

로봇 손을 이용한 2차원 조립 작업의 컴플라이언스 특성 설정 기준

A Guideline for Specifying Compliance Characteristics of Two Dimensional Assembly Tasks using Robot Hands

김병호^{○*}, 오상록^{*}, 이병주[○], 서일홍[○]

Byoung-Ho Kim^{○*}, Sang-Rok Oh^{*}, Byung-Ju Yi[○], and Il Hong Suh[○]

[○] : 한양대학교 전자컴퓨터공학부, ^{*} : 한국과학기술연구원 지능제어연구센터

[○] : School of Electrical Eng. and Computer Science, Hanyang University

^{*} : Intelligent System Control Research Center, KIST

(E-mail: kbh@incorl.hanyang.ac.kr)

Abstract: This paper provides a guideline for specifying the operational compliance characteristics considering the location of compliance center and the grasp points in assembly tasks using robot hands. To be specific, some of coupling stiffness elements cannot be planned arbitrary. Through T-type assembly task, we analyze the conditions of the achievable operational stiffness matrix with respect to the location of compliance center and the grasp points. It is concluded that the location of compliance center on the grasped object and the grasp points play important roles for successful assembly tasks and also the operational stiffness matrix should be carefully specified by considering those conditions.

Keywords: robot hand, compliance characteristics, location of compliance center, grasp points

1. 서론

로봇 손을 이용하여 물체를 잡고 조작하는 경우에는 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[1]-[3]. 로봇 손을 이용하여 물체를 조작하는 경우에 특히, 준 정적인 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 서보(servomotor) 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.

일반적으로 로봇 손을 이용한 물체의 조립 작업에서 작업 공간의 적절한 컴플라이언스 특성 설정은 팩인홀(peg-in-hole) 작업, 팩아웃홀(peg-out-hole) 작업 및 다양한 조립 작업에 있어

서 매우 중요하다[9]-[12]. 또한 작업의 특성에 따른 컴플라이언스 기준점 및 파지점의 위치에 따라 컴플라이언스 특성 설정이 다르다. 최근에 작업의 특성을 고려한 컴플라이언스 특성 설정에 관한 연구[13][16]-[18]가 진행되었으나, 컴플라이언스 기준점 및 파지점의 위치에 따라 컴플라이언스 특성 설정이 달라지는 현상에 대해서는 고려하지 않았다.

본 논문에서는 독립적인 손가락의 제어를 기반으로 한 컴플라이언스 제어 방법을 조립 작업에 적용할 때 작업 특성에 따른 컴플라이언스 기준점이나 파지점의 위치에 따라 컴플라이언스 특성 설정이 다르게 됨을 보이고, 적절한 컴플라이언스 특성 설정 방법을 제시하고자 한다.

2. 로봇 손의 강성 관계

로봇 손을 이용한 물체의 파지 및 조작에 있어서 강성(또는 컴플라이언스) 특성은 유용하게 이용될 수 있다. 본 장에서는 그림 1과 같이 로봇 손을 이용한 일반적인 물체의 조작에 대하여 작업 공간과 손가락 끝 공간간의 강성 관계와 각 손가락 끝 공간과 관절 공간간의 강성 관계를 기술하고자 한다.

그림 1은 2차원 공간에서 3개의 손가락($n_f=3$)을 갖는 로봇 손이 딱딱한 물체(rigid body)를 조작하는 경우를 나타낸다. 여기서 각 손가락은 i 개의 관절을 갖는다. 물체의 작업 공간(operational space)에서의 힘/토크 벡터와 손가락 끝 공간에서 힘/토크 벡터 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_o = [G_o^i]^T T_f, \quad (1)$$

여기서 T_o 는 작업 공간에서 물체의 관성력과 외부의 힘을 포함한 $n \times 1$ 힘/토크 벡터(n : 작업 공간의 자유도)이고, T_f

는 손가락의 끝 공간에서의 $m \times 1$ ($m = \sum_{i=1}^{n_f} i$, i 번째 손가락 끝 공간의 자유도) 힘/토크 벡터를 나타낸다. 그리고

$[G_o^f]$ 는 작업 공간과 손가락 끝 공간 사이의 $m \times n$ 자코비안 행렬(Jacobian matrix)이며, $[G_o^f]^T$ 는 $[G_o^f]$ 의 전치 행렬(transpose matrix)을 나타낸다.

