

< 논문 >

물체의 안정한 조작을 위한 동작의 계획과 운동의 실현

황 창 순*

(2004년 8월 23일 접수, 2005년 2월 17일 심사완료)

Control Program for Dexterous Manipulation by Robotic Hand

Chang-Soon Hwang

Key Words: Robotic Hand(로봇 손), Dexterous Manipulation(안정 조작), Primitive Motions(요소 동작), Control Program(제어 방법), Active Sensing(실시간 능동검출)

Abstract

This paper presents a motion planning and control method for the dexterous manipulation with a robotic hand. For a given trajectory of an object, a simulation system calculates the necessary joint displacements and contact forces at the fingertip surfaces. These joint displacements and contact forces are the reference inputs to the control loops of the robotic fingers. A task is decomposed into a set of primitive motions, and each primitive motion is executed using the planned output of the simulation system as the reference. Force sensors and dynamic tactile sensors are used to adapt to errors and uncertainties encountered during manipulation. Several experimental results are presented.

1. 서론

현재 가장 간단한 구조의 로봇 손은 글립퍼 타입이고, 보통의 로봇은 단순한 글립퍼를 장착한 것이 많다. 이것은 자유도가 적기 때문에 제어가 간단하지만, 정밀하고 다양한 작업이 요구되는 환경에는 적합하지 않다. 이와는 반대로 인간의 손과 같이 다수의 손가락과 관절을 구비한 다지의 로봇 손은 다수의 자유도를 적극적으로 이용하여 정밀하고 복잡한 작업을 실현할 수 있는 잠재적인 능력을 가지고 있다. 즉 물체를 파지하는 기능에 추가하여 손가락의 표면(fingertip surface)과 물체 사이의 미끄러짐(sliding), 비틀림(twisting), 굴림(rolling) 등과 같은 상대적인 접촉운동과 재파지(regrasping)를 적극적으로 이용함으로써 대상물체를 목표로 하는 위치 및 방향으로 쉽게 조작할 수 있다.

이와 같은 일련의 동작을 자율적으로 실행하기 위해서 조작하는 도중에 물체와 로봇 손에 관한 정보를 검출하면서 운동상황과 접촉상태의 변화를 실시간적인 피드백 제어에 반영해야 한다. 그리고 외부환경의 다양한 변화를 탐지하면서 즉각적으로 반응하고 대처할 수 있는 지능적인 로봇이 필요하다.

로봇 손을 이용한 물체의 조작에 관한 연구의 전체적인 구조는 손가락과 물체를 하나의 역학적인 모델로 취급하면서 기구학, 역학, 최적화 등의 방법을 응용하는 것을 특징으로 한다. 이러한 연구의 틀은 체계적으로 발전하면서 이론적인 정리가 이루어졌지만, 실제 환경에서 복잡성이나 비선형성을 취급하는 것에는 이론적 및 계산량적인 문제가 있다.⁽¹⁾ 그리고 실제로 작업을 행하는 도중에 손가락에서 얻어지는 정보나 물체에 가해지는 작용의 오차를 고려하지 않기 때문에 목표로 하는 동작의 실현이 용이하지 않은 경우가 대단히 많다. 따라서 미지 환경에서 정보의 부족에 어떻게 대처할 것인가 등이 중요

* 회원, 한국과학기술연구원 지능로봇연구센터
E-mail : cshwang@kist.re.kr
TEL : (02)958-6812 FAX : (02)958-5629

한 과제로 남겨져 있다.⁽²⁾ 실제 환경에서 물체를 조작하는 동작을 실현하기 위해서 동작의 계획에 전적으로 의존하지 않고 센서에서 얻어지는 실시간적인 정보를 적극적으로 유효하게 이용하면서 환경의 변화에 유연하게 대응하고, 정보의 오차나 불확정성을 행동하면서 극복할 필요가 있다.^(3, 4) 따라서 필요한 정보의 획득에 적합한 센서와 획득한 정보를 효과적으로 이용하는 제어방법을 개발하여 센서의 정보를 적극적으로 활용하면, 오차나 불확정성을 포함한 부분적인 정보라도 뛰어난 적응성의 제어가 가능하게 된다.

로봇 손에 관한 행동론적인 연구로서는 Speeter⁽⁵⁾가 50종류 이상의 기능적인 단위동작(motion primitive)을 준비하여 Utah/MIT 로봇 손에 의한 물체의 조작을 논했다. Michelman⁽⁶⁾은 2차원의 기본적인 조작의 함수를 조합함으로써 복잡한 작업을 달성할 수 있다는 것을 Utah/MIT 로봇 손으로 증명했다. Borst 등⁽⁷⁾은 우주공간에서 원격작업을 수행하기 위한 DLR 로봇 손으로 인간이 행하는 다양한 작업(pinch grasp, precision grasp, power grasp)을 실험적으로 구현했다. Namiki 등⁽⁸⁾은 인간이 행하는 고속의 동적인 조작을 실현하기 위해서 고속 비전과 결합된 High-speed 로봇 손을 개발했고, “pushing”, “hitting”, “throwing”, “catching” 등의 작업에 응용했다. 물체와 환경의 접촉을 동반하는 조작을 취급한 연구도 있다.⁽⁹⁾ 종래에 이런 종류의 연구는 완전히 자율적인 로봇을 상정하고 진행되었지만 작업을 위한 공간의 인식, 전체적인 작업의 계획 등에 해결되지 않은 과제가 남겨져 있으며, 현재는 인간을 적극적으로 시스템에 포함한 반자율적인 시스템에 관한 연구도 진행되고 있다.^(10, 11) 그러나 미끄러짐, 비틀림, 굴림, 재파지 등을 이용하면서 물체를 안정적으로 조작하기 위한 로봇 손의 동작계획, 목표로 하는 물체의 대변위 운동을 실현하기 위한 로봇 손의 운동제어, 조작운동의 전체적인 작업계획 등을 충분히 고려하지 않았으며, 그리고 실제의 물체를 대상으로 대변위의 조작운동을 행한 예는 극히 적다.^(12, 13)

본 논문에서는 평평한 바닥면을 이용하여 두 손가락의 로봇 손으로 물체의 조작운동을 실현하기 위해서 필요한 요소동작을 분류하고, 동작의 계획과 운동의 실현에서 발생할 수 있는 문제

점을 분명히 한다. 그리고 동작계획을 실현하는 일반적인 방법을 개발하여, 대변위의 물체운동에 대해서 조작운동을 실행하기로 한다. 물체의 다양한 조작을 위한 동작의 계획과 운동의 실현을 다른 저자의 학술대회 논문⁽¹⁴⁾이 있지만, 학술잡지 논문으로 다시 투고하도록 한다.

