-hole and peg-out-hole tasks using robot hands. We first observe the fact that some of coupling stiffness elements cannot be planned arbitrarily. The given peg-in/out-hole tasks are classified into two contact styles. Then, we analyze the conditions of the operational stiffness matrix, which achieve the given peg-in/out-hole tasks effectively for each case. It is concluded that the location of the 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/out-hole tasks. The analytic results are verified through simulations.

Keywords : peg-in/out-hole, compliance characteristics, location of compliance center, robot hand.

I. 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 매니퓰레이터에 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 대신에 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 2차원 및 3차원에서 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 물체의 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. 또한, Dario[13]등에 의해 팩아웃홀(Peg-out-hole) 작업에 관한 연구가 이루어졌다. 그러나 기존의 연구에서는 보다 효율적인 팩의 삽입을 위한 컴플라이언스 기준점의 적절한 위치나 컴플라이언스 기준점에서의 강성값을 설정하는 방법에 관해서는 아직까지 언급되지 않았다. 더욱이 팩아웃홀 작업의 경우에 대해서는 컴플라이언스 기준점의 적절한 위치나 컴플라이언스 기준점에서의 강성값을 설정하는 방법에 관한 연구가 미흡한 실정이다. 실제적으로 이러한 요소들은 성공적인 팩인홀 또는 팩아웃홀 작업을 수행하기 위하여 근본적으로 고려되어야 한다.

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

접수일자 : 2000. 3. 22., 수정완료 : 2000. 5. 29.
김병호 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부,
한국과학기술연구원 지능제어연구센터
이병주, 서일홍 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부
오상록 : 한국과학기술연구원 지능제어연구센터

II. 독립 손가락 기반 컴플라이언스 제어

그림 1과 같이 2차원 공간에서 세 손가락을 갖는 로봇 손을 이용한 팩인홀 작업을 고려해 보자.

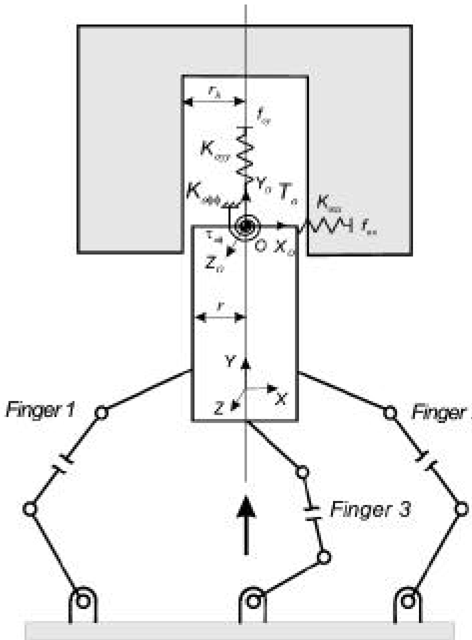

그림 1. 로봇 손을 이용한 팩인홀 작업.
Fig. 1. Peg-in-hole task by a robot hand.

로봇 손을 이용한 팩인/아웃홀 작업에서 팩의 원활한 삽입 및 분해를 위해서는 팩의 컴플라이언스 제어가 요구된다. 또한 팩의 작업 공간에 주어진 강성 특성을 만족시키기 위해서는 팩을 파지하고 있는 각 손가락 끝 공간에서 적절한 강성 특성을 지니도록 작업 공간의 강성 특성을 각 손가락 끝 공간으로 적절히 분배해 주어야 하는데, 이러한 관계식은 작업 공간의 토오크 식을 미소 변위에 대하여 편미분함으로써 구할 수 있다. 즉, 그림 1의 작업 공간의 강성 행렬 $[\boldsymbol{K}_o]$와 손가락 끝 공간에서의 강성 행렬 $[\boldsymbol{K}_f]$간의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[8].

$$[\boldsymbol{K}_o]=[\boldsymbol{G}_o^f]^T[\boldsymbol{K}_f][\boldsymbol{G}_o^f], \tag{1}$$

여기서

$$[\boldsymbol{K}_o]=\begin{bmatrix}\boldsymbol{K}_{oxx} & \boldsymbol{K}_{oxy} & \boldsymbol{K}_{oxf}\\ \boldsymbol{K}_{oyx} & \boldsymbol{K}_{oyy} & \boldsymbol{K}_{oyf}\\ \boldsymbol{K}_{ofx} & \boldsymbol{K}_{ofy} & \boldsymbol{K}_{off}\end{bmatrix},$$

$[\boldsymbol{G}_o^f]$는 작업 공간과 손가락 끝 공간간의 자코비안 행렬(Jacobian matrix)을 나타내고, $[\boldsymbol{G}_o^f]^T$는 $[\boldsymbol{G}_o^f]$의 전치 행렬(transpose matrix)을 나타낸다.