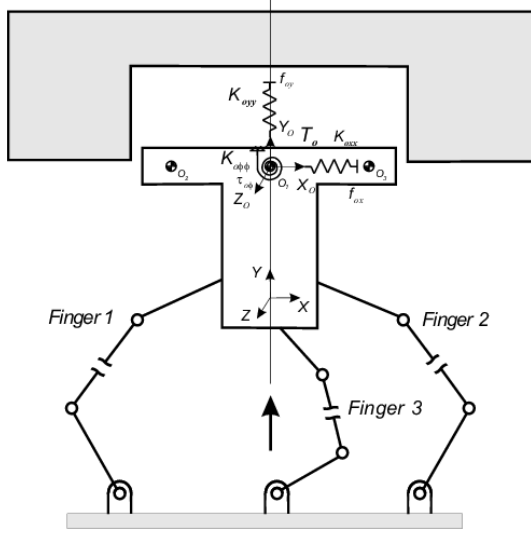


그림 1. 로봇 손을 이용한 T형 물체의 조립 작업.
Fig. 1. Assembly task of T-type object by robot hands.

그림 2는 그림 1에서 작업 공간과 손가락 끝 공간 및 각 손가락의 관절 공간간의 강성 관계를 나타낸다. 작업 공간의 주어진 강성 특성은 로봇 손을 이용한 작업의 특성에 따라 적절히 설정하여야 하며, 설정된 강성 특성을 성공적으로 구현하기 위해서는 손가락 및 관절 공간으로의 적절한 강성 분배가 이루어져야 함을 알 수 있다. 그림 2에서 작업 공간과 손가락 끝 공간간의 강성 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다[8].

$$[K_o] = [G_o^f]^T [K_f] [G_o^f] \quad (2)$$

여기서 $[K_o]$ 는 작업 공간에서의 $n \times n$ 강성 행렬이고, $[K_f]$ 는 손가락 끝 공간에서의 $m \times m$ 강성 행렬을 나타낸다.

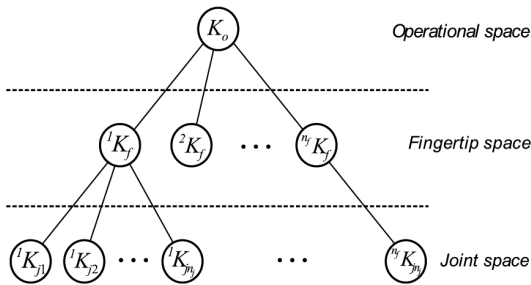


그림 2. 로봇 손의 강성 관계.
Fig. 2. Stiffness relation of robot hands.

또한, 각 손가락 끝 공간과 각 손가락의 관절 공간간의 강성 관계는 사용된 손가락의 구조에 따라 유일하게 정해지는 자코비안 행렬을 사용하여야 하는데, 역방향 자코비안 행렬을 이용하는 경우에는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[{}^i K_f] = [{}^i G_f^q]^T [{}^i K_q] [{}^i G_f^q] \quad (3)$$

여기서 $[{}^i K_f]$ 는 i 번째 손가락 끝 공간의 $n_{fp} \times n_{fp}$ 강성 행렬이고, $[{}^i K_q]$ 는 i 번째 손가락의 i 번째 관절의 $n_j \times n_j$ 관절 강성 행렬이며, $[{}^i G_f^q]$ 는 i 번째 손가락의 끝 공간과 관절 공간

간의 $n_j \times n_{fp}$ 자코비안 행렬을 나타낸다.