2. 요소동작의 분류와 실현방법

로봇 손에 의한 물체의 조작은 작업의 안정성, 적응성, 범용성을 향상시켜야 한다. 따라서 다른 동작에 응용할 수 있는 일반적인 문제를 포함한 작업을 연구대상으로 선택할 필요가 있다. 본 논문에서는 두 손가락의 로봇 손으로 평평한 바닥 위에 놓인 물체를 수직평면 내에서 조작하는 작업에 대해 고찰하기로 한다. 이 작업은 환경(바닥)과 물체의 접촉문제를 포함하기 때문에 환경과 물체의 접촉점 위치에 관한 불확정성, 환경으로부터 물체에 가해지는 힘에 관한 불확정성, 환경과 물체의 접촉상태에 관한 변화(미끄러짐) 등을 고려할 필요가 있다. 그리고 환경과 물체의 접촉문제를 풀기 위해서 물체의 구속상태를 추정하지 않으면 안된다.^(15, 16) 물체의 조작에 바닥면을 이용함으로써 로봇 손의 자유도가 부족해도 다양한 작업이 가능하다.

물체의 조작운동을 실현하기 위해서 전체작업을 요소동작으로 나눌 필요가 있고, 각각의 요소동작을 실행하기 위한 제어방법을 개발해야 한다. 여기서 요소동작은 센서의 정보와 직접적으로 연결된 기본단위의 동작으로서 제어 시스템의 구성단위가 된다. 본 논문에서는 바닥면을 이용한 물체의 평면적인 조작운동을 Fig. 1과 같은 요소동작으로 분해했다.

- (a) 물체의 표면을 따라가는 동작
- (b) 물체를 기울이는 동작
- (c) 물체를 굴리는 동작
- (d) 물체에서 손가락을 떼는 동작
- (e) 물체를 바닥면에 놓히는 동작
- (f) 물체를 밀어내는 동작
- (g) 물체를 끌면서 굴리는 동작
- (h) 물체를 다시 잡는 동작
- (i) 물체를 다시 잡고 끌면서 굴리는 동작

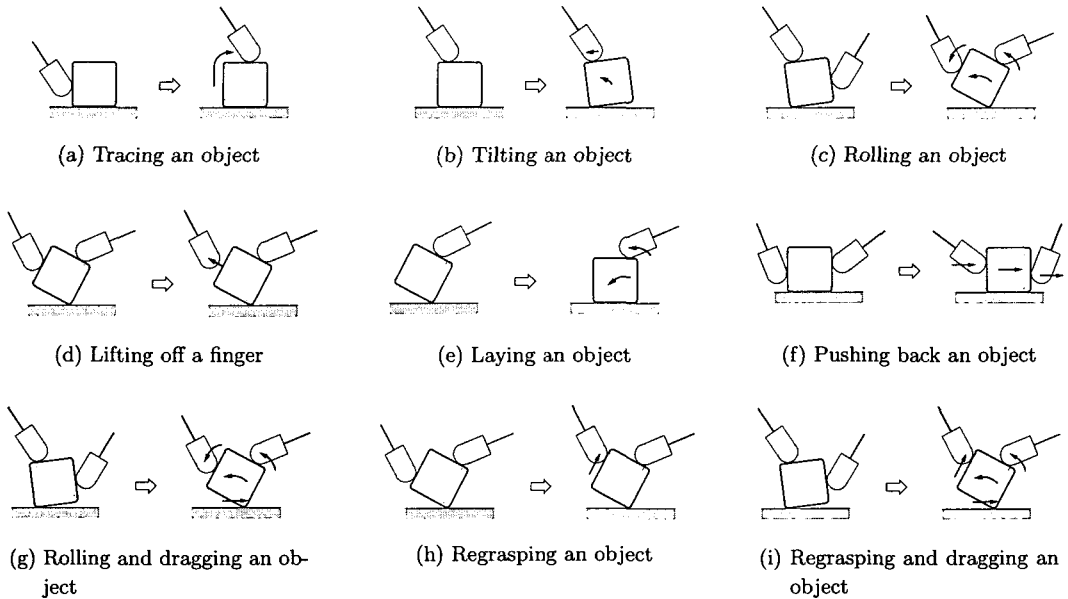


Fig. 1 Primitive motions for manipulating an object on the table

이러한 요소동작을 계통적으로 분류하는 것은 어렵고 임의적인 것이 되기 쉽지만, Fig. 1 (a)~(i)는 기본적인 동작을 포괄하고 있다고 생각된다. 두 손가락의 로봇 손으로 바닥 위에 놓인 물체를 수직평면 내에서 조작하는 동작은 손가락과 물체의 상대적인 접촉운동의 조합으로 추론할 수 있다. 예를 들면 Fig. 1 (g)의 물체를 끌면서 굴리는 동작은 Pure rolling 운동(오른 손가락), Pure rolling 운동(왼 손가락), Slide rolling 운동(바닥면)이 조합된 경우에 해당한다.⁽¹⁷⁾

요소동작은 센서의 정보를 적극적으로 이용하여 실행한다. 작업대상과 외부환경의 명확한 모델이나 지식을 준비하는 것이 운동의 실현에 도움이 된다면 사전에 동작의 계획을 적극적으로 세우겠지만, 실제 환경에서 오차나 불확정성 등의 영향으로 사전에 계획한 대로 작업이 진행되지 않기 때문에 기본적으로 환경과 직접적인 상호작용을 반복하면서 작업의 목표를 달성한다. 본 논문에서는 물체를 기울이는 동작(Fig. 1 (b)), 물체에서 손가락을 떼는 동작(Fig. 1 (d)), 물체를 바닥면에 눕히는 동작(Fig. 1 (e))을 언급하기로 한다. 물체를 기울이는 동작과 물체를 바닥면에 눕히는 동작은 동작의 계획이 운동의 실현에 도움을 줄 수 있고, 물체에서 손가락을 떼

는 동작은 별로 도움을 줄 수 없다.

3. 물체의 안정적인 조작을 위한 실현전략

조작운동에서 동작의 계획과 운동의 실현에 관한 문제점은 크게 두 종류로 나눌 수 있다. 첫째는 주어진 작업의 목표에서 대상물체를 어떻게 움직이면 되는가 하는 전체적인 동작계획의 문제이고, 둘째는 실제 환경에서 다양한 오차나 불확정성에 적응하면서 계획에 근거하여 어떻게 운동을 실현하는가 하는 동작제어의 문제이다. 전체적인 동작계획의 문제는 아직 확립된 해결방법이 없으며 로봇 공학에서 중요한 과제로 남겨져 있다. 본 논문에서는 전자의 전체적인 동작계획의 문제는 인간이 개입하는 것으로 하고, 후자의 실제 환경에서 오차나 불확정성에 적응하는 동작제어의 문제에 초점을 두도록 한다. 동작제어에 영향을 주는 오차에는 관절각과 접촉력 등의 계산에 이용한 모델의 근사 오차와 같이 계획단계에서의 오차^(18, 19), 센서의 검출 오차나 액추에이터의 출력 오차와 같이 실행단계에서의 오차가 있다. 그리고 마찰계수와 같이 사전에 정확한 값을 알 수 없으면서 실행단계에서 계속 변동하는 요소도 존재한다.