2차원의 작업 공간에서 주어지는 3×3 강성 행렬 $[\boldsymbol{K}_o]$를 생성하기 위하여 로봇 손은 최소한 세 개의 손가락을 지녀야 하는데, (1)을 벡터 형태로 재정리 하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다[8].

$$K_{oo}=[\boldsymbol{B}_f^o]\ K_{ff} \tag{2}$$

여기서

$$K_{oo}=\left[\boldsymbol{K}_{oxx}\ \boldsymbol{K}_{oxy}\ \boldsymbol{K}_{oxf}\ \boldsymbol{K}_{oyy}\ \boldsymbol{K}_{oyf}\ \boldsymbol{K}_{off}\right]^T,$$

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

$$K_{ff}=\left[{}^1\boldsymbol{K}_{fxx}\ {}^1\boldsymbol{K}_{fyy}\ {}^2\boldsymbol{K}_{fxx}\ {}^2\boldsymbol{K}_{fyy}\ {}^3\boldsymbol{K}_{fxx}\ {}^3\boldsymbol{K}_{fyy}\right]^T,$$

x_i와 y_i는 각각 i번째 손가락의 파지점과 팩의 컴플라이언스 기준점간의 거리를 나타내는 변수들을 나타내고, 모두 양수이며, ${}^i\boldsymbol{K}_{fxx}$, ${}^i\boldsymbol{K}_{fyy}$는 각각 i번째 손가락의 x와 y축에 대한 강성값을 나타 낸다.

(2)에서 $[\boldsymbol{B}_f^o]$를 살펴보면, 두번째 행의 모든 요소가 0으로 나타남을 확인할 수 있는데, 이것은 독립 손가락 기반 컴플라이언스 제어를 위해 각 손가락 공간에서 상호 간섭 강성 ${}^i\boldsymbol{K}_{fxy}$ $(i=1,2,3)$를 제거하였기 때문에 결과적으로 이들의 합인 $\boldsymbol{K}_{oxy}$가 항상 0이 됨을 의미한다. 또한, 세번째 행은 팩의 x_o 축과 z_o 축을 중심으로 한 회전축과의 상호 간섭 강성 $\boldsymbol{K}_{oxf}$와 관련이 있다. 여기서 K_{ff}의 모든 요소는 양수이어야 하고, y_1, y_2, y_3는 모두 양수이기 때문에 $\boldsymbol{K}_{oxf}$는 항상 존재하게 된다. 그리고 $\boldsymbol{K}_{oyf}$와 관련이 있는 네 번째 행은 (+), (-) 값이 공존한다. 따라서 선형 프로그래밍 기법에 의해 $\boldsymbol{K}_{oyf}$가 0이 되는 손가락 끝의 강성 해를 구할 수 있으므로 $\boldsymbol{K}_{oyf}$를 0으로 설정하는 것이 가능하다.

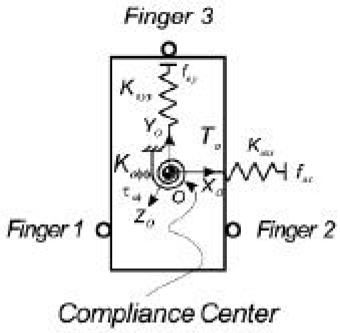

그림 2. 세 손가락을 갖는 로봇 손을 이용한 파지.
Fig. 2. A three-fingered grasp.

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

(2)에서 $[\boldsymbol{B}_f^o]$ 의 두 번째 행과 세 번째 행을 제외한 행렬을 $[\boldsymbol{D}_f^o]$ 라 하고, 벡터 K_{oo} 의 요소 중에서 $\boldsymbol{K}_{oxy}$ 와 $\boldsymbol{K}_{oxf}$ 를 제외한 벡터를 K_{oo}^* 라 하면, (2)는 다음과 같이 재정리할 수 있고,

$$K_{oo}^* = [\boldsymbol{D}_f^o] K_{ff} \tag{3}$$

선형 프로그래밍 기법을 사용하여 K_{ff} 를 구할 수 있다[8]. 결과적으로, $\boldsymbol{K}_{oxf}$ 는 다음과 같이 정해진다.

$$\boldsymbol{K}_{oxf} = [\boldsymbol{B}_f^o]_3 K_{ff} \tag{4}$$

여기서 $[\boldsymbol{B}_f^o]_3$ 는 $[\boldsymbol{B}_f^o]$ 의 3행을 나타낸다.

III. 팩인/아웃홀 작업을 위한 컴플라이언스 특성 해석

본 절에서는 로봇 손을 이용한 팩인/아웃홀 작업에서 보다 효율적으로 팩인/아웃홀 작업을 수행하기 위한 컴플라이언스 특성을 해석하고, 컴플라이언스 기준점의 위치가 중요함을 제시하고자 한다. 여기서는 준안정적인 상태에서 팩의 동작을 고려한다.

