

가상 강성 모델에 기초한 파지 강성 해석 및 파지 제어

최혁렬*, 정완균**, 염영일***

Characterization and Control of Grasp Stiffness Based on Virtual Stiffness Model

Hyouk-Ryeol Choi*, Wan-Kyun Chung**, Youngil Youm***

ABSTRACT

Based on the virtual stiffness model, the stiffness of a grasped object is characterized. Differing from the previous investigations, the effect of grasp force on the stiffness of a grasp is formulated in terms of additional stiffness, which is called *additional stiffness* in this paper, and it is addressed how this term affects the stability of a grasp. In addition, a method of controlling the stiffness of a grasp is proposed and validated by experiments using a two-fingered robot hand.

Key Words: Virtual Stiffness Model(가상강성모델), Grasp Stiffness Control(파지강성제어), Grasping Force(파지력), Additional Stiffness(부가강성), Fingertip Stiffness Synthesis(손끝강성합성법), Orthogonal Stiffness Decomposition Control(수직강성분해제어)

1. 서론

강성은 변위에 대한 복원력의 크기로 정의된다. 파지계의 강성 혹은 파지강성은 파지되고 있는 물체상의 정해진 위치에서 변위에 대한 복원력의 비로서 생각될 수 있으며 파지강성은 외란에 대한 파지된 물체의 거동을 알 수 있도록 하여 줄 뻗더러 환경과 접촉을 필요로 하는 작업을 수행할 때 파지된 물체의 강성을 적절하게 조절함으로써 힘제어를 실현할 수 있다. 전부터 파지강성에 관하여 많은 연구들이 수행되어 왔다.^(1,2,3,4,5) cutkosky와 Kao⁽¹⁾는 파지된 물체의 유효강성을 관절에서의 비례서보게인, 구조적 강성과 파지형태의 변화에 기인하는 부가

적인 강성의 함수로서 표현하였고, 주어진 파지강성을 달성하기 위하여 요구되는 관절서보게인을 구하는 방법을 제안하였다. Nguyen⁽³⁾은 손가락에서 주는 강성효과를 가상스프링으로 모델링하고 이로부터 파지력을 고려하여 전체적인 파지강성을 구하였으며 파지력과 파지된 물체의 안정성에 관하여 논의하였다. 아울러 요구되는 파지강성을 달성하기 위하여 가상스프링의 강성을 구할 수 있는 방법도 제안하였다. Kaneko⁽²⁾등은 Nguyen의 모델에 기초한 파지제어방법을 개발하였고 두 개의 손가락을 가진 다관절 로봇손을 이용하여 이를 실험적으로 검증하였다. Adli⁽⁶⁾등과 Yi와 Freeman⁽⁷⁾은 힘평형을 이루고 있는 페루우프 기구에 있어서 내부력이 생성하는 강성효과

* 성균관대학교 기계공학부
 ** 포항공과대학교 기계공학과
 *** 포항공과대학교 기계공학과

를 계산해 냈으며, 이로부터에 작용하는 힘이 관절의 강성을 합성하기 위하여 내부력을 계산하는 알고리즘을 각각 제안하였다.

앞서 열거한 연구결과들을 참고로 하면 손끝으로부터 물체에 가하여 주는 파지력은 파지의 강성및 안정성에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 이에 착안하여 파지력의 영향을 고려한 파지강성 해석을 통하여 파지강성모델을 도출하고 파지력의 크기에 관계없이 안정되게 파지된 물체의 강성을 제어할 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 해석에 있어서는 가상강성모델(virtual stiffness model)에 바탕을 두고 전체적인 파지계를 개별적인 손가락들과 파지된 물체로 구성된 두 개의 부분으로 분할하여 이들 각각에 해당하는 강성관계식을 구하게 될 것이다. 이로부터 복잡한 파지계가 개별적인 손가락으로 이루어진 직렬연쇄들과 이 손가락들을 치환할 수 있는 가상강성들로 이루어진 병렬연쇄로 나누어지며 제어기도 각 손가락의 관절강성을 제어함으로써 전체적인 파지강성을 제어할 수 있는 분산제어방식을 취할 수 있는 장점이 있다. 일반적으로 손끝의 접촉에 의하여 구속되는 자유도보다 손가락 관절의 자유도가 많을 경우 손가락은 여유자유도를 갖고 있다고 하며 이는 파지된 물체와 손끝의 상대적인 크기, 손끝의 형상, 재질등에 따라서 변한다고 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 경우를 포함하는 일반적인 강성모델과 제어법을 제안하려고 하며, 제안된 방법을 평면상에서 움직이는 두 개의 비대칭형 손가락을 가진 로봇손에 적용하여 이의 유효성을 실험적으로 검증하려고 한다.

2. 파지강성해석

기본적인 가정으로 손끝이나 동력전달계통에서 생기는 구조적인 강성은 무시할 수 있고, 손끝의 접촉점은 미리 정해져 있고 조작중에 변하지 않으며, 매우 낮은 속도로 물체를 조작하므로 관성효과는 무시할 수 있고, 파지는 force closure가 되도록 적절하게 계획되어 있다고 하자. 수직선개를 위하여 그림.1에 보여진 것과 같이 물체 좌표계 Σ_o 를 물체상의 임의의 한 점에 고정시키며 절대좌표계 Σ_A 를 정의하고 손끝 좌표계 Σ_{ci} 들은 각 손끝과 물체와의 접촉점 c_i 에 위치시킨다.

그림.1에 나타내어진 바와 같이 파지계에서 손끝이 물체에 주는 효과를 일반적인 스프링으로 모델하면 손끝에서 주는 힘은 스프링이 파지력에 해당하는 만큼 압축

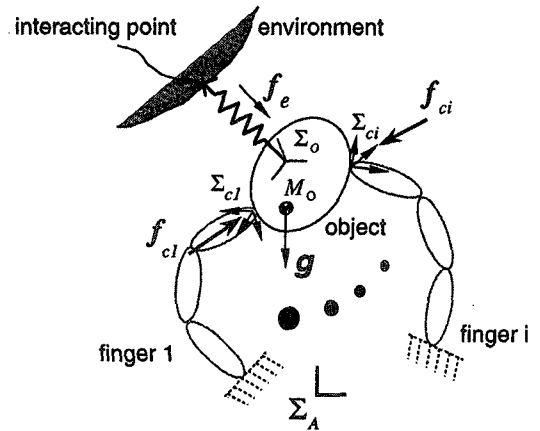


Fig. 1 가상강성모델의 개념도

(preloaded)됨으로서 생기는 반발력으로 생각될 수 있으므로 파지계는 물체를 지지하고 있는 스프링들과 각 스프링에 의하여 치환된 손가락으로 이루어진 두 개의 독립적인 평형계로 나눌 수 있다. 따라서, M 개의 손가락으로 조작되는 물체에 대하여 정적인 힘의 평형은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_e = {}^oJ_g^T f_g + \sum_{i=1}^M {}^oJ_{ci}^T f_{ci} \quad (1)$$

여기에서 f_e 는 물체에 작용하는 힘의 총합이며, $(\cdot)^T$ 는 (\cdot) 의 전치행렬, f_g 는 물체에 작용하는 중력, oJ_g 는 물체의 무게중심과 Σ_o 사이의 좌표변환 자코비안(coordinate transformation Jacobian), ${}^oJ_{ci}$ 는 Σ_o 와 Σ_{ci} 사이의 좌표변환 자코비안, N 은 접촉점에서 구속되는 자유도의 수, f_{ci} 는 파지력을 나타내고, 초기에 환경과 접촉을 하고 있지 않을 경우 손가락으로 부터 주는 파지력이 f_{ci} 라고 하면 이 때 $f_{ci} = 0$ 이 된다.