본 논문에서는 이와 같은 조건에서 물체의 안정적인 조작운동을 실현하기 위해서 Fig. 2와 같은 전략으로 동작을 계획하고 운동을 제어한다.

Step 1. 조작의 시작점과 종료점에서의 물체의 위치 및 방향으로부터 목표로 하는 운동을 실현하기 위해 필요한 요소동작(Fig. 1)의 조합을 인간이 개략적으로 계획한다.

Step 2. 각각의 요소동작에 대해서 과지와 조작의 운동학(17, 18) 및 역학(20, 21)으로부터 물체의 조작에 필요한 로봇 손가락의 관절각과 접촉점의 궤적, 접촉력의 변화를 작업 모델에서 구한다. 그리고 요소동작의 실현이 가능한가를 검증하고 전체동작을 실현하기 위한 요소동작의 조합을 결정한다.

Step 3. 요소동작의 순차적인 실행을 위해서 접촉상태의 안정성을 판정하는 것에 필요한 센서 신호의 경계치와 같은 센서 피드백을 위한 조건 등을 결정한다.

Step 4. 동작계획에 반영되지 않은 실제 환경의 오차나 불확정성은 센서의 정보로부터 행동하면서 유연하게 보상하고 동작의 계획을 실행한다. 요소동작을 순차적으로 실행하여 일련의 목표동작을 실현한다.

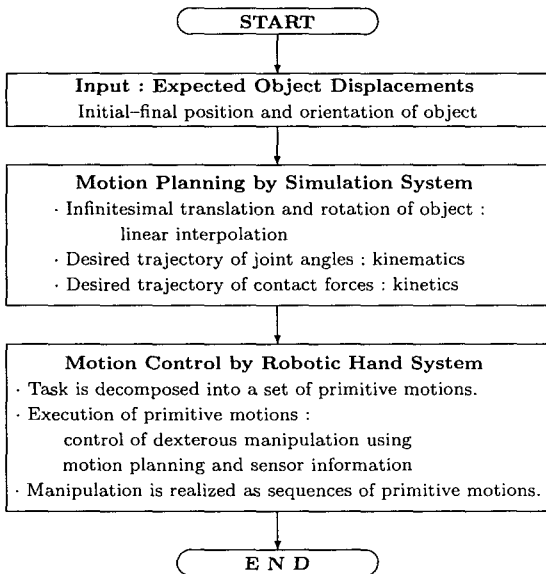


Fig. 2 Control program of manipulative motion

동작계획에서 얻어진 관절각과 접촉력의 궤적은 로봇 손의 제어를 위한 목표치가 된다. 실제 환경의 상태를 검출하는 센서의 정보는 손가락의 관절각, 접촉력 및 미끄러짐의 발생이다. 접촉점의 위치는 손가락 말단의 접촉력과 손가락의 자세로부터 계산한다.(22) 그리고 이러한 실현전략은 전체(조작운동)를 부분(요소동작)으로 나누고 부분의 실현을 통해 전체의 달성을 도모하기 때문에 기본적으로 환원론적인 접근방법이다.

4. 실험장치

실험을 위해 일본의 도쿄대학(University of Tokyo)에서 제작된 로봇 손은 Fig. 3과 같이 와이어 구동의 두 손가락으로 이루어져 있고, 각 손가락은 3자유도의 구조이다. 센서는 Fig. 4와 같이 3축의 힘 센서, 압전 필름(PVDF: Polyvinyl-

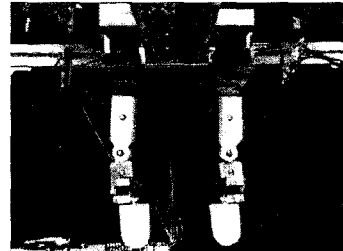
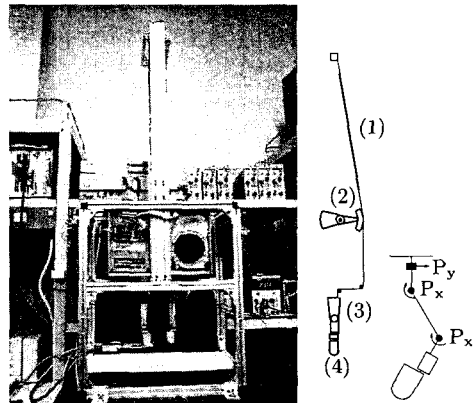


Fig. 3 Two-fingered robotic hand



- (1) Rubber bands for pretensioning
- (2) Four voice-coil motors per finger
- (3) Robotic finger
- (4) Force sensor and dynamic tactile sensor

Fig. 4 Experimental system

dene Fluoride)을 사용한 촉각 센서가 장착되어 있다. 와이어의 구동은 제어성과 응답성을 증시하여 보이소 코일 모터에 의한 다이렉트 구동을 채용했다. 동력전달기구를 포함한 구동방식과 자유도의 구성은 Stanford-JPL 로봇 손과 같으며, 각 손가락의 관절배치는 $P_y-P_x-P_x$ 이다.⁽²³⁾ 그리고 물체의 운동을 수직평면 내의 2차원으로 제한하기 위해서 제1 관절인 P_y 를 조작하는 도중에 고정하기로 한다. 촉각 센서는 손가락 표면의 고무 속에 PVDF 압전 필름을 접착제로 붙이고, 실리콘으로 채운 구조이다. 촉각 센서에 전달되는 진동을 신호처리하여 손가락과 물체의 미끄러짐을 실시간으로 검출한다.⁽²⁴⁾ 인간의 손가락과 같이 큰 마찰과 부드러운 감촉을 구현하기 위해 고무와 실리콘을 사용했다. 그리고 실험장치에서 센서의 검출주기는 1.0[msec], 관절각의 제어주기는 5.0[msec]이다.