1. 팩인홀 작업 : 왼쪽 접촉

세 손가락을 갖는 로봇 손을 이용하여 2 차원에서 단단한 팩을 구멍에 삽입하는 작업의 경우, 그림 3과 같이 팩의 왼쪽 부분이 구멍에 접촉하는 경우를 고려해 보자. 2장에서 설명한 바와 같이 로봇 손이 그림 3과 같이 팩을 파지하는 경우, 팩의 컴플라이언스 기준점에 부착된 가상 스프링(virtual spring)에 작용하는 힘 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_{ox} \\ f_{oy} \\ t_{of} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{K}_{oxx} & 0 & \boldsymbol{K}_{oxf} \\ 0 & \boldsymbol{K}_{oyy} & 0 \\ \boldsymbol{K}_{ofx} & 0 & \boldsymbol{K}_{off} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} du_{ox} \\ du_{oy} \\ du_{of} \end{bmatrix}, \tag{5}$$

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

$$du_{ox} = u_{ox}^d - u_{ox}^a,$$
$$du_{oy} = u_{oy}^d - u_{oy}^a,$$
$$du_{of} = u_{of}^d - u_{of}^a,$$

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

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

$$f_{ox} = -f_{rox}, \tag{6}$$
$$f_{oy} = -m f_{rox}, \tag{7}$$
$$t_{of} = f_{rox}(l + mr), \tag{8}$$

여기서 m , 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 du_{ox} 는 음수가 되고,

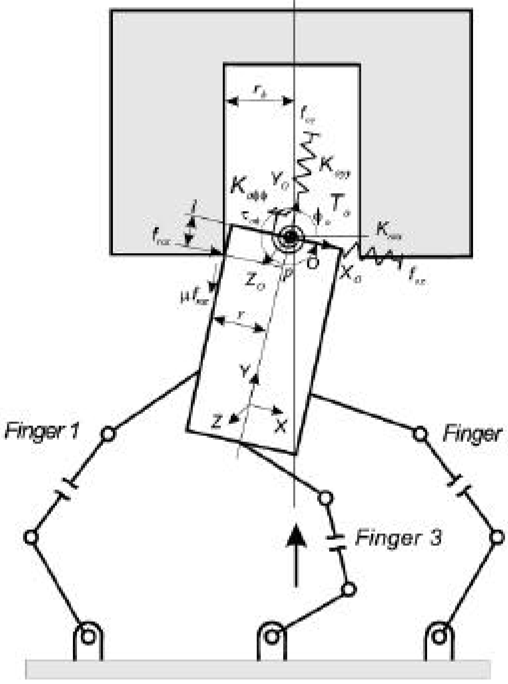

그림 3. 팩인홀 : 왼쪽 접촉.
Fig. 3. Peg-in-hole : left-side contact.

양의 방향으로의 반응력 및 마찰력이 발생되며, 동시에 이로 인한 토오크에 의해 팩의 자세 변화가 일어나게 된다. (5), (6) 및 (8)로부터, 컴플라이언스 기준점에서의 토오크 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있고,

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{K}_{oxf} du_{ox} + \boldsymbol{K}_{off} du_{of} \\ &= -\boldsymbol{K}_{oxx}(l + mr) du_{ox} - \boldsymbol{K}_{oxf}(l + mr) du_{of} \end{aligned} \tag{9}$$

(9)를 재정리 하면, du_{of} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$du_{of} = -\left(\frac{\boldsymbol{K}_{oxf} + \boldsymbol{K}_{oxx}(l + mr)}{\boldsymbol{K}_{off} + \boldsymbol{K}_{oxf}(l + mr)} \right) du_{ox} \tag{10}$$

(10)에서 대 괄호안의 부호는 항상 양수이고, du_{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 0이고 마찰이 없는 경우에도 $\boldsymbol{K}_{oxf}$ 에 의해 성공적인 팩의 삽입이 가능해짐을 알 수 있다

2. 팩인홀 작업 : 오른쪽 접촉

그림 4는 로봇 손을 이용한 팩인홀 작업에서 팩의 오른쪽 부분이 구멍에 접촉하는 경우를 나타낸다.

그림 4에서 팩의 컴플라이언스 기준점에 부착된 가

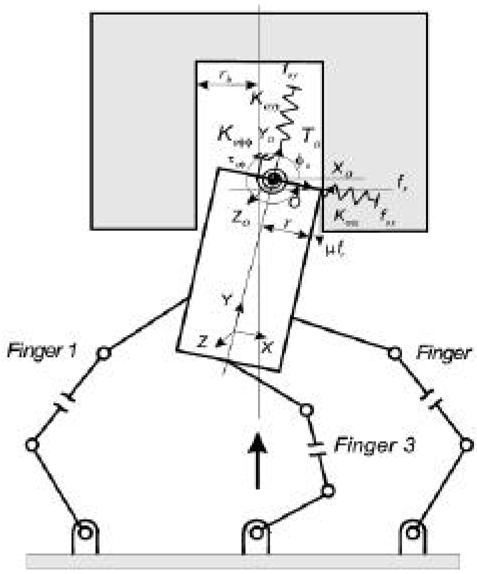

그림 4. 팩인홀 : 오른쪽 접촉.
Fig. 4. Peg-in-hole : right-side contact.