다음으로 물체가 외부에서 주어진 힘이나 환경과의 접촉에 의하여 dx_o 만큼 변형되었다고 할 때 반작용력을 구해보자.

접촉점 i 에서의 변위 dx_{ci} 는 좌표변환 자코비안에 의하여 $dx_{ci} = {}^oJ_{ci} dx_o$ 가 되고 이는 각 손가락 관절의 변위를 일으키며 또한, 관절강성에 관절변위를 곱한 만큼의 토오그를 생성해 내게 된다. 여기에서 n_i 번째 손가락은 ($n_i \geq N$) 자유도이고 관절변수는 q_i 이며 관절에서 비례서보계인에 의한 관절강성은 $K_{qi} \in \mathfrak{R}^{n_i \times n_i}$ 이라고 할 때 손가락에서의 일반적인 강성계산식을 유도하여 보자. 손끝의 변위 dx_{ci} 에 대하여 얻을 수 있는 관절의 변위 dq_i 는

$dx_{ci} = J_{qi} dq_i$ 인 조건을 만족하고 최소 위치에너지를 갖는 형상을 취하게 될 것이므로 다음과 같이 가치함수 H_i 를 정의하고 H_i 가 최소가 되는 dq_i 를 구할 수 있다.

$$H_i = \frac{1}{2} dq_i^T K_{qi} dq_i + dq_i^T J_{qi}^T f_{coi} + L_i^T (J_{qi} dq_i - dx_{ci}). \quad (2)$$

$L_i \in \mathfrak{R}^N$ 는 Lagrange multiplier들로 이루어진 벡터를 나타내며 식 (2)를 dq_i 와 L_i 에 관하여 미분하고 이들이 각각 영이 되는 dq_i 를 구하면

$$dq_i = K_{qei}^{-1} H_{qi}^T (J_{qi} K_{qei}^{-1} J_{qi}^T)^{-1} dx_{ci}, \quad (3)$$

이 된다. 이 식에서 K_{qei} 는 i 번째 손가락의 관절에서 실체로 나타나는 유효관절강성(effective joint stiffness)으로 볼 수 있으며 q_{oi} 는 i 번째 손가락의 초기 위치를 나타낸다고 할 때 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$K_{qei} = K_{qi} + \Delta K_{qi}(q_{oi}, f_{coi}). \quad (4)$$

여기에서 ΔK_{qi} 는 관절에서의 부가강성(additional stiffness at the joint)이라고 부르며 다음과 같이 구하여 진다.

$$\Delta K_{qi}(q_{oi}, f_{coi}) = \frac{\partial J_{qi}^T(q_{oi})}{\partial q_i} f_{coi}. \quad (5)$$

이 때 생성된 관절토포그는 다음과 같으며

$$d\tau_i = -K_{qi} K_{qei}^{-1} J_{qi}^T (J_{qi} K_{qei}^{-1} J_{qi}^T)^{-1} dx_{ci}, \quad (6)$$

이로부터 $d\tau_i$ 에 의하여 손가락 끝에 발생하는 결과적인 힘을 계산하여 보자. 관절토포그와 손끝에 걸리는 힘과의 관계식은 $\tau_i = J_{qi}^T f_{ci}$ 이 되고 이 식을 미분하면

$$d\tau_i = dJ_{qi}^T f_{ci} + J_{qi}^T df_{ci}, \quad (7)$$

를 얻을 수 있고

$$d\tau_i = dJ_{qi}^T (f_{coi} + df_{ci}) + J_{qi}^T df_{ci}, \quad (8)$$

이 된다. $dJ_{qi}^T df_{ci} \simeq O$ 로 근사화할 수 있으므로

$$d\tau_i = dJ_{qi}^T f_{coi} + J_{qi}^T df_{ci}, \quad (9)$$

이 된다. 식(5)와 $dq_i = -K_{qi} d\tau_i$ 를 이용하여 정리하면

$$J_{qi}^T df_{ci} = K_{qei} K_{qi}^{-1} d\tau_i, \quad (10)$$

이 되고 식(6)에 식 (10)에 대입하였을 때

$$J_{qi}^T df_{ci} = -J_{qi}^T (J_{qi} K_{qei}^{-1} J_{qi}^T)^{-1} dx_{ci}, \quad (11)$$

를 얻을 수 있다. J_{qi}^T 가 full rank라고 할 때 손가락끝에 걸리는 힘은 다음과 같이 되며

$$df_{ci} = -(J_{qi} K_{qei}^{-1} J_{qi}^T)^{-1} dx_{ci}, \quad (12)$$

이로부터 손끝강성 $K_{ci} \in \mathfrak{R}^{N \times N}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$K_{ci} = (J_{qi} K_{qei}^{-1} J_{qi}^T)^{-1}, \quad (13)$$

$$= [J_{qi} \{K_{qi} + \Delta K_{qi}(q_{oi}, f_{coi})\}^{-1} J_{qi}^T]^{-1}. \quad (14)$$

다시 물체로 돌아가서 손끝에 의하여 작용하는 결과적인 힘을 계산하여 보자.

각 손가락에 의한 반작용력은 역으로 물체에 다음과 같이 전달되어 진다.

$$f_{on} = -\sum_{i=1}^M ({}^o J_{ci}^T K_{ci} {}^o J_{ci}) dx_o. \quad (15)$$

여기에서 f_{on} 은 손끝강성에 의하여 생성되는 순등가힘(net equivalent force)을 나타내며 ${}^o J_{ci}$ 는 바뀐 형상에서 좌표변환 자코비안으로서 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

$${}^o J_{ci}^T \simeq {}^o J_{ci}^T + \frac{\partial {}^o J_{ci}^T}{\partial x_o} dx_o. \quad (16)$$

이로부터 식(15)는

$$f_{on} = -\sum_{i=1}^M ({}^o J_{ci}^T K_{ci} {}^o J_{ci}) dx_o - \sum_{i=1}^M \frac{\partial {}^o J_{ci}^T}{\partial x_o} dx_o K_{ci} {}^o J_{ci} dx_o. \quad (17)$$