5. 요소동작의 실현

5.1 물체를 기울이는 동작⁽²⁴⁾

마찰계수가 미지인 물체를 안정하게 조작하기 위해서 미끄러짐과 같은 운동상태의 변화

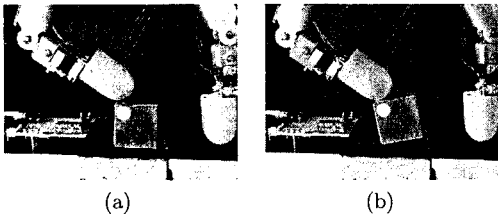


Fig. 5 Procedure of tilting an object

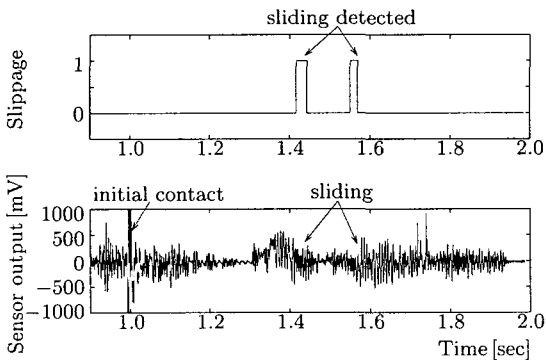


Fig. 6 Experimental result of tilting the object

를 실시간으로 판단하여 회복동작을 실행할 필요가 있다. 미끄러짐의 검출을 이용한 예로서 Fig.5와 같이 바다 위에 놓인 정육면체의 물체를 손가락과 물체 윗면 사이의 마찰력을 이용하여 기울이는 동작을 실현했다. 대상물체는 각 모서리가 30.0[mm]인 나무 조각에 알루미늄 판을 붙인 것이다. 기울이는 동작을 실현하기 위해서 물체의 형상 및 크기, 위치 및 방향, 무게 및 무게 중심, 마찰계수, 회전운동의 중심 등의 정보가 필요하다. 그러나 이러한 정보를 사전에 몰라도 접촉력(법선력)을 변화시키면서 미끄러짐의 발생을 실시간으로 관측하고, 미끄러짐이 검출된 경우에 접촉력의 목표치를 증가함으로써 손가락과 물체의 접촉력을 적절히 제어하면 이 동작은 실현할 수 있다. 즉 미지 물체를 안정하게 기울이는 동작이 가능하다. Fig.6에 미끄러짐의 실시간적 관정, 촉각 센서의 출력을 나타냈다. 손가락의 말단을 접촉점에서 접선방향으로 0.2[sec] 사이에 5.0[mm]를 이동시켰다. 접촉력의 목표치는 2.0[gf]에서 시작하며, 미끄러짐이 발생하면 동작을 처음부터 다시 행하고 동작이 성공할 때까지 접촉력을 2.0[gf] 만큼 단계적으로 증가시킨다. 촉각 센서의 출력에는 미끄러짐에 의한 진동뿐만 아니라 액추에이터의 진동이나 마찰음, 그리고 손가락과 물체의 접촉이나 이탈에 의한 진동 등의 신호가 노이즈로 포함되어 있지만, 적절한 신호처리에 의해 미끄러짐을 판단할 수 있었다. 물체의 무게와 무게 중심 등이 변해도 접촉력을 적절히 조정하여 물체를 기울일 수 있었다.

5.2 물체에서 손가락을 떼는 동작⁽¹⁴⁾

물체에서 손가락을 안정하게 떼는 동작(Fig.1(d))의 목표는 힘과 모멘트의 평형방정식과 마찰의 안정조건을 만족하면서 왼 손가락의 접촉력을 작게 하고 물체에서 왼 손가락을 떼는 것이다. 즉 물체에 작용하는 접촉력을 재조정할 필요가 있고, 물체의 구속상태를 추정해야 한다. 여기서 물체의 구속상태에 관한 정보는 바닥면과 물체의 접촉점(구속점), 손가락과 물체의 접촉점부터 바닥면과 물체의 접촉점(구속점)까지의 방향(구속방향)으로 분류할 수 있다. 구속점은 물체의 회전운동을 구속하는 중심이고, 구속방향은 구속력의 작용선이다. 접촉력을 재조정하

기 위해서 접촉력을 제어하는 피드백 알고리즘의 개발이 필요하다. 그리고 정적인 센서의 정보만으로 구속점의 위치와 힘의 구속방향을 정확하게 추정하는 것은 불가능하기 때문에 물체를 조금 움직여서 그 반응을 보는 액티브 센싱의 방법을 사용해야 한다.

접촉점에서 물체의 구속상태를 정확하게 추정하는 방법을 분류하면 접촉점의 미소변위로부터 추정하는 2종류의 위치 중심의 방법과 접촉력의 미소변화로부터 추정하는 2종류의 힘 중심의 방법으로 총 4종류의 방법을 생각할 수 있다.

관절각의 변화로부터 추정한 구속방향을 수정하는 방법은 물체의 구속점 중심의 마찰상태가 불안정하게 되어 구속방향은 수렴하기 어려워질 가능성이 있다. 접촉력의 변화로부터 추정한 구속방향을 수정하는 방법은 물체의 구속점 중심의 마찰이 항상 한계상태에 가깝게 변화하여 구속방향은 수렴하기 어려워질 가능성이 있다. 이러한 결점을 보완하기 위해서 위치 중심

과 힘 중심의 2종류의 알고리즘을 조합하여 미지 물체에서 힘의 구속방향을 더욱 정확하게 추정할 수 있는 유효하고 실용적인 알고리즘을 구성했다. Fig. 7은 실험의 모습이고, Fig. 8은 실험의 결과이다. 작업의 개시점에서 구속방향을 접촉법선으로 가정하여 접촉력을 변화시키고, 접촉력의 변화가 2.0 [gf] 이상이 되면 힘 중심의 알고리즘에 의해 접촉력을 추정한 구속방향으로 변화시키고, 접촉력의 변화가 15.0 [gf] 이 되면 위치 중심의 알고리즘에 의해 접촉력을 추정한 가동방향의 역방향으로 회전시킨다. 구속방향으로 8.00 [sec] 사이에 30.0 [gf]의 힘을 4회 증가 및 감소시킨 경우에 접촉력의 변화를 Fig. 8에 나타냈다. 접촉력이 0.00 [sec]에서 접촉법선인 구속방향으로 증가했고, 추정오차는 신속하게 없어졌다. 이 알고리즘은 구속점 중심의 마찰이 작은 경우에 힘의 구속방향을 대단히 정밀하고 빠르게 인식하고, 물체의 회전, 손가락과 물체의 변형, 미소한 미끄러짐 등에 의한 구속방향으로의 예측할 수 없는 접촉점의 변위에 효과적으로 대응하고, 3차원에서 물체의 구속상태를 추정하는 작업에 그대로 활용할 수 있다.