상 스프링에 작용하는 힘 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{ox} = f_r\{\cos(f_0) + m\sin(f_0)\}, \quad (11)$$

$$f_{oy} = -f_r\{\sin(f_0) + m\cos(f_0)\}, \quad (12)$$

$$t_{of} = -rf_{ox}s, \quad (13)$$

여기서

$$s = -\left(\frac{\tan(f_o) - m}{1 + m\tan(f_o)}\right) \geq 0, \quad f_{0,\min} \leq f_0 \leq 2p,$$

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

$f_{0,\min}$ 와 r_h 는 각각 팩의 두 점이 구멍에 접촉하는 경우에 있어서 팩의 자세가 최소가 되는 f_0 와 구멍의 반지름을 나타낸다.

그림 4와 같이 팩의 오른쪽 부분이 구멍에 접촉하는 경우, 음의 방향으로의 반응력 및 마찰력이 발생되며, 동시에 이로 인한 토오크에 의해 팩의 자세 변화가 일어나게 된다.

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

$$\boldsymbol{K}_{oxf}du_{ox} + \boldsymbol{K}_{off}du_{of} = -r\boldsymbol{K}_{oxx}s\,du_{ox} - r\boldsymbol{K}_{oxf}s\,du_{of} \quad (14)$$

(14)를 재정리 하면, du_{of} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$du_{of} = -\left(\frac{\boldsymbol{K}_{oxf} + r\boldsymbol{K}_{oxx}s}{\boldsymbol{K}_{off} + r\boldsymbol{K}_{oxf}s}\right)du_{ox} \quad (15)$$

(15)에서 대 괄호안의 부호는 항상 양수이고, du_{ox} 는 양수이기 때문에 팩의 오른쪽 부분이 그림 4와 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 4에서 팩의 컴플라이언스 기준점이 그림 5와 같이 이동된 경우를 고려해 보자.

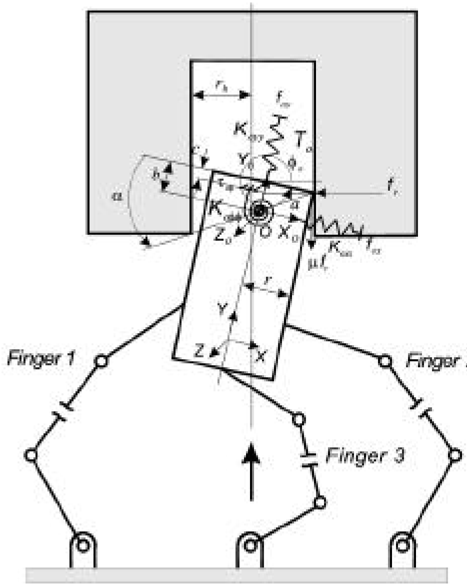

그림 5. 팩인홀 : 오른쪽 접촉(컴플라이언스 기준점이 이동된 경우).
Fig. 5. Peg-in-hole : right-side contact(in case that the location of compliance center is modified).

그림 5에서 팩의 끝점과 반응력 벡터의 연장선과 팩의 중심선이 만나는 점간의 거리 c 와 팩의 컴플라이언스 기준점과 접촉점간의 거리 a, 그리고 a 각은 각각 다음과 같다.

$$c = r\left|\tan(f_o)\right|, \quad (16)$$

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

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

여기서 b 는 팩의 끝점과 컴플라이언스 기준점간의 거리를 나타내는 변수이다.

그림 5에서 b 를 c 보다 크게 설정하면, x 방향의 반응력 $(f_r > 0)$ 에 의해 유도되는 x, y 및 회전 방향에 대한 힘 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{ox} = f_r\{\cos(f_0) + m\sin(f_0)\}, \quad (19)$$

$$f_{oy} = -f_r\{\sin(f_0) + m\cos(f_0)\}, \quad (20)$$

$$t_{of} = af_{ox}l \quad (21)$$

여기서 l 는 다음과 같이 정의된다.

$$l = \frac{\sin(a) + \cos(a)\tan(f_0) - m\{\cos(a) - \sin(a)\tan(f_0)\}}{1 + m\tan(f_0)}$$

l 는 변수 b 에 의해 적절히 a 각을 정하면, 항상 양수가 된다.

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

$$\boldsymbol{K}_{oxf} du_{ox} + \boldsymbol{K}_{off} du_{of} = a\boldsymbol{K}_{oxx}\, l\, du_{ox} + a\boldsymbol{K}_{oxf}\, l\, du_{of} \tag{22}$$

(22)를 재정리 하면, du_{of} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$du_{of} = -\left(\frac{\boldsymbol{K}_{oxf} - a\boldsymbol{K}_{oxx}\, l}{\boldsymbol{K}_{off} - a\boldsymbol{K}_{oxf}\, l}\right) du_{ox} \tag{23}$$

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

$$du_{of} = -\left(\frac{\boldsymbol{K}_{oxf} - a\boldsymbol{K}_{oxx}\, l}{\boldsymbol{K}_{off} - a\boldsymbol{K}_{oxf}\, l}\right) du_{ox} > 0, \quad \boldsymbol{K}_{oxf} > a\boldsymbol{K}_{oxx}\, l,\ \boldsymbol{K}_{off} < a\boldsymbol{K}_{oxf}\, l \tag{24}$$

$$du_{of} = -\left(\frac{\boldsymbol{K}_{oxf} - a\boldsymbol{K}_{oxx}\, l}{\boldsymbol{K}_{off} - a\boldsymbol{K}_{oxf}\, l}\right) du_{ox} > 0, \quad \boldsymbol{K}_{oxf} < a\boldsymbol{K}_{oxx}\, l,\ \boldsymbol{K}_{off} > a\boldsymbol{K}_{oxf}\, l \tag{25}$$

(24)와 (25)로부터, 주어진 팩인홀 작업을 효율적으로 수행하기 위해서는 작업 공간에서의 강성값을 기구학적 조건을 적절히 고려하여 신중히 설정하여야 함을 알 수 있다.