이 되며 2차항을 무시하면

$$f_{on} = - \sum_{i=1}^M {}^o J_{ci}^T K_{ci} {}^o J_{ci} dx_o, \quad (18)$$

$$= -K_c dx_o, \quad (19)$$

을 얻을 수 있으며 다음과 같은 강성 K_c 를 얻을 수 있다.

$$K_c = \sum_{i=1}^M {}^o J_{ci}^T \{J_{qi} [K_{qi} + \Delta K_{qi}(q_{oi}, f_{coi})]^{-1} J_{qi}^T\}^{-1} J_{ci}. \quad (20)$$

반면에 초기의 파지력과 중력 또한 물체에 작용하는 힘의 변화를 일으킬 수 있다. 변화된 형상에서 물체에 작용하는 결과적인 힘은

$$\begin{aligned} f_{os} &= \sum_{i=1}^M {}^o J_{ci}^T f_{coi} + {}^o J_g^T f_g, \\ &= \sum_{i=1}^M ({}^o J_{ci}^T + \frac{\partial {}^o J_{ci}^T}{\partial x_o} dx_o) f_{coi} + ({}^o J_g^T + \frac{\partial {}^o J_g^T}{\partial x_o} dx_o) f_g, \end{aligned} \quad (21)$$

이 된다. 여기에서 f_{os} 는 초기의 파지력과 중력에 의하여 생성된 힘을 나타내고 곱셈의 순서를 바꾸어 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있으며

$$f_{os} = \sum_{i=1}^M \frac{\partial {}^o J_{ci}^T}{\partial x_o} dx_o f_{coi} + \frac{\partial {}^o J_{ci}^T}{\partial x_o} dx_o f_g, \quad (22)$$

$$= -\Delta K_c dx_o - \Delta K_{og} dx_o, \quad (23)$$

ΔK_{og} 와 ΔK_c 는 물체에서의 부가강성(additional stiffness at the object)이라고 하며 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^M (\partial {}^o J_{ci}^T / \partial x_o) dx_o f_{coi} = -\Delta K_c dx_o, \quad (24)$$

$$(\partial {}^o J_g^T / \partial x_o) dx_o f_g = -\Delta K_{og} dx_o, \quad (25)$$

앞서 유도한 결과들로부터 파지계가 변형을 할 때 전체적인 반작용력은 다음과 같이 되며

$$\begin{aligned} f_o &= f_{on} + f_{os}, \\ &= -(K_c + \Delta K_c + \Delta K_{og}) dx_o, \end{aligned} \quad (26)$$

변위와 힘과의 관계에 의하여 파지강성 K_G 는 아래와 같이 된다.

$$K_G = K_c + \Delta K_c + \Delta K_{og}. \quad (27)$$

식 (27)에서 주목해야 될 것은 종전의 연구결과들과는 다르게 ΔK_c , ΔK_{og} 뿐만이 아니라 K_{ci} 의 속에 $\Delta K_{qi}(q_{oi}, f_{coi})$ 와 같은 부가적인 강성이 포함되어 있다는 것이다. 이들은 순수하게 힘과 파지의 형상변화에 관계하는 항이며 서보강성과는 관계가 없는 항들이다. 본 연구에서는 이들을 "부가강성"이라고 명명하였고 특히, ΔK_c 와 ΔK_{og} 들은 물체에서의 부가강성으로, $\Delta K_{qi}(q_{oi}, f_{coi})$ 는 관절에서의 부가강성이라고 한다. 지금까지의 연구결과에 의하면 파지력은 단지 물체에서의 부가강성효과를 가져오고 이로 인하여 파지의 안정성이 깨어질 수 있다고 하였다⁽¹⁾. 그러나, 본 연구의 결과로부터 판단을 한다면 파지력은 관절강성에도 부가강성의 형태로 영향을 미치게 되며 파지력에 의한 불안정성은 물체에서의 부가강성뿐만이 아니라 관절에서의 부가강성에도 관련이 있다는 것을 알 수 있다.

3. 파지계의 안정성

앞절에서 유도한 식을 바탕으로 파지계의 안정성에 대한 부가강성의 영향에 관하여 알아 보자. 파지계의 안정성은 세가지, 물체안정성(object stability), 형상안정성(configuration stability)과 접촉안정성(contact stability)으로 나누어서 설명할 수 있다⁽⁴⁾. 물체안정성은 파지된 물체가 외란을 제거한 후에 초기의 위치로 돌아갈 수 있다는 것을 의미하며, 형상안정성은 각 손가락이 이와 같이 될 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 접촉안정성은 접촉이 깨어지거나 미끄러지는 것을 의미하며 이는 본 연구의 관심사항에서는 제외하기로 한다. 파지강성을 단순화 하기 위하여 손끝의 접촉이 마찰력을 가진 점접촉이라고 할 경우 3차원 공간상에서 ΔK_c 는 아래와 같이 회전강성에만 영향을 주게 되며⁽⁵⁾

$$\Delta K_c = \begin{bmatrix} O^{3 \times 3} & O^{3 \times 3} \\ O^{3 \times 3} & \Delta K_{ob}^{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad (28)$$

중력의 영향을 무시하면 파지강성을 나타내는 식 (27)은 아래와 같은 형태로 된다⁽⁶⁾.

$$K_G = \begin{bmatrix} K_{ot} & K_x \\ K_x^T & K_{ob} + \Delta K_{ob} \end{bmatrix} \quad (29)$$

K_{oi} , $K_{o\theta}$ 와 $K_x \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$ 는 각각, 손끝 강성에 의한 병진, 회전 그리고 이 두가지의 복합강성(coupling stiffness)을 표시하며 $\Delta K_{o\theta}$ 는 파지력에 의한 부가강성을 나타낸다. 물체좌표계가 강성중심(center of compliance)에 있다고 가정하면 회전운동과 병진운동은 독립적으로 일어나므로 복합강성 $K_x = O$ 된다. 따라서, K_G 의 p.d(positive definiteness)는 각 대각선상의 블록화된 행렬 K_{oi} 와 $K_{o\theta} + \Delta K_{o\theta}$ 의 p.d.에 의하여 판단할 수 있으며 K_{ci} 가 p.d.라면 K_{oi} 도 p.d.가 되고 물체 안정성은 $K_{o\theta} + \Delta K_{o\theta}$ 의 p.d.에 의하여 결정된다고 할 수 있다. 그러나, 바꾸어서 positive definite한 K_{ci} 들이 주어진다고 해도 부가강성에 의한 $K_{o\theta}$ 의 영향으로 파지가 불안정하여 질 수도 있다. 다음으로 형상안정성 즉, K_{ci} 가 p.d 하다는 것에 관하여 살펴보자. 식(4)를 참고로 하면 positive definite한 K_{qi} 들에 대해서도 관절형상은 항상 안정하지만은 않다는 것을 알 수 있다. 이는, 관절형상의 안정성이 관절 서보강성 K_{qi} 에 의해서가 아니라 유효 관절강성 K_{qei} 에 따라서 결정되기 때문이다. 또한, 식(4)으로부터 K_{ci} 는 K_{qei} 의 함수이므로 K_{qei} 가 positive definite해야 K_{ci} 가 positive definite함을 알 수 있다. 따라서, 파지에는 물체에서의 부가강성 및 관절에서의 부가강성, 두 가지 모두 중요한 영향을 미치며 안정된 파지를 위하여는 다음과 같은 조건이 동시에 만족되어야 한다.