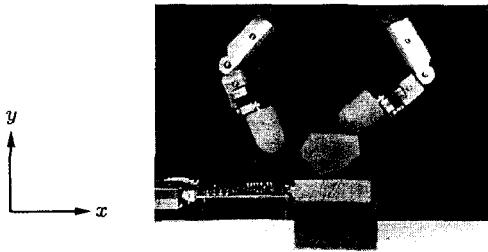


Fig. 7 Experiment of estimating the kinematic constraint

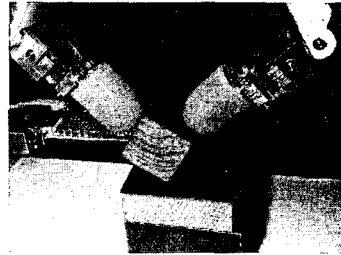


Fig. 9 Experiment of lifting off a finger

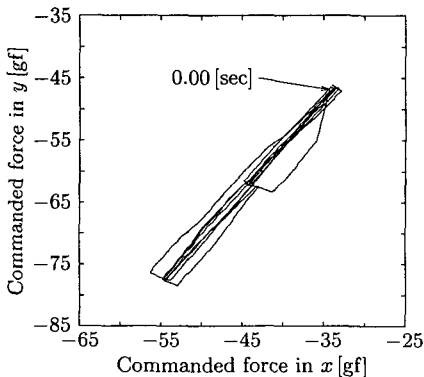


Fig. 8 Experimental result of estimating the kinematic constraint

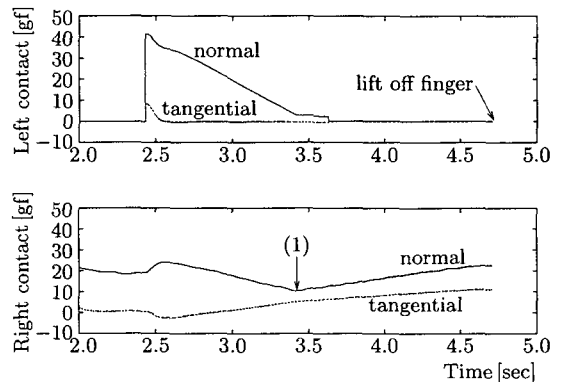


Fig. 10 Experimental result of lifting off the finger

물체의 구속상태를 유효하게 추정하는 복합적인 알고리즘을 이용하여, Fig. 9와 같이 물체에서 손가락을 안정하게 떼는 동작을 실현했다. 정육면체의 정보는 사전에 주어지지 않고, 왼손가락을 떼는 것을 한다. 마찰계수의 추정치를 0.5으로 하고, 이 동작을 성공한 경우에 접촉력의 변화를 Fig. 10에 나타냈다. 왼손가락에서 접촉력의 접선성분을 영으로 만드는 제어를 행하고, 오른손가락에서 접촉력의 접선성분과 법선성분의 비를 항상 계산하면서 마찰계수의 추정치와 비교함으로써 접촉상태의 안정성을 판단했다. 오른손가락의 마찰상태가 안정한 경우에는 왼손가락의 접촉력을 일정한 속도로 감소시키고, 오른손가락의 마찰상태가 불안정한 경우(Fig. 10 (1))에는 오른손가락에서 구속방향의 접촉력을 일정한 속도로 증가시켰다.

5.3 물체를 바닥면에 놓히는 동작

Fig. 11과 같이 물체와 바닥면이 면접촉을 하게 되면 손가락의 말단 관절에 작용하는 회전모멘트의 크기가 순간적으로 작아지고, 바닥면과 면접촉한 물체를 계속해서 누르면 모멘트의

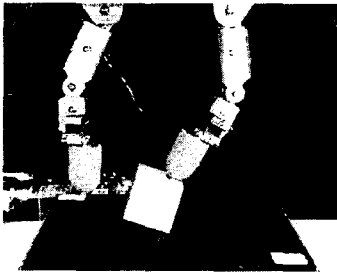


Fig. 11 Experiment of laying an object

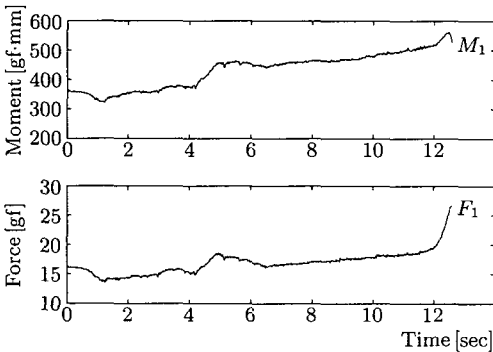


Fig. 12 Experimental result of laying the object

크기가 커지면서 작용방향도 바뀌게 된다. 물체를 바닥면에 놓히는 동작(Fig. 1 (e))은 이 현상을 이용하여, Fig. 12와 같이 손가락 말단의 힘센서에서 회전 모멘트의 변화를 검출함으로써 물체와 바닥면이 면접촉하는 순간을 판단하고 물체를 놓히는 작업을 멈출 수 있었다.

6. 응용동작의 실현

물체의 파지 및 조작에 관한 역학적 해석^(20, 21)으로 접촉점에서 물체에 가해지는 접촉력이 구해진다. 하지만 해석의 결과를 목표치로 하여 힘 제어를 행하는 것만으로는 계획단계와 실행단계의 오차나 불확정성 때문에 안정한 상태를 유지하면서 물체를 조작하기가 대단히 힘들다. 따라서 본 논문에서는 위치 제어와 힘 제어를 함께 사용하는 제어방법을 채용한다.⁽²⁵⁾

힘과 모멘트의 평형방정식에서 각 손가락의 접촉력을 유일하게 결정할 수 없기 때문에, 본 논문의 동작계획에서는 각 손가락의 법선력(N_i)의 합이 최소가 되도록

$$\sum N_i \rightarrow \text{minimum} \quad \text{where } N_i \geq N_{min}$$

와 같이 정한다.⁽²¹⁾ 그리고 동작계획에서 손가락과 물체가 최소한 접촉상태를 유지하고 접촉력이 영으로 되는 손가락이 존재하지 않도록 계획하고, 법선력의 최소치(N_{min})를 1.0~7.5 [gf]으로 하여 각 손가락의 접촉력을 구한다. 손가락 관절의 제어는 동작계획에서 구한 관절각을 목표치로 하여 위치제어를 행하면서 접촉력을 발생하기 위해 필요한 구동 토크를 피드포워드 제어로 더했다. 인간의 팔과 같은 신속하고 부드러운 동작을 실현하기 위해서 팔의 동적인 특성을 고려한 피드포워드 제어가 필요한 것과 일맥상통한다.⁽²⁶⁾ 관절에 구동 토크를 더하는 것

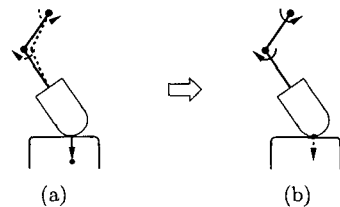


Fig. 13 Force control by moving the center of compliance

은 Fig. 13과 같이 위치제어의 목표치를 물체의 내부로 이동하는 것과 동일한 효과를 가진다. 이와 같은 제어방법을 적용한 경우에 계획 및 작용의 오차는 위치제어의 컴플라이언스에 흡수되고, 일반적으로 계획과 상이한 위치가 안정한 상태로 된다. 본 논문에서는 이와 같은 특성을 고려하여 동작계획에서 접촉력의 크기가 큰 손가락을 메인 손가락(main-finger)으로 하여 제어 강성을 높게 설정함으로써 위치제어의 주체가 되도록 한다. 그리고 다른 손가락을 서브 손가락(sub-finger)으로 하고 메인 손가락에 대해 물체를 밀착시킴으로써 힘 제어의 주체가 되도록 한다.