3. 팩아웃홀 작업

본 절에서는 로봇 손을 이용한 팩아웃홀 작업을 고려하고자 한다. 그림 6은 팩을 구멍에서 분해하는 동작에서 팩의 왼쪽 부분이 구멍에 접촉하는 경우를 나타낸다.

그림 6에서 컴플라이언스 기준점이 O_1, O_2, O_3 및 O_4 에 놓여 있을 경우, 각각의 경우에 대한 팩의 자세 변화는 위에서 기술한 과정을 통하여 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$du_{of} = -\left(\frac{\boldsymbol{K}_{oxf} + \boldsymbol{K}_{oxx}(l_1 - mr)}{\boldsymbol{K}_{off} + \boldsymbol{K}_{oxf}(l_1 - mr)}\right) du_{ox}\ , \tag{26}$$

$$du_{of} = -\left(\frac{\boldsymbol{K}_{oxf} + \boldsymbol{K}_{oxx}(l_2 - mr)}{\boldsymbol{K}_{off} + \boldsymbol{K}_{oxf}(l_2 - mr)}\right) du_{ox}\ , \tag{27}$$

$$du_{of} = -\left(\frac{\boldsymbol{K}_{oxf} - \boldsymbol{K}_{oxx}(l_3 + mr)}{\boldsymbol{K}_{off} - \boldsymbol{K}_{oxf}(l_3 + mr)}\right) du_{ox}\ , \tag{28}$$

$$du_{of} = -\left(-\frac{\boldsymbol{K}_{oxx}(l_4 + mr)}{\boldsymbol{K}_{off}}\right) du_{ox}. \tag{29}$$

여기서 $l_i (i=1,\ldots,4)$ 는 각각 접촉점과 i 번째 컴플라이언스 기준점간의 거리를 나타낸다. 특히, 컴플라이언스 기준점이 O_4 에 있을 경우, 독립 손가락 기반 컴플라이언스 제어 방법[8]에 의해 상호 간섭 강성 $\boldsymbol{K}_{oxf}$ 를 0으로 설정할 수 있다. 따라서 그림 6과 같이 왼쪽 접촉의 경우 du_{ox} 는 3.1절에서 기술한 바와 같이 음수이므로, 팩의 자세 변화 du_{of} 는 항상 0보다 작다.

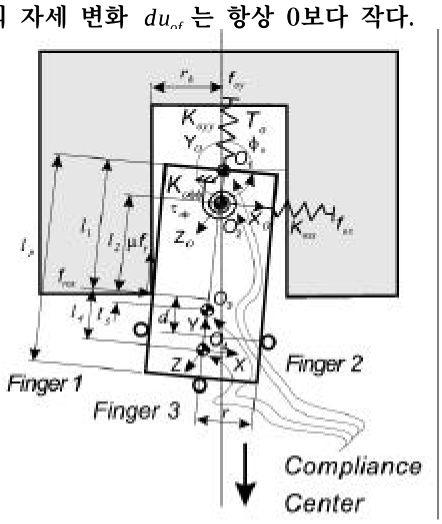

그림 6. 팩아웃홀 : 왼쪽 접촉.
Fig. 6. Peg-out-hole : left-side contact.

대부분의 경우, (26) (29)에서 m 는 1보다 작고, $l_i (i=1,\ldots,4)$ 와 r 은 m 보다 더 작다. 따라서 (26)과 (27)에 있는 괄호안의 부호는 양수인 반면, (28)과 (29)에 있는 괄호안의 부호는 음수가 된다. 왼쪽 접촉의 경우 du_{ox} 는 항상 음수이므로 (26)과 (27)에 있는 du_{of} 는 양수가 된다. 결과적으로 팩은 각각의 컴플라이언스 기준점을 중심으로 반시계 방향으로 회전하게 된다. 또한, 컴플라이언스 기준점이 팩의 끝부분에 가까이 있을수록 du_{of} 는 커짐을 알 수 있다. 이와는 반대로 (28)과 (29)에서는 du_{of} 가 음수가 되고, 팩은 각각의 컴플라이언스 기준점을 중심으로 시계 방향으로 회전하게 되어 원하지 않는 결과를 초래한다. 이러한 고찰을 통하여 컴플라이언스 기준점의 위치가 중요함을 확인할 수 있으며, 효율적인 팩의 분해를 위해서는 컴플라이언스 기준점을 온라인으로 적절히 계획해 주어야 함을 알 수 있다.