$$(C2) \quad K_{qi} + \Delta K_{qi}(q_{oi}, f_{coi}) : \text{p. d.},$$

$$(C1) \quad K_c + \Delta K_c + \Delta K_{og} : \text{p. d.}$$

4. 파지강성제어법

제안된 파지강성 제어법은 각 손끝 강성을 안정되게 제어함으로써 물체의 원하는 강성을 달성할 수 있도록 하여 주며 두 개의 계층적인 제어알고리즘, 즉 손끝강성 합성법(fingertip stiffness synthesis)과 수직 강성분해제어(orthogonal stiffness decomposition control)를 통하여 구현된다.

4.1 손끝강성 합성법

파지된 물체의 강성은 각 손끝 강성과 초기 파지력, 파지의 기하학적 형상에 관계하며 제어변수는 파지력과 손끝강성이 될 수 있다. 따라서, 파지강성제어문제를 정리

하여 보면

Problem 1

Compute K_{ci} , f_{coi} for $i = 1, \dots, M$

Subject to

$$K_G = \sum_{i=1}^M {}^o J_{ci}^T K_{ci} {}^o J_{ci} + \Delta K_{og} + \Delta K_c,$$

$$K_{ci} : \text{stable},$$

이라고 할 수 있으며 초기에 $f_e = O$ 이므로 f_{coi} 는 다음식을 만족하여야 한다.

$$O = \sum_{i=1}^M {}^o J_{ci}^T f_{coi} + {}^o J_g^T f_g. \quad (30)$$

이 때, f_{coi} 는 ΔK_c 로서 파지강성에 영향을 주지만 일반적으로 파지의 불안정성을 증가시키므로 제어변수로서 쓸 수 없다⁽¹⁾. 따라서, 전체적인 강성계산과정과는 별도로 적당한 힘분배 알고리즘(force distribution algorithm)⁽⁶⁾에 의하여 식(30)을 풀고 f_{coi} 를 결정하여야 하며, 결과적으로 식(27)는 다음과 같이 주어질 항과 실제적으로 제어할 수 있는 변수들로 이루어진 항으로 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} K_c &= K_G - \Delta K_{og} - \Delta K_c, \\ &= \sum_{i=1}^M {}^o J_{ci}^T K_{ci} {}^o J_{ci}. \end{aligned} \quad (31)$$

강성 K_G 를 갖고 있는 파지에 대하여 K_G 가 positive definite하면 시스템에 축적된 위치에너지는 항상 양이 될 것이고 역으로 K_{ci} 가 positive definite하다면 K_c 는 positive definite하나 파지되어 있는 물체는 ΔK_{og} 와 ΔK_c 에 의하여 안정하지 않을 수도 있다⁽³⁾. 그러므로, ΔK_{og} 와 ΔK_c 를 고려하여 안정된 K_c 값을 선택할 것이 요구되며 그렇지 않으면 positive definite하게 되도록 다시 파지를 계획하여야 한다. 일반적으로 안정된 파지강성이 규정되더라도 과도한 파지력이 주어진다면 ΔK_c 는 positive definite하게 될 수 없으며 안정된 파지를 합성할 수 없게 된다. 따라서, 문제는 positive definite하게 계획된 K_{ci} 에 대하여 positive definite한 K_c 를 구하는 것이라고 할 수 있다. 손이 M 개의 손가락을 갖고 있고 각 손끝이 공통적으로 N 개의 자유도를 갖는다고 할 때 주어진 경우에 있어서 K_c 는 대칭이고 문제에 해당하는

방정식으로 부터 $N(N+1)/2$ 개의 미지수와 작업공간상의 강성의 갯수에 해당하는(3차원의 경우는 21개, 2차원의 경우에는 6개)만큼의 독립된 선형방정식을 얻게 되며 $N(N+1)/2$ 의 차원에 따라서 선형방정식은 over specified, explicit 혹은 under specified한 문제로 된다. 그러나, K_{ci} 가 일반적인 행렬의 형태를 취한다고 하면 선형방정식을 푸는 데에 있어서 K_{ci} 가 p.d하다는 조건을 만족시키는 해를 얻는 것은 힘들게 된다. 따라서, 공식화된 문제에 제한조건을 쉽게 융합시키기 위하여 다음과 같이 손끝강성을 단순화 하자⁽³⁾.

$$K_{ci} = \text{diag}(k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{iN}). \quad (32)$$

여기에서 k_{ij} 는 i 번째 손가락의 접촉점에서 정의된 손끝좌표계에 해당하는 강성성분을 나타내며 $k_{ij} > 0$ ($1 \leq j \leq N$)가 되면 K_{ci} 는 positive definite하게 된다. 식(31)에서 식(32)와 같이 정의된 손끝강성요소들의 미지수들을 계수들로 부터 분리하여 $M \times N$ 개의 손끝강성요소들을 포함하는 벡터를 다음과 같이 구성하자.

$$k = [k_{11} \ k_{12} \ \dots \ k_{1N} \ \dots \ k_{M1} \ \dots \ k_{MN}]^T. \quad (33)$$

K_c 는 대칭이므로 K_c 의 upper triangular element들만으로 벡터 h 를 구성할 수 있다. 배열의 순서는 앞서 구성한 k 와 일치하는 한 중요하지 않으며 식 (31)은 다음과 같은 선형방정식으로 쓸 수 있다.

$$Bk = h. \quad (34)$$

여기에서 B 는 k 의 계수들로 이루어진 행렬이며 제한 조건을 갖는 선형방정식을 푸는 문제로 귀착된다. 또한 손가락에 의하여 구현될 수 있는 최소강성을 고려하면 문제는 다음과 같이 정리된다.

Problem 2

$$\text{Min } \|k - k_i\|$$

Subject to

$$Bk = h,$$

$$k \geq k_i > 0,$$

$k_i \in \mathcal{R}^{MN}$ 는 손가락으로 달성할 수 있는 최소 양의 손끝강성이다.

위의 문제를 풀기 위하여 다음과 같은 부분적인 최적화 알고리즘을 제안한다.