구체적으로 Fig. 14와 같이 동작계획의 단계에서 접촉력의 목표치(nominal value)는 최소 접촉력을 영으로 하여 구한 참고치(theoretical minimum)에 임의의 접촉력을 힘의 오프셋(force offset)으로 더한 값이다. 실제로 제어에 있어서는 접촉력의 목표치(nominal value)를 중심으로 허용가능한 범위(minimum value, maximum value)를 설정하고, 물체의 조작을 진행하면서 접촉력의 실제치(measured value)가 지정한 허용범위 내의 값이 되도록 조정한다. 접촉력이 지정한 허용범위를 벗어나지 않고 마찰의 안정성을 유지하면서 변화하면 문제가 되지 않는다. 그리고 메인 손가락은 서브 손가락보다 물체와의 접촉력이 크기 때문에 주된 역할을 하는 것이 된다.

여기서는 굴림 접촉으로 원통 및 직육면체의 물체를 굴리는 동작, 물체와의 미끄러짐 접촉을 동반하면서 원통 및 직육면체의 물체를 굴리는 동작, 바닥면과의 미끄러짐 접촉을 동반하면서 원통 및 직육면체의 물체를 굴리는 동작을 실행하도록 한다. 굴림 접촉으로 원통 물체를 굴리는 동작은 뒤에서 언급할 것과 같이 물체를 기

울이는 동작, 물체를 굴리는 동작, 물체에서 손가락을 떼는 동작 등의 요소동작으로 구성되고, 이 작업을 행하기 위해서 필요한 정보는 동작계획에서 구할 수 있지만, 안전한 접촉상태를 유지하면서 물체와 바닥면이 미끄러지지 않도록 관절각과 접촉력을 적절하게 제어하는 것은 간단한 문제가 아니다.⁽¹⁴⁾ 다른 동작도 같은 어려움을 가지고 있다. 그리고 Fig. 2는 응용실험의 실험순서를 나타낸다. 조작동작의 계획에서 마찰계수는 나무와 고무 사이의 값에 해당하는 0.5로 정한다.

6.1 굴림 접촉으로 원통 물체를 굴리는 동작

Fig. 15와 같이 지름이 40.0 [mm]인 원통의 물체를 Pure rolling 운동으로 2.0 [rad](114.6 [deg])만큼 회전하면서 왼쪽으로 이동시키는 운동을 생각한다. 조작하는 도중에 손가락과 물체, 물체와 바닥면은 미끄러짐이 없는 Pure rolling 운동을 한다. 왼 손가락으로 원통의 연직 상부를 누르면서 왼쪽으로 이동시키고, 원통이 34.4 [deg]만큼 회전하면 오른 손가락을 접촉하여 두 손가락으로 이동시키고, 80.2 [deg]만큼 회전하면 왼 손가락을 떼고, 114.6 [deg]만큼 회전할 때까지 한 손가락으로 이동시킨다. Fig. 16은 이 동작의 계획이고, 각 손가락의 관절각과 접촉력의 목표치를 나타낸다. 여기서 $q_1 = (q_{11}, q_{12}, q_{13})^T$ 과 F_1 은 오른 손가락의 관절각과 접촉력의 크기이고, $q_2 = (q_{21}, q_{22}, q_{23})^T$ 과 F_2 는 왼 손가락의 관절각과 접촉력의 크기이다. 접촉력의 최소치(F_{min})는 항상 5.0 [gf]이고, 물체의 무게는 52.4 [gf]이다.

이 응용동작은 물체를 기울이는 동작, 물체를 굴리는 동작, 물체에서 손가락을 떼는 동작 등의 요소동작으로 분해할 수 있다. Fig. 16 (b)에서 먼저 메인 손가락(main-finger)과 서브 손가락(sub-finger)을 결정한다. 원통이 34.4 [deg]만큼 회전할 때까지 왼 손가락을 메인 손가락으로 하고, 80.2 [deg]만큼 회전할 때까지 오른 손가락을 메인 손가락으로 하면서 왼 손가락을 서브 손가락으로 하고, 114.6 [deg]만큼 회전할 때까지 오른 손가락을 메인 손가락으로 한다. Fig. 17은 실험의 모습이고, Fig. 18은 실험의 결과이다. 작업의 개시점에서 손가락과 물체가 접촉하는 순간은 힘 센서와 촉각 센서의 출력으로 판단

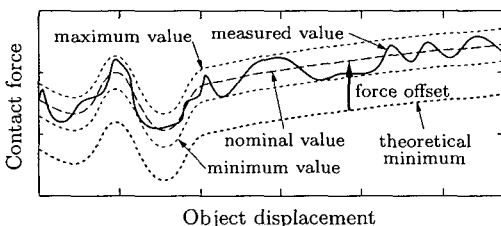


Fig. 14 Desired trajectory of the contact forces

했다. 조작하는 도중에 접촉력이 허용범위를 벗어나면 접촉력의 목표치(nominal value)와 측정치(measured value)의 차이를 계산한다. 그리고