3. 손가락의 기구적 독립을 고려한 컴플라이언스 제어 방법

그림 1과 같이 2차원 공간에서 로봇 손을 이용한 조립 작업에서는 x 축, y 축 및 z 축을 중심으로 한 회전축(ϕ 축) 방향의 컴플라이언스 제어가 필요하며, 작업 공간에서 주어지는 3×3 강성 행렬 $[K_o]$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[K_o] = \begin{bmatrix} K_{ox} & K_{oxy} & K_{ox\phi} \\ K_{oyx} & K_{oyy} & K_{oy\phi} \\ K_{o\phi x} & K_{o\phi y} & K_{o\phi\phi} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Betti[15]의 정리를 이용하면, 선형특성을 갖는 물체의 강성 행렬은 항상 대칭(symmetric)이므로, (4)에서 독립 요소는 6개이다. 따라서 (4)로 주어지는 작업 공간의 강성(또는 컴플라이언스) 특성을 생성하기 위하여 두 손가락을 이용할 경우, 손가락 끝 공간의 강성 행렬은 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$[K_f] = \begin{bmatrix} {}^1 K_{fxx} & {}^1 K_{fxy} & {}^{12} K_{fxx} & {}^{12} K_{fxy} \\ {}^1 K_{fyx} & {}^1 K_{fyy} & {}^{12} K_{fyx} & {}^{12} K_{fyy} \\ {}^{21} K_{fxx} & {}^{21} K_{fxy} & {}^2 K_{fxx} & {}^2 K_{fxy} \\ {}^{21} K_{fyx} & {}^{21} K_{fyy} & {}^2 K_{fyx} & {}^2 K_{fyy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

그런데 (5)와 같은 손가락 끝 공간의 강성 특성을 사용하려면, 최소한 로봇 손가락은 모두 10개의 능동 관절을 지녀야 한다. 더욱이 3차원에서 6×6 강성 행렬 $[K_o]$ 를 생성하기 위해서는 21개의 능동 관절이 필요하게 된다. 따라서 각 손가락은 매우 많은 관절을 가지게 되므로 로봇 손가락의 설계적 측면에서 어려움이 따르고, 손가락의 제어를 위한 서어보 시스템의 구성이 매우 복잡해지며, 정밀한 제어 성능을 얻기가 쉽지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위한 시도로서 로봇 손가락의 기구적 독립을 고려하여 비간섭이 보장된 컴플라이언스 제어 방법[8]이 제안되었는데, 각 로봇 손가락의 강성 특성을 2개의 독립 강성으로 나타내면, (4)로 주어진 6개의 독립 요소를 제어하기 위해서 로봇 손은 최소한 세 개의 손가락을 지녀야 함을 확인할 수 있다. 즉, 세 손가락을 지니는 로봇 손의 경우, 손가락 끝 공간의 독립 강성 행렬을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[K_f] = \begin{bmatrix} {}^1 K_{fxx} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & {}^1 K_{fyy} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & {}^2 K_{fxx} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & {}^2 K_{fyy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & {}^3 K_{fxx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & {}^3 K_{fyy} \end{bmatrix} \quad (6)$$

그림 1에서 컴플라이언스 기준점이 O_1 에 설정된 경우, 작업 공간과 손가락 끝 공간 사이의 자코비안 행렬 $[G_o^f]$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[G_o^f] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & y_1 \\ 0 & 1 & -x_1 \\ 1 & 0 & y_2 \\ 0 & 1 & x_2 \\ 1 & 0 & y_3 \\ 0 & 1 & x_3 \end{bmatrix}$$

결과적으로 (4)로 주어지는 작업 공간의 강성 특성을 생성하기 위해서는 (6)과 같은 손가락 끝 공간의 강성을 구해야 한다. (2)를 벡터 형태로 재정의하면, 다음과 같이 나타낼 수 있고, 선형 프로그래밍 기법을 사용하여 각 손가락 끝 공간의 독립 강성을 구할 수 있다[8].

$$K_{oo} = [B_f^o] K_{ff} \quad (7)$$

여기서

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

$$K_{ff} = [{}^1K_{fxx} \ {}^1K_{fyy} \ {}^2K_{fxx} \ {}^2K_{fyy} \ {}^3K_{fxx} \ {}^3K_{fyy}]^T,$$

이고, ${}^iK_{fxx}$, ${}^iK_{fyy}$ 는 각각 i 번째 손가락의 x 와 y 축에 대한 강성값을 나타낸다. $[B_f^o]$ 는 작업 공간과 손가락 끝 공간간의 독립 강성 관계 행렬을 나타내는데, 작업 물체에 설정된 컴플라이언스 기준점의 위치와 물체의 기하학적 조건에 따라 다르게 표현된다. 예를 들어, 그림 1 에서 컴플라이언스 기준점이 O_1 에 설정된 경우, $[B_f^o]$ 는 다음과 같다.

$$[B_f^o] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & 0 & y_2 & 0 & y_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -x_1 & 0 & x_2 & 0 & x_3 \\ y_1^2 & x_1^2 & y_2^2 & x_2^2 & y_3^2 & x_3^2 \end{bmatrix},$$

x_i 와 y_i 는 각각 i 번째 손가락의 파지점과 팩의 컴플라이언스 기준점간의 거리를 나타내는 변수들을 나타내고, 모두 양수이다.