손끝강성 합성알고리즘

1. 파지강성 K_G , 파지형상변수(관절각, 접촉점 등)을 주고 초기 파지력을 계산한다.
2. ΔK_c 와 ΔK_{og} 를 계산한다.
3. K_c 의 positive definiteness를 검사한다.
4. K_c 가 positive definite하지 않으면 step 1으로 가서 파지강성을 다시 계획한다.
5. 식(34)에 의하여 선형방정식을 구성한다.
6. k 를 식 $k = B^+h + [I_1 - B^+B]k_i$ 에 의하여 계산한다. (B^+ 는 B 의 의사역행렬을 의미한다⁽¹¹⁾)
7. k_i 의 해당하는 요소들보다 작은 k 의 요소들이 없다면 계산을 끝낸다.
8. 그렇지 않으면 B 와 h 를 다음과 같이 \bar{B} 와 \bar{h} 으로 수정하여 계산한다.

$$\bar{B} = \begin{cases} b_l & l \neq s \\ 0 & l = s, \end{cases}, \quad (35)$$

$$\bar{h} = h - (B - \bar{B})k_i, \quad (36)$$

여기에서 s 는 k_i 의 해당되는 요소들보다 작은 k 의 요소들의 인덱스를 나타내며 b_l 은 B 의 l 번째 열 벡터이다.

9. 수정된 행렬들을 가지고 6에서 다시 시작한다.

(증명은 참고문헌(5)를 참조할 것)

4.2 수직 강성분해 제어

이 절에서는 수직 강성분해 제어라고 명명된 관절강성 제어법을 제안한다. 식(4)를 참고로 하면 i 번째 손가락의 가상손끝강성 K_{ci} 를 생성하는 관절강성을 다음과 같이 제어하게 되면 관절차원의 부가강성을 상쇄하게 되어 참고문헌(12)에서 제안된 관절강성관계식을 사용할 수 있게 됨을 알 수 있다⁽⁹⁾.

$$K_{qi} = J_{qi}^T(q_{oi})K_{ci}J_{qi}(q_{oi}) - \Delta K_{qi}(q_{oi}, f_{coi}). \quad (37)$$

K_{qi} 를 식(4)에 대입함으로써 유효관절강성은 다음과 같이 되며

$$K_{qei} = J_{qi}^T(q_{oi})K_{ci}J_{qi}(q_{oi}), \quad (38)$$

손가락은 $J_{qi}^T(q_{oi})K_{ci}J_{qi}(q_{oi})$ 의 특성에 따라서 거동하게 됨을 알 수 있다. 여기에서 손끝의 접촉모델에 따라서 관절의 자유도는 여유자유도를 갖게 될 수도 있으므로 이러한 경우를 포괄하는 제어방법을 생각하여 보자. 손가락이 여유자유도($N < n$)를 갖고 있을 경우 K_{qei} 는 singular하여 positive definite하지 않으므로 손가락을 안정되게 제어할 수 있는 방법이라고는 볼 수 없다. 여기에서는 동차변환(similarity transform)을 이용하여 결과적인 손끝강성을 변화시키지 않는 적당한 강성행렬을 더하여 줌으로써 non-singular한 관절강성행렬을 구성하는 방법을 생각하여 보자⁽¹⁰⁾. 식(38)에 동차변환을 적용하면 다음과 같이 대각선 요소들이 $J_{qi}^T(q_{oi})K_{ci}J_{qi}(q_{oi})$ 의 고유치들로 이루어진 $\Lambda_{pi} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 를 얻을 수 있다.

$$\Lambda_{pi} = H_i^T J_{qi} K_{ci} J_{qi} H_i, \quad (39)$$

$$= \text{diag}(\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \lambda_{in}), \quad (40)$$

위의 식에서 $H_i(H_i^{-1} = H_i^T)$ 의 열들은 각각 $J_{qi}^T(q_{oi})K_{ci}J_{qi}(q_{oi})$ 의 고유치 $\lambda_{i1}, \dots, \lambda_{in}$ 에 해당하는 고유벡터들이다.

$$\lambda_{i1} \geq \dots \geq \lambda_{im} \geq \lambda_{i(m+1)} = \lambda_{in} = 0. \quad (41)$$

이 때 영이되는 $n - m$ 개의 고유치 λ_{ij} ($(m+1) \leq j \leq n$)를 임의의 양의 값을 갖도록 하더라도 수직 행렬 H_i 은 변화가 없고 이로부터 새로운 nonsingular한 강성행렬 Λ_i 는 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\Lambda_i = \Lambda_{pi} + \Lambda_{hi}, \quad (42)$$

$$= H_i^T J_{qi}^T K_{ci} J_{qi} H_i + \Lambda_{hi}, \quad (43)$$

여기에서

$$\Lambda_{hi} = \text{diag}\{ \overbrace{0, 0, \dots, 0}^m, \tilde{\lambda}_{i(m+1)}, \dots, \tilde{\lambda}_{in} \}, \quad (44)$$

이고 $\tilde{\lambda}_{ij} > 0((m+1) \leq j \leq n)$ 이 된다. $\Lambda_{pi}^T \Lambda_{hi} = O$ 이므로 행렬 Λ_{hi} 는 항상 행렬 Λ_{pi} 에 수직이다. Λ_i 를 역변환시키면 K_{qi} 는 다음과 같이 되고

$$K_{qi} = H_i \Lambda_i H_i^T \quad (45)$$

$$= J_{qi}^T K_{ci} J_{qi} + K_{ni}, \quad (46)$$

에서 $K_{ni} = H_i \Lambda_{hi} H_i^T$ 를 얻을 수 있다. 이 때 K_{ni} 는 $\{J_{qi}^T(q_{oi})K_{ci}J_{qi}(q_{oi})\}^T K_{ni} = O$ 을 만족시키고 positive semidefinite하므로 결과적인 손끝강성을 변화시키지 않고 관절강성을 positive definite하게 만들 수 있는 강성이다. 제안된 방법에 의하여 얻어진 K_{ni} 는 $J_{qi}^T(q_{oi})K_{ci}J_{qi}(q_{oi})$ 가 존재하는 hyperplane에 수직인 방향으로 고유치 $\tilde{\lambda}_{ij}$ 를 정의하는 방법을 제시하여 주며 $\tilde{\lambda}_{ij}$ 에 의하여 H_i 와 관련된 영인 고유벡터에 해당하는 강성의 세기를 조절할 수 있다. 이로부터, 최종적인 관절강성의 형태는 다음과 같이 주어진다.

$$K_{qi} = J_{qi}^T K_{ci} J_{qi} + K_{ni} - \Delta K_{qi}(q_{oi}, f_{coi}). \quad (47)$$

따라서, 초기의 파지력을 고려하면 제안된 관절강성 제어를 통하여 얻어지는 관절 토크는 다음과 같으며

$$\tau_i = K_{qi}(q_{di} - q_i) + K_{qdi}(\dot{q}_{di} - \dot{q}_i) + G(q_i) + J_{qi}^T f_{coi}, \quad (48)$$

\dot{q}_{di} 는 원하는 관절속도, \dot{q}_i 는 현재의 관절속도, $G(q_i)$ 는 i 번째 손가락의 중력모상 토크, K_{qdi} 는 댐핑행렬에 해당한다. K_{qi} 와 유사하게, K_{qdi} 도 또한 positive definite하여야 하며 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_{qdi} = \alpha_i H_i \text{diag}\{\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \tilde{\lambda}_{i(m+1)}, \tilde{\lambda}_{in}\} H_i^T. \quad (49)$$

여기에서 α_i 는 댐핑의 크기를 결정하는 스칼라 계수 (scalar coefficient)이며 그림 2는 제안된 파지강성제어의 구조를 보여준다.