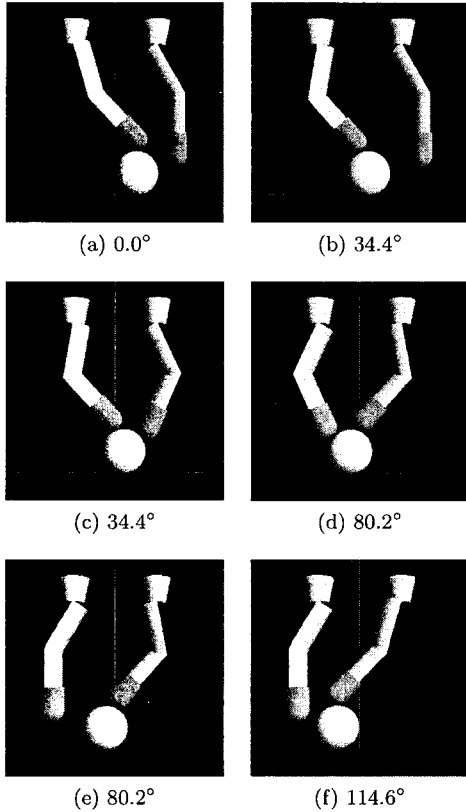


Fig. 15 Procedure of rolling a cylinder

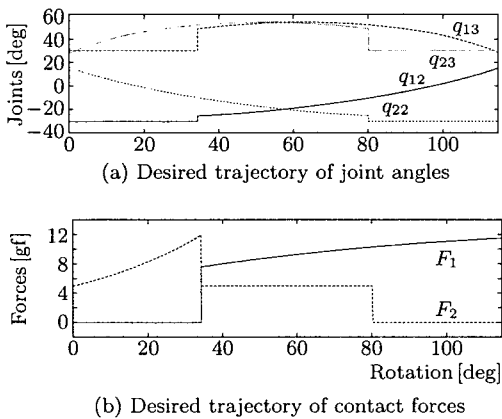


Fig. 16 Motion planning of rolling the cylinder

차이의 20.0%에 해당하는 말단의 힘을 증가적인 관절 토크로 변환하고, 구해진 토크를 손가락의 관절에 토크 오프셋(torque offset)으로 넣는다. 이와 같이 구동 토크의 오프셋을 변화시킴으로써 손가락의 말단에서 힘의 가감을 행하고 접촉력을 제어했다. 잡음이나 변형 등과 같은 힘 센서의 검출오차를 고려하여 접촉력의 수정률을 20.0%로 했고, 접촉점에서 접촉력의 접선성분과 법선성분을 구하여 마찰의 안정성을 판단하면서 힘의 증감을 행했다. Fig. 18 (a)(b)의 점선이 관절각의 목표치, 실선이 관절각의 실제치이고, Fig. 18 (c)(d)의 점선이 접촉력의 최대허용치, 목표치, 최소허용치, 실선이 접촉력의 실제치이다. 힘의 허용폭은 항상 5.0 [gf]이고, 최대허용치가 목표치보다 2.5 [gf] 만큼 크며 최소허용치가 2.5 [gf] 만큼 작다. 그리고 Fig. 18의 수평축은 실행 시간이 아니라 샘플링 시간이다. 물체에서 손가락을 떼는 동작과 같이 계획과 제어의 결과를 비교하지 않는 요소동작은 결과의 샘플링을 하지 않는 것으로 했다. Fig. 18 (d)의 7.0 초 전후와 같이 정지상태에서 운동을 다시 시작하면 안정한 접촉상태가 될 때까지 약간의 시간이 걸리며 불안정한 상태가 나타난다. 조작하는 도중에 미끄러짐이 발생하지 않도록 동작의 계획을 세우지만, 미끄러짐이 발생하면 계획을 유연하게 다시 수정해야 한다.

본 논문의 실험에서 동작의 제어에 필요한 관절각의 회전속도, 힘의 허용폭, 접촉력의 수정

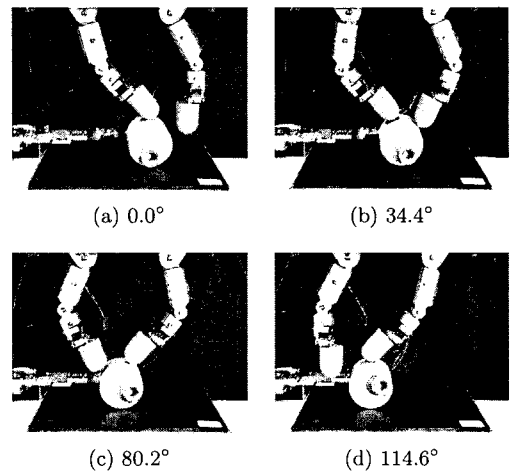


Fig. 17 Experiment of rolling the cylinder

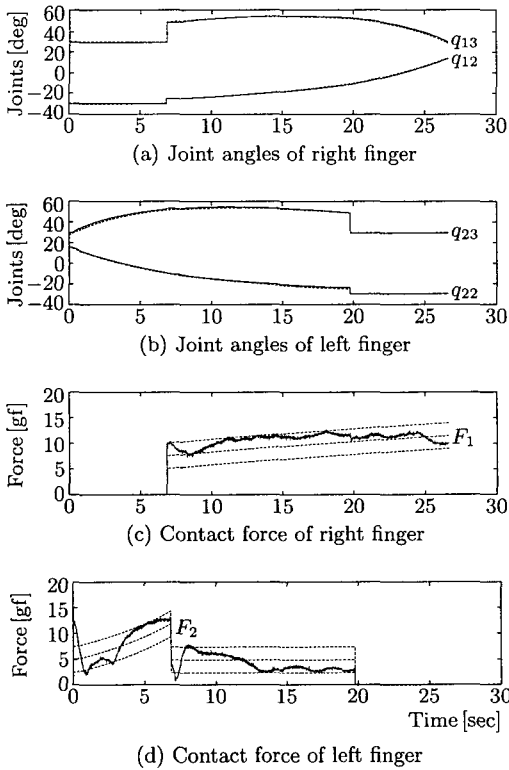


Fig. 18 Experimental result of rolling the cylinder

를 등의 파라미터는 시스템의 성능에 의존하므로 실험을 통해 사전에 적절한 값을 구했다. 원래는 이론적인 근거가 필요한 부분이지만, 파라미터의 결정에 필요한 적절한 평가함수를 발견할 수 없었다.

직육면체의 물체를 좌측하단의 모서리를 중심으로 하여 Pure rolling 운동으로 왼쪽으로 회전시키는 운동(직육면체 물체를 굴리는 동작)은 위에서 언급한 동작에 물체를 바닥면에 놓히는 동작을 포함하면 된다. 놓히는 동작을 실현하기 위해서 힘 센서의 회전 모멘트로부터 물체가 바닥면에 닿는 순간을 판단하여 목표로 하는 물체의 운동을 실현할 수 있었다.