(7)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 ${}^iK_{fyy}$ ($i=1,2,3$)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 강성 $K_{ox\phi}$ 와 관련이 있다. 여기서 K_{ff} 의 모든 요소는 양수이어야 하고, y_1, y_2, y_3 는 모두 양수이기 때문에 $K_{ox\phi}$ 는 항상 존재하게 된다. 이러한 경우 $K_{ox\phi}$ 는 다음과 같은 과정에 의해 정해질 수 있다. (7)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, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있고,

$$K_{oo}^* = [D_f^o] K_{ff} \quad (8)$$

선형 프로그래밍 기법을 사용하여 K_{ff} 를 구하면, $K_{ox\phi}$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$K_{ox\phi} = [B_f^o]_3 K_{ff} \quad (9)$$

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

또한 $K_{oy\phi}$ 는 $[B_f^o]$ 의 네 번째 행이 (+), (-) 값을 공존하므로 작업의 특성에 따라 (+), 0, (-)값으로 적절히 설정할 수 있다. 따라서 작업의 특성과 작업 물체의 기하학적 조건으로 인한 컴플라이언스 기준점 및 파지점의 위치에 따라 작업 공간의

강성 특성을 신중히 설정해야 함을 알 수 있다.

이와 같은 과정을 통하여 정해진 로봇 손가락 끝 공간의 강성 특성을 구현하기 위해서는 각 손가락의 구조가 매우 중요한데, 5 관절 로봇 손가락을 이용한 독립 관절 강성으로써 적절히 구현할 수 있다[8].

4. 컴플라이언스 특성 설정 기준

기존의 연구에 의하면, 작업 공간의 강성 행렬에서 대각선 성분은 작업의 특성에 따라 적절히 설정한다. 즉, 위치 제어를 하게 되는 축은 큰 강성으로 설정하고, 상대적으로 힘 제어 축이면 작은 강성으로 설정하며, 위치 및 힘 제어를 동시에 필요로 하는 경우에는 중간 값으로 설정한다. 또한 중요하지 않는 축 방향에 대해서는 임의의 값으로 설정하는 연구가 진행되었다[13][16]-[18]. 그러나 작업 공간의 상호 간섭 강성은 일반적으로 서로 다른 축간의 동특성이 미치는 영향으로서 제어의 어려움을 초래할 수 있고, 작업 물체의 컴플라이언스 기준점과 파지점의 위치에 따라 다르기 때문에 신중히 설정되어야 한다. 본 논문에서는 그림 1 에서 컴플라이언스 기준점의 위치에 따라 정해지는 작업 공간과 손가락 끝 공간간의 강성 관계 행렬을 조사함으로써 작업 공간의 강성 특성을 적절히 설정하는 방법을 해석하고자 한다.

그림 1 에서 컴플라이언스 기준점이 O_2 에 설정된 경우, (7)에서 $[B_f^o]$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[B_f^o] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & 0 & y_2 & 0 & y_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & x_1 & 0 & x_2 & 0 & x_3 \\ y_1^2 & x_1^2 & y_2^2 & x_2^2 & y_3^2 & x_3^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

즉, $[B_f^o]$ 의 5 행 2 열 (5,2) 의 부호가 $-x_1$ 에서 x_1 으로 바뀐다. 따라서 컴플라이언스 기준점이 O_1 에서 O_2 로 변경되면, $K_{ox\phi}$ 와 $K_{oy\phi}$ 가 항상 존재하게 된다. $K_{oy\phi}$ 의 물리적인 의미는 y 축 방향의 외부 힘(접촉력 또는 외란)에 의해 조립 물체의 자세 변화가 일어날 수 있음을 의미한다. 결국 $K_{oy\phi}$ 를 0 또는 임의의 값으로 설정하게 될 경우 근본적으로 존재하는 조립 물체의 자세 변화를 제어할 수 없게 되기 때문에 조립이 원활하게 이루어 질 수 없게 된다.