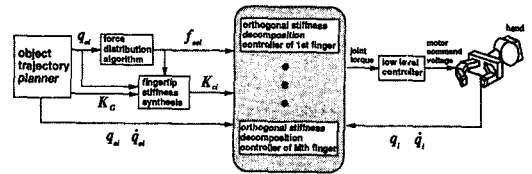


Fig. 2 파지강성 제어기

5. 실험적 검증

5.1 로봇손의 개요

실험에 사용된 로봇손은 그림 3에 보여진 것과 같이 인간의 엄지와 검지를 흉내내기 위하여 평면상에서 움직이는 두 개의 비대칭 손가락들로 구성되어 있으며 이 중

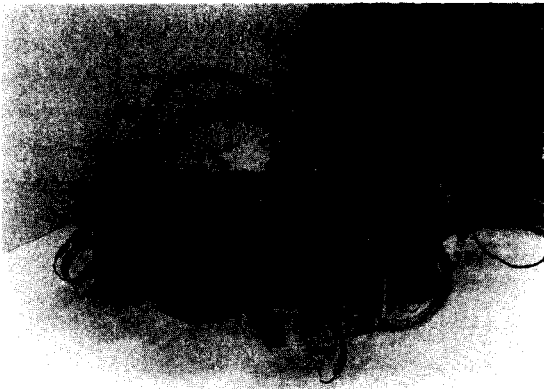


Fig. 3 두 손가락 로봇손

프트웨어 개발 환경인 VRTXvelocity⁽¹³⁾를 이용하여 UNIX 환경하의 워크스테이션에서 개발하였다. 그림 4 는 로봇손과 제어시스템의 개략도를 보여준다.

5.2 파지강성제어의 실험적 검증

실험에서는 부가강성의 안정성에 대한 영향 및 제한된 강성제어의 실효성에 관하여 확인하여 보았다. 자유공간상에서의 움직임에서도 로봇손은 물체의 미끄러짐을 막기 위하여 파지력을 가해줘야 하고 이를 위하여 손가락은 초기 변위를 주거나 혹은 직접 파지력을 주어야 하므로 내부적으로 파지계는 자유로운 상태가 아니며 따라서, 부가강성의 효과가 존재한다. 실험을 통하여는 먼저 물체가 환경과 접촉하지 않는 자유공간상의 조작에서도 관찰차원에서의 부가강성효과가 나타난다는 것을 보여주려고 하였다. 로봇손은 반경 d 가 80mm인 플라스틱 반원형 원반을 파지하고 원반의 파지자세를 바꾸지 않은 채 다음과 같은 원형 궤적을 따라가도록 하였다.

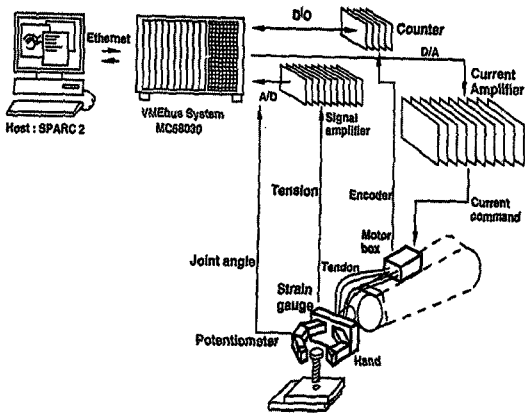


Fig. 4 로봇손과 제어시스템의 개략도

$$x = [r \cos(2\pi t/T) \ r \sin(2\pi t/T) \ 0]^T. \quad (50)$$

여기에서 t 는 경과된 시간이며 명명한 궤적의 반경 r 과 회전주기 T 는 각각 10mm와 10초로 주어졌다. 초기 파지력은 원반을 양끝에서 누르는 방향으로 3.5N이 주어지고 파지강성은 다음과 같이 주어졌으며

$$K_G = \text{diag}(500, 500, 3) \text{ N/m}, \quad (51)$$

K_{c1} 은 엄지손가락의 손끝강성, K_{c2} 는 집게손가락의 손끝강성을 나타낸다고 할 때 손끝강성 합성법을 이용하여 구한 손끝강성은 아래와 같다.

$$K_{c1} = K_{c2} = \text{diag}(250, 250) \text{ N/m}. \quad (52)$$

실험에 사용한 로봇손에서 손끝접촉은 마찰이 있는 점 접촉으로 되므로 집게손가락은 한 개의 여유자유도를 갖게 된다. 따라서, 영이 되는 고유치 λ_{23} 를 일정하게 0.045가 되도록 제어하면, 수직 강성분해 제어에 의하여 구한 각 손가락의 관절강성은 다음과 같다.

$$K_{q1} = J_{q1}^T \begin{bmatrix} 200 & 0 \\ 0 & 200 \end{bmatrix} J_{q1} - \Delta K_{q1}(q_{01}, f_{c01}) \quad (53)$$

$$K_{q2} = J_{q2}^T \begin{bmatrix} 200 & 0 \\ 0 & 200 \end{bmatrix} J_{q2} \quad (54)$$

집게손가락은 세 개의 관절과 엄지 손가락은 두 개의 관절로 이루어져 있다. 이 로봇손은 줄을 이용하여 원격구동을 하는 방식을 채택하고 있으며 열 개의 토크 제어되는 직류 서보 모터(정격 토크 1.4Nm, 토크정수 2.1Nm/A, 50:1 하모닉드라이브 감속기를 포함한 정격 속도 60rpm)들이 줄을 구동하는데 사용되었다. 하드웨어는 VME bus에 기초한 두 개의 target computer(Motorola MC68030 CPU single board computer)로 이루어져 있으며 주 컴퓨터로서 SUN sparc 워크스테이션을 사용하였다. 또한 16개의 채널을 갖고 있는 D/A 변환기는 제어기로부터 모터 앰프로 토크 명령을 전달하며 16개의 미분채널을 갖고 있는 A/D변환기는 관절의 위치와 장력을 읽어들인다. 제어 프로그램은 약간의 68030 어셈블리 언어와 C 언어로 쓰여졌으며 실시간 소

$$+ H_2 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.045 \end{bmatrix} H_2^T - \Delta K_{q_2}(q_{o2}, f_{co2}) \quad (55)$$