다음은 오른쪽 부분이 접촉하는 경우를 고려해 보자. 그림 7에서 컴플라이언스 기준점이 O_1 에 놓여 있을 경우에 대한 팩의 자세 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$du_{of} = -\left(\frac{\boldsymbol{K}_{oxf} - r\boldsymbol{K}_{oxx}\, r}{\boldsymbol{K}_{off} - r\boldsymbol{K}_{oxf}\, r}\right) du_{ox}\ , \tag{30}$$

여기서

$$r = \frac{m + \tan(f_o)}{1 - m\tan(f_o)} \ge 0, \quad m \ge \left|\tan(f_o)\right|.$$

또한, 컴플라이언스 기준점이 O_2 와 O_3 로 이동한 경우에 대한 팩의 자세 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$du_{of} = -\left(\frac{\boldsymbol{K}_{oxf} - a_i\boldsymbol{K}_{oxx} h_i}{\boldsymbol{K}_{off} - a_i\boldsymbol{K}_{oxf} h_i}\right) du_{ox}\ , \tag{31}$$

여기서 $a_i (i=2,3)$ 는 접촉점과 i 번째 컴플라이언스 기

준점간의 거리이고, 양수로 정의된 h_i 는 다음과 같다.

$$h_i = \frac{\sin(a_i) + \cos(a_i)\tan(f_0)}{1 - m\tan(f_0)} + \frac{m\{\cos(a_i) - \sin(a_i)\tan(f_0)\}}{1 - m\tan(f_0)} \qquad (32)$$

특히, 컴플라이언스 기준점이 O_4 에 있는 경우에는 2장에서 설명한 바와 같이 K_{oxf} 를 0으로 설정하는 것이 가능하기 때문에 팩의 자세 변화 du_{of} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$du_{of} = \left(\frac{a_4 K_{oxx} h_4}{K_{off}}\right) du_{ox} \ , \qquad (33)$$

여기서 h_4 는 (32)에 의해 결정된다.

팩의 오른쪽 부분이 접촉하는 경우에는 du_{ox} 가 양수이므로 (30), (31) 및 (33)으로부터 팩의 끝점과 각 컴플라이언스 기준점간의 거리가 c 보다 같거나 크면, du_{of} 는 적절한 강성값의 선택에 의해 양수가 된다.

이와 같은 해석을 통하여 효율적인 팩인홀(PIH)과 팩아웃홀(POH) 작업을 위한 컴플라이언스 기준점의 위치를 고찰해 보면, 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 표 1에서 LCC는 컴플라이언스 기준점의 위치(Location of Compliance Center)를 나타내고, l_c 는 팩의 끝점과 컴플라이언스 기준점간의 거리를 나타낸다. 왼쪽(Left) 및 오른쪽(Right) 접촉에 대한 d , V, X 는 각 컴플라이언스 기준점의 위치에 대하여 효과적인 위치, 조건부 효과적인 위치 및 원하지 않는 위치를 각각 의미한다. 표 1로부터 주어진 팩인/아웃홀 작업의 효율성이 컴플라이언스 기준점의 위치에 따라 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 따라서 보다 더 효율적으로 주어진 팩인/아웃홀 작업을 수행하기 위해서는 컴플라이언스 기준점의 위치를 적절히 계획해 주어야 함을 알 수 있으며, 컴플라이언스 기준점이 O_2 에 있으면, 작업 공간에서의 적절한 강성 설정에 의해 비교적 안정된 작업의 수행이 가능함을 확인할 수 있다.

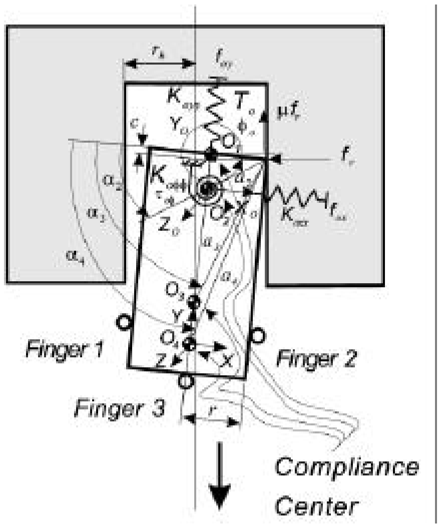

그림 7. 팩아웃홀 : 오른쪽 접촉.
Fig. 7. Peg-out-hole : right-side contact.

표 1. 효율적인 컴플라이언스 기준점의 위치.
Table 1. Effective location of compliance center.

Task	LCC	Left	Righ t	Range of LCC
PIH	O_1	d	X	$0 \le l_c < c$
	O_2	d	V	$c \le l_c < l_1$
	O_3	X	V	$l_1 < l_c \le l_1 + d$
	O_4	X	d	$l_1 + d < l_c \le l_p$
POH	O_1	V	X	$0 \le l_c < c$
	O_2	V	V	$c \le l_c < l_1$
	O_3	X	V	$l_1 < l_c \le l_1 + d$
	O_4	X	d	$l_1 + d < l_c \le l_p$

IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

본 장에서는 팩이 구멍에 접촉할 때 효율적인 팩의 삽입 및 분해를 위한 팩의 자세 변화를 확인하고자 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 5관절 구조의 세 손가락을 갖는 로봇 손[8][14]이 사용되었고, 팩의 작업 공간에 설정된 강성 행렬은 다음과 같다.

$$[K_o] = \begin{bmatrix} K_{oxx} & K_{oxy} & K_{oxf} \\ K_{oyx} & K_{oyy} & K_{oyf} \\ K_{ofx} & K_{ofy} & K_{off} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 1.37 \\ 0 & 1500 & 0 \\ 1.37 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

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_{oxf} 는 (4)에 의하여 결정되었다.