그림 1 에서 컴플라이언스 기준점이 O_3 에 설정된 경우에 $[B_f^o]$ 는 다음과 같이 변경된다.

$$[B_f^o] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & 0 & y_2 & 0 & y_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -x_1 & 0 & -x_2 & 0 & -x_3 \\ y_1^2 & x_1^2 & y_2^2 & x_2^2 & y_3^2 & x_3^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

즉, $[B_f^o]$ 의 (5,4) 항과 (5,6) 항의 부호가 x_2 에서 $-x_2, x_3$ 에서 $-x_3$ 로 바뀐다. 이러한 경우, $K_{oy\phi}$ 값은 음수로 설정된다.

(10)과 (11)의 과정에서 $K_{ox\phi}$ 와 $K_{oy\phi}$ 는 각각 다음과 같이

표 1. 조립 작업을 위한 강성 특성 설정.
Table 1. Specifying of operational stiffness characteristics.

컴플라이언스 기준점	K_{axx}	K_{axy}	$K_{\text{ax}\phi}$	K_{oyy}	$K_{\text{oy}\phi}$	$K_{\text{o}\phi\phi}$	비고
O_1	S	0	$+\alpha$	L	$0, \pm\beta$	S	그림 1
O_2	S	0	$+\alpha$	L	$+\beta$	S	
O_3	S	0	$+\alpha$	L	$-\beta$	S	

결정할 수 있다. 먼저 (7)을 다음과 같이 재정리 한다.

$$K_{\text{oo}}^* = [D_f^o] K_{\text{ff}} \quad (12)$$

여기서 $[D_f^o]$ 행렬과 K_{oo}^* 벡터는 각각 다음과 같다.

$$[D_f^o] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ y_1^2 & x_1^2 & y_2^2 & x_2^2 & y_3^2 & x_3^2 \end{bmatrix},$$

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

그리고 (12)에서 선형 프로그래밍 기법을 사용하여 K_{ff} 를 구하면, $K_{\text{ax}\phi}$ 와 $K_{\text{oy}\phi}$ 는 각각 다음과 같이 결정된다.

$$K_{\text{ax}\phi} = [B_f^o]_3 K_{\text{ff}} \quad (13)$$

$$K_{\text{oy}\phi} = [B_f^o]_5 K_{\text{ff}} \quad (14)$$

여기서 $[B_f^o]_i$ 는 $[B_f^o]$ 의 i 번째 행을 나타낸다.

결론적으로 이러한 해석을 통하여 그림 1 과 같은 조립 작업을 수행하기 위한 작업 공간의 강성 특성 설정 기준은 컴플라이언스 기준점의 위치에 따라 표 1 과 같이 정리할 수 있다. 표 1 에서 S 와 L 은 각각 작은 값(Small)과 큰 값(Large)을 의미하고, α, β 는 양수이며, $K_{\text{axx}}, K_{\text{oyy}}, K_{\text{o}\phi\phi}$ 에 의해 결정된다.

5. 결론

본 논문에서는 로봇 손을 이용한 조립 작업에서 물체의 작업 공간에서의 컴플라이언스 특성을 설정할 때 컴플라이언스 기준점의 위치나 파지점의 위치에 따라 컴플라이언스 특성 설정이 다르게 됨을 보이고, 적절한 컴플라이언스 특성 설정 방법을 제시하였다. 결과적으로 로봇 손을 이용한 조립 작업에서 컴플라이언스 기준점의 위치나 파지점의 위치가 성공적인 조립 작업을 위해 매우 중요하며, 이러한 조건을 고려한 컴플라이언스 특성 설정이 요구됨을 확인하였다. 이러한 연구 결과는 로봇 손을 이용한 다양한 모양을 갖는 물체의 조립 작업에 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.

[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 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] 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.

[13] M. H. Ang, Jr. and G. B. Andeen, "Specifying and achieving passive compliance based on manipulator structure," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 11, No. 4, pp. 504-515, 1995.

[14] 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.

[15] H. Leipholz, *Theory of elasticity*, Leyden: Noordhoff, 1974.

[16] J. D. Schutter and H. V. Brussel, "Compliant robot motion I. A formalism for specifying compliant motion tasks," *Int. Jour. of Robotics Research*, vol. 7, no. 4, pp. 3-17, 1988.

[17] J. D. Schutter and H. V. Brussel, "Compliant robot motion II. A control approach based on external control loops," *Int. Jour. of Robotics Research*, vol. 7, no. 4, pp. 18-33, 1988.

[18] K. B. Shimoga and A. A. Goldenberg, "Grasp admittance center: choosing admittance center parameters," *Proc. of American Control Conference*, pp. 2527-2532, 1991.