여기에서 관절차원의 부가강성 $\Delta K_{q_1}(q_{o1}, f_{co1})$ 과 $\Delta K_{q_2}(q_{o2}, f_{co2})$ 를 강성제어식에 포함시키지 않을 경우에 관하여 생각하여 보자. 그림 5는 집게손가락의 손끝강성을 $\text{diag}(100, 100)$ N/m에서 $\text{diag}(500, 500)$ N/m로 변화시켜가면서 $\Delta K_{q_2}(q_{o2}, f_{co2})$ 를 관절강성제어에 포함시키지 않았을 때 유효관절강성을 구하고 이의 최소고유치

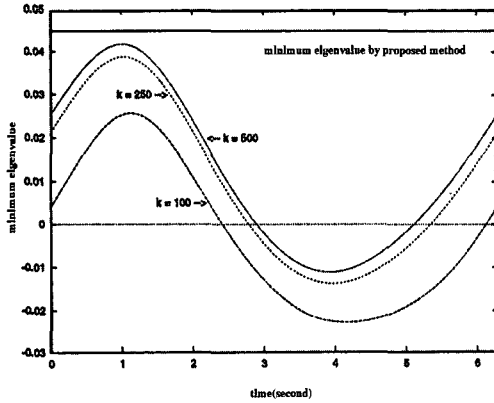


Fig. 5 집게손가락 유효관절강성의 최소고유치

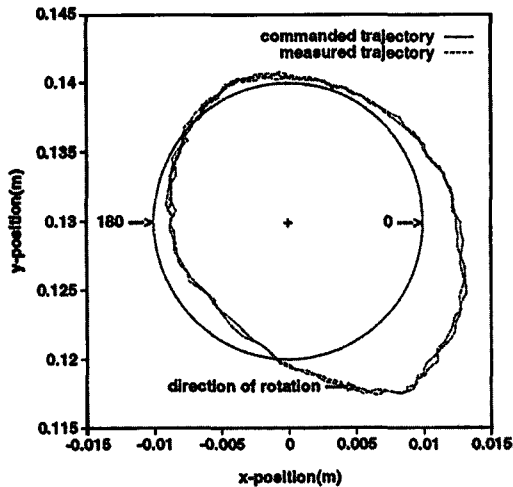


Fig. 6 자유공간상의 조작에서 파지된 물체의 궤적 (ΔK_{q_i} 를 제어기에 포함시키지 않았을 경우)

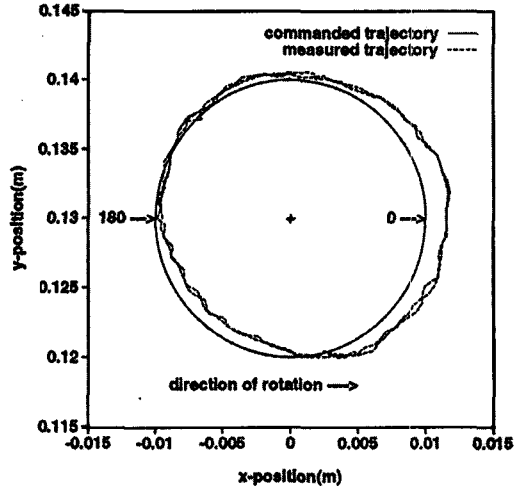


Fig. 7 자유공간상의 조작에서 파지된 물체의 궤적 (ΔK_{q_i} 를 제어기에 포함시켰을 경우)

를 나타낸 것이다. 이 그림으로 부터 유효관절강성은 $2\pi/T = \pi$ 인 위치에서 음의 최소 고유치를 갖게 되고 관절형상이 불안정하여 질 것을 예측할 수 있다. 이는 그림 6과 7에 보여진 실제 실험결과들과도 잘 일치한다. 관절차원의 부가강성을 고려하지 않은 제어기는 $2\pi/T = \pi$ 부근에서 파지가 불안정하여지고 명령된 위치에서 많이 벗어나게 되며, 반면에 그림 7에서 나타낸 것과 같이 제안된 제어법을 사용하여 수행된 실험결과는 명령된 궤적의 전 구간에 대하여 파지가 안정하게 제어되고 있음을 볼 수 있다. 이는 제안된 제어방법이 관절차원의 부가강성을 보상함으로써 조작중에 유효관절강성을 항상 positive definite하게 만들고 따라서 손가락 형상을 안정하게 제어하기 때문이다.

다음 실험에서는 그림 8에 나타낸 것과 같이 파지된 물체가 환경과 접촉하는 작업을 수행하는 데에 있어서 제어기의 성능을 평가하여 보았다. 앞의 실험에서 주어진 것과 동일한 원형궤적상을 파지된 원반을 움직이며 궤적상의 일정한 위치에서 환경과 접촉하도록 하고 접촉에 의하여 생긴 변위와 접촉력을 측정함으로써 파지가 주어진 강성을 갖는가를 확인하여 보았다. 3N의 초기파지력을 가하였으며 파지강성은 다음과 같이 주어졌다.

$$K_G = \text{diag}(500, 500, 3) \text{ N/m}. \quad (56)$$

환경과의 접촉력은 1축 힘센서를 사용하여 측정하였고

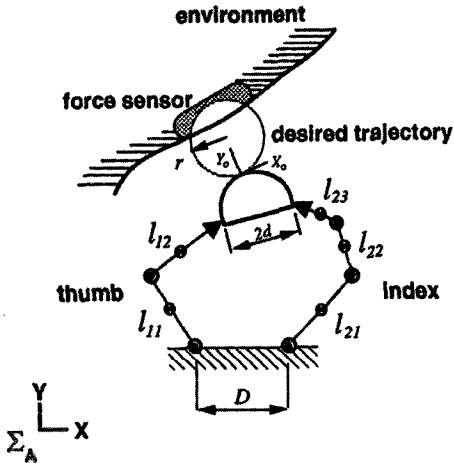


Fig. 8 접촉실험의 개념도

이때 요구되는 힘은 파지강성과 변위를 곱한 값이 되며 x_{od} 가 원하는 물체의 위치라고 할 때 다음과 같이 계산할 수 있었다.

$$f_d = K_G(x_{od} - x_o). \quad (57)$$

그림 9과 10은 관절차원의 부가강성을 보상하지 않았을 때의 결과이며 물체가 경유한 궤적은 좋지 않은 추적성능을 보여 줌과 동시에 접촉면에서 측정된 힘에서도 예상과는 많이 어긋남을 볼 수 있었다. 반면에 제한된 제어를 적용함으로써 얻어진 결과는 그림 11에서 보여진 바와 같이 명령된 궤적을 매우 정확하게 추적하고 있음을 알 수 있다. 더우기 그림 12의 측정된 접촉력은 원하는 결과와 매우 잘 일치하고 있다. 이로 부터 부가강성의 영향