로봇 손가락의 파지점은 각각 다음과 같다. 첫번째 손가락의 파지점 $(-x_1, -y_1)$은 (－0.03, －0.06), 두번째 손가락의 파지점 $(x_2, -y_2)$은 (0.03, －0.06) 그리고 세번째 손가락의 파지점 $(x_3, -y_3)$은 (0.0, －0.1)이 설정되었다. 여기서 나타낸 파지점 좌표는 팩의 컴플라이언스 기준점의 좌표계에 대한 각 손가락의 파지점의 기구학적 거리를 나타낸다. 팩과 구멍의 재질은 단단한 나무로 가정하였고, 마찰계수는 m 는 0.3, 팩의 초기 자세는 350^o로 설정하였다.

첫번째 시뮬레이션은 그림 3의 작업을 대상으로 하여 팩이 받는 반응력으로 인한 팩의 자세 변화를 확인하고자 한다. 여기서 팩의 삽입 거리 l 은 0.03m로 고정하였다. 두번째 시뮬레이션은 그림 4의 경우에 대한 팩의 자세 변화를 확인하였으며, 세 번째 시뮬레이션은 그림 5과 같이 컴플라이언스 기준점이 이동된 경우를 다루었다. 여기서 팩의 끝점과 컴플라이언스 기준점간의 거리 b 는 0.05m로 설정하였다. 마지막으로 팩아웃홀 작업에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

팩인홀 작업에 대한 시뮬레이션 결과는 각각 그림

8, 그림 9 및 그림 10에 나타내었다. 그림 8은 팩의 왼쪽 부분이 구멍에 접촉하고 있는 동안에 팩의 자세가 시계 반대 방향으로 적절히 변화되고 있음을 보여준 다.

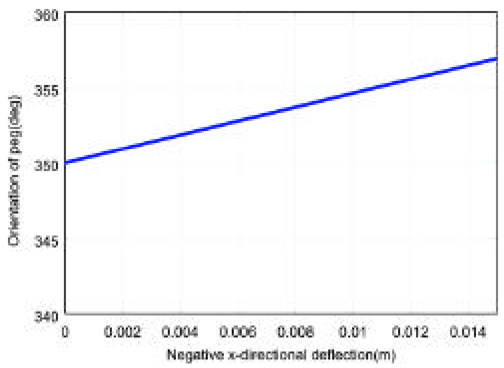

그림 8. 팩인홀 작업의 왼쪽 접촉에 대한 팩의 자세.
Fig. 8. Orientation of the peg for left-side contact in the peg-in-hole task.

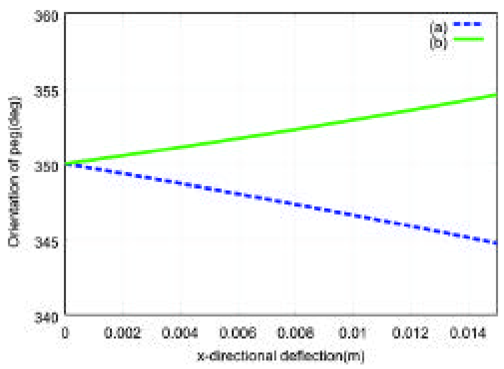

그림 9. 팩인홀 작업의 오른쪽 접촉에 대한 팩의 자세. (a) 컴플라이언스 기준점이 팩의 끝점에 있는경우, (b) 컴플라이언스 기준점이 이동된 경우.
Fig. 9. Orientation of the peg for right-side contact in the peg-in-hole task. (a) is the case that the compliance center lies in the peg tip, (b) is modified case.

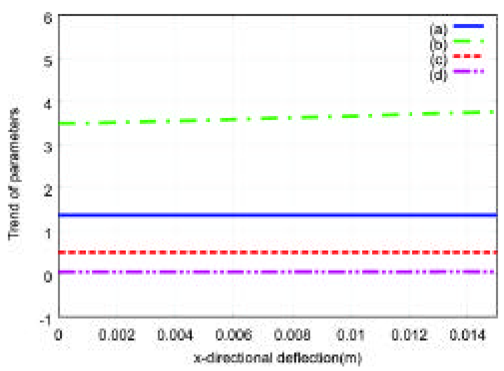

그림 10. 변수값 추이. (a) K_{oxf}, (b) $aK_{oxx}l$, (c) K_{off}, (d) $aK_{oxf}l$.
Fig. 10. Trend of parameters. (a) K_{oxf}, (b) $aK_{oxx}l$, (c) K_{off}, (d) $aK_{oxf}l$.

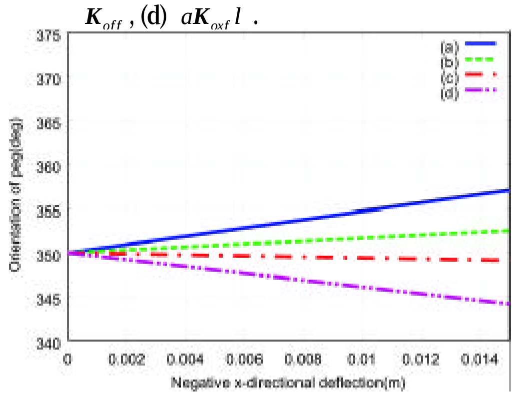

그림 11. 팩아웃홀 작업의 왼쪽 접촉에 대한 팩의 자세. (a) O_1, (b) O_2, (c) O_3, (d) O_4.
Fig. 11. Orientation of the peg for left-side contact in the peg-out-hole task. (a) O_1, (b) O_2, (c) O_3, (d) O_4.

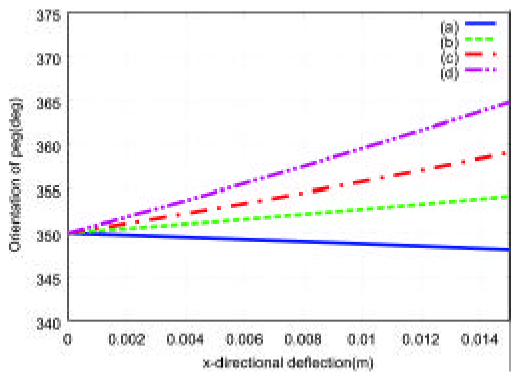

그림 12. 팩아웃홀 작업의 오른쪽 접촉에 대한 팩의 자세. (a) O_1, (b) O_2, (c) O_3, (d) O_4.
Fig. 12. Orientation of the peg for right-side contact in the peg-out-hole task. (a) O_1, (b) O_2, (c) O_3, (d) O_4.

그림 9(a)의 경우에서는 팩의 자세가 감소하고 있는 반면, 그림 9(b)의 경우에서는 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 그림 9(b)의 경우는 팩의 삽입이 효율적으로 이루어질 수 있지만, 그림 9(a)의 경우에는 팩의 삽입이 방해를 받게 됨을 알 수 있다. 또한, 그림 10으로부터 세 번째 시뮬레이션이 수행되는 동안 (25)에 기술된 조건이 모두 만족되고 있음을 확인할 수 있다.

팩아웃홀 작업에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 11과 그림 12에 나타내었다. 여기서 파라미터(단위: m) l_1, l_2, l_3, l_4, l_p 및 d는 각각 0.04, 0.01, 0.01, 0.035, 0.1 및 0.02로 설정하였다. 그림 11로부터 컴플라이언스 기

준점이 O_1 또는 O_2에 있을 경우에는 X방향에 대한 변위에 대하여 팩의 자세가 증가하는 반면, O_3 또는 O_4에 있을 경우에는 감소하고 있음을 볼 수 있다. 그림 12에서는 O_1을 제외한 모든 경우에서 팩의 자세가 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

결과적으로 효율적인 팩인홀 작업을 위해 팩의 컴플라이언스 기준점의 위치가 중요하고, 작업 공간에서의 상호 간섭 강성 K_{oxf} 이 적절히 이용될 수 있음을 알 수 있다.

V. 결론

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

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.
65-77, March 1982.

[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.

[10] H. Asada and 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] P. Dario and M. Rucci, "An approach to disassembly problems in robotics," *proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 460-467, 1993.

[14] B. -J. Yi, I. H. Suh, and S. -R. Oh, "Analysis of a five-bar finger mechanism having redun-dant actuators with applications to stiffness and frequency modulation," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 759-765, 1997.

김 병 호

1966년 2월 18일생. 1989년 금오공대 전자공학과(공학사). 1994년 동 대학원(공학석사), 1995년 현재 한양대 전자컴퓨터공학부(박사과정) / 한국과학기술연구원 지능제어연구센터 학생연구원. 관심분야는 biomimetic compliance control, multi-fingered robot/artificial hands and multiple arm control, macro/micro mechanism and intelligent control.

서 일 홍

제어·자동화·시스템공학 논문지 제6권, 제4호, 참조.

이 병 주

1960년 6월 7일생. 1984년 한양대 기계공학과(공학사). 1986년 텍사스주립대(오스틴) 기계공학과(공학석사). 1991년 동 대학원(공학박사). 1992년 1995년 한국기술교육대 제어기계공학과 조교수. 1995년 현재 한양대 전자컴퓨터공학부 부교수. 관심분야는 biomechanical system modeling and analysis, parallel/multiple arm and multi-fingered hands design and control, haptic interface, 여유자유도/여유구동 로봇 시스템, animation of dynamic systems.

오 상 록

제어·자동화·시스템공학 논문지 제6권, 제4호, 참조.