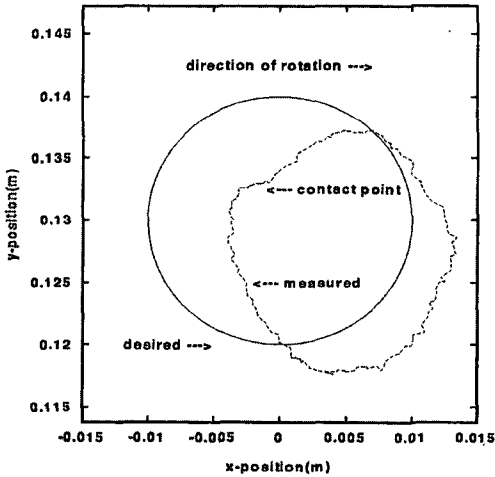


Fig. 9 접촉실험에서 파지된 물체의 궤적 (ΔK_{gr} 를 제어기에 포함시키지 않았을 경우)

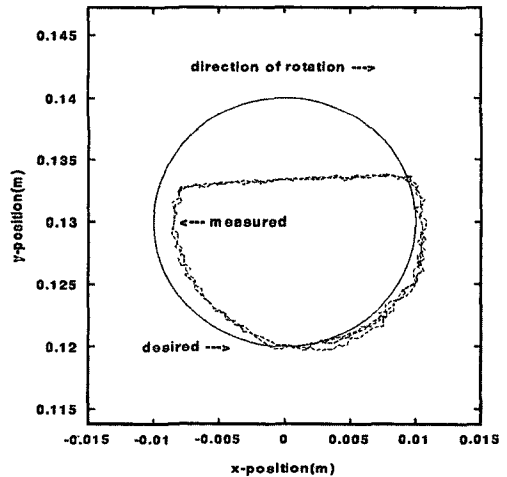


Fig. 11 접촉실험에서 파지된 물체의 궤적 (ΔK_{gr} 를 제어기에 포함시켰을 경우)

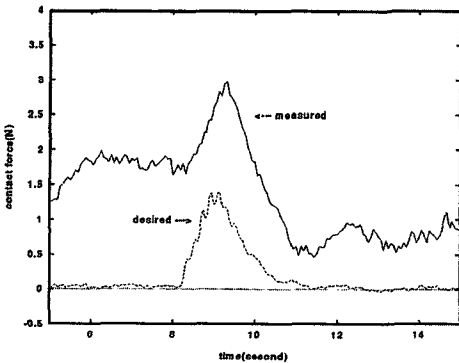


Fig. 10 접촉실험에서 측정된 힘 (ΔK_{gr} 를 제어기에 포함시키지 않았을 경우)

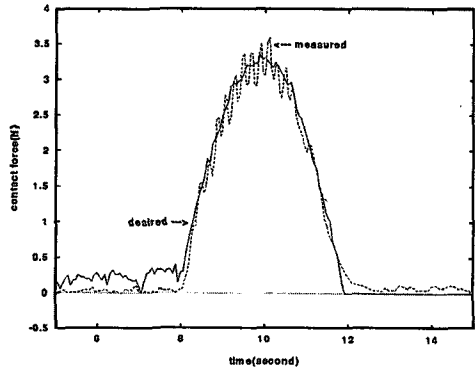


Fig. 12 접촉실험에서 측정된 힘 (ΔK_{gr} 를 제어기에 포함시켰을 경우)

은 매우 크다는 것을 확인할 수 있었으며 또한 이를 보상함으로써 제어능력이 향상되고 제안된 제어방법을 채택함으로써 물체의 강성은 성공적으로 제어될 수 있다는 것을 알 수 있었다.

6. 결론

새로운 파지강성 모델 및 파지강성을 제어할 수 있는 효과적인 방법이 제안되었다. 제안된 파지강성모델은 관절강성 뿐만이 아니라 파지력의 영향도 포함하고 있으며, 부가강성이라고 명명한 파지력의 영향중 관절에서의 부가강성은 이전의 연구에서는 고려되지 않았던 부분이다. 또한, 새로운 파지강성 모델을 기초로 하여 파지강성제어법이 개발되었다. 이 방법은 손끝강성을 계산하는 손끝강성합성법과 이를 관절강성을 제어함으로써 실현하는 수직 강성분해 제어로 구성되어 계층적으로 분산된 제어기의 구조하에서 파지를 제어할 수 있는 장점이 있으며 부가강성을 보상하고 안정된 관절형상을 제어할 수 있는 방법을 제공하여 준다. 실험을 통하여 제안된 강성모델과 관절에서의 부가강성의 중요성과 파지강성제어법의 평가를 수행하였다. 접촉상태 뿐만이 아니라 자유공간의 운동에 있어서도 파지는 근본적으로 관절에서의 부가강성을 수반한다는 것을 알 수 있었고 이에 대한 고려가 안정된 파지 및 강성제어에 필요하다는 결론을 얻을 수 있었다.

참고 문헌

1. Cutkosky, M. R., and Kao, I., "Computing and Controlling the Compliance of Robotic Hand," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 5, No. 2, pp. 151-165, 1989.
2. Kaneko, M., Imamura, N., Yokoi, K., and Tanie, K., "A Realization of Stable Grasp Based on Virtual Stiffness Model by Robot Fingers", *Proc. IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 156-163, 1990.
3. Nguyen, V., "Constructing Stable Grasps", *Int. J. Robotics Research*, Vol. 8, No. 1, pp. 26-37, 1989.
4. Nakamura, Y., Nagai, K., and Yoshikawa, T., "Dynamics and Stability in Coordination of Multiple Robotic Mechanisms", *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 8, No. 2, pp. 44-61, 1989.
5. Choi, H. R., Chung, W. K., and Youm, Y., "Control of grasp stiffness using a multifingered robot hand with redundant joints," *ROBOTICA*, Vol. 13, pp. 351-362, 1995.
6. Adli, M. R., Nagai, K., Miyata, K., and Hanafusa, H., "Apparent Structural Stiffness of Closed Mechanisms under the effect of Internal Forces during Dynamic Motion", *Proc. IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pp. 773-778, 1991.
7. Yi, B. J., and Freeman, R. A., "Synthesis of Actively Adjustable Springs by Antagonistic Redundant Actuation," *Trans. ASME, Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 114, pp. 451-461, 1992.
8. Cheng, F. T., and Orin, D. E., "Efficient Formulation of the Force Distribution Equations for Simple Closed-Chain Robotic Mechanisms", *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics*, Vol. 21, No. 1, pp. 25-32, 1991.
9. Choi, H. R., Chung, W. K., and Youm, Y., "Stiffness Analysis and Control of Redundant Manipulators," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 689-695, 1994.
10. Kim, J. O., Khosla, P., and Chung, W. K., "Static Modeling and Control of Redundant Manipulators," *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 9, No. 2, pp. 145-157, 1992.
11. Rao, C. R., and Mitra, S. K., "Generalized Inverse of Matrices and its Applications", John Wiley and Sons, 1971.
12. Salisbury, J. K., "Active Stiffness Control of Manipulator in Cartesian Coordinates," *Proc. IEEE 19th Conf. on Decision and Control*, pp. 95-100, 1980.
13. Ready Systems Inc., "Manual of VRTXvelocity, realtime O/S", Ready Systems Inc., 1991.