6.2 물체와의 미끄러짐 접촉을 동반하면서 직육면체 물체를 굴리는 동작

Fig. 19와 같이 모서리가 30.0[mm]인 정육면체의 물체를 Pure rolling 운동과 Slide rolling 운

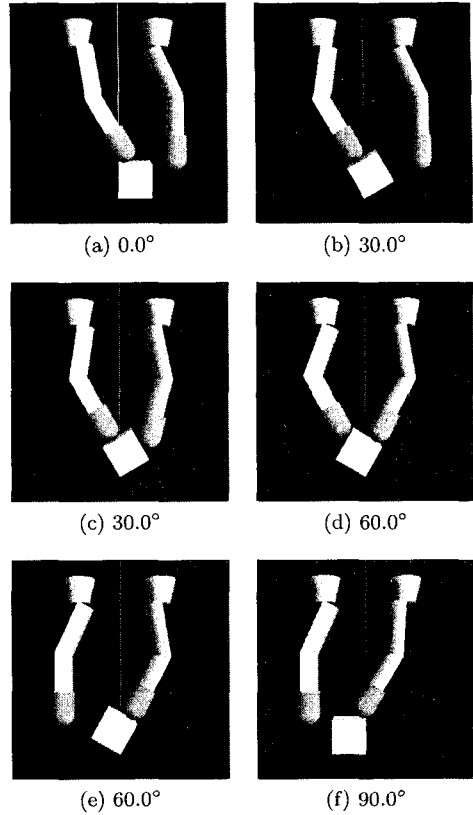


Fig. 19 Procedure of rolling a block with partial sliding

동으로 90.0[deg] 만큼 왼쪽으로 회전시키는 운동을 생각한다. 조작하는 도중에 손가락과 물체는 미끄러짐이 없는 Pure rolling 운동과 미끄러짐이 있는 Slide rolling 운동을 하고, 물체와 바닥면은 Pure rolling 운동을 한다. 왼 손가락으로 정육면체의 윗면을 누르면서 왼쪽으로 회전시키고, 정육면체가 30.0[deg] 만큼 회전하면 오른 손가락을 접촉하여 두 손가락으로 회전시키고, 60.0[deg] 만큼 회전하면 왼 손가락을 떼고, 90.0[deg] 만큼 회전할 때까지 한 손가락으로 회전시킨다. Fig. 20은 이 동작의 계획이고, 각 손가락의 관절각과 접촉력의 목표치를 나타낸다. 여기서 접촉력의 최소치는 손가락과 물체가 Pure rolling 운동을 하는 경우에 5.0[gf], Slide rolling 운동을 하는 경우에 2.5[gf]이고, 물체의 무게는 13.4[gf]이다.

이 응용동작은 물체를 기울이는 동작, 물체를 굴리는 동작, 물체에서 손가락을 떼는 동작, 물

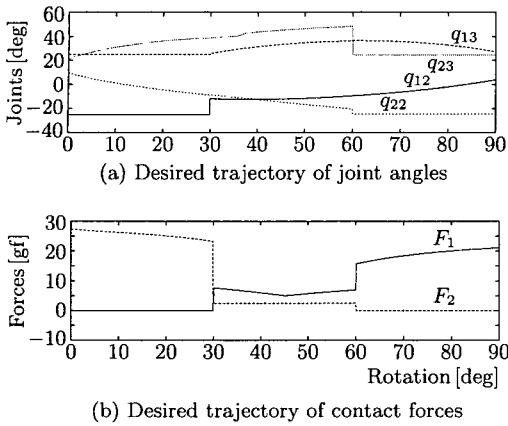


Fig. 20 Motion planning of rolling the block with partial sliding

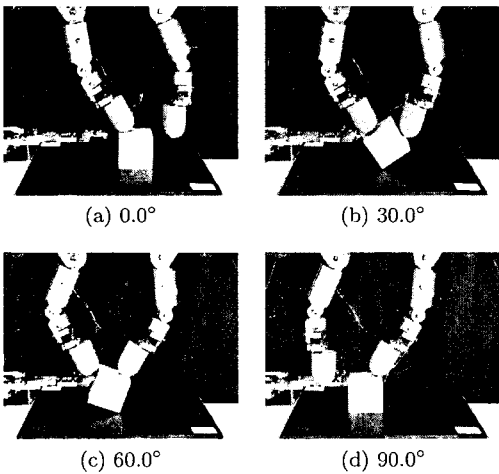


Fig. 21 Experiment of rolling the block with partial sliding

체를 바닥면에 놓히는 동작, 물체의 표면을 따라가는 동작 등의 요소동작으로 분해할 수 있다. Fig. 20 (b)에서 먼저 메인 손가락과 서브 손가락을 결정한다. Fig. 21은 실험의 모습이고, Fig. 22는 실험의 결과이다. 작업의 개시점에서 왼손가락의 접촉력을 목표치의 75.0%에 해당하는 값에서 조작을 시작하고, 미끄러짐이 발생하면 접촉력의 목표치를 2.5 [gf] 만큼 증가시켰다. 이 작업을 반복함으로써 미끄러짐이 발생하지 않는 접촉력을 결정했다. 조작하는 도중에 접촉력의 목표치와 측정치를 비교하면서 접촉력이 지정

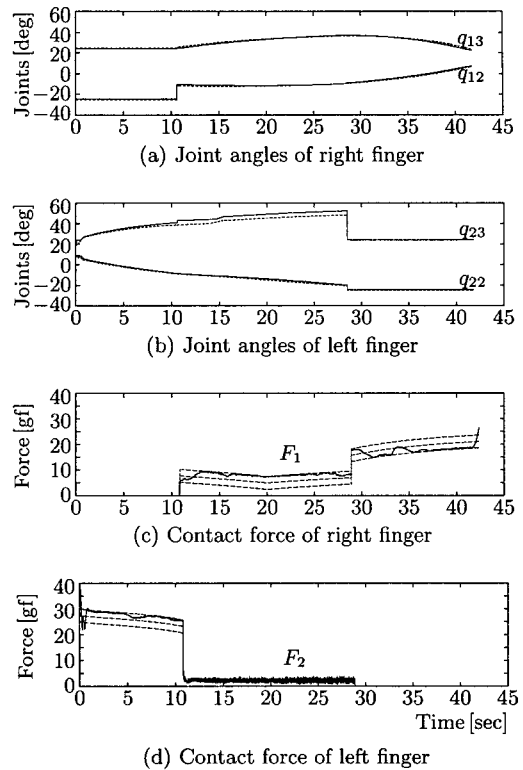


Fig. 22 Experimental result of rolling the block with partial sliding

한 허용범위를 벗어나지 않도록 앞에서 언급한 방법으로 제어했다. 힘의 허용폭은 손가락과 물체가 Pure rolling 운동을 하는 경우에 5.0 [gf]이고, Slide rolling 운동을 하는 경우에 1.0 [gf]이다. Fig. 22 (d)에서 0.0 [sec]부터 2.0 [sec]까지 미끄러짐을 검출하면서 접촉력을 증가하는 작업이 보인다. 물체의 표면을 따라가는 동작을 실현하기 위해서 힘 센서의 출력을 로패스 필터(low-pass filter)로 처리하지 않고 이동평균(moving average)을 사용함으로써 왼손가락에서 힘 센서의 응답속도를 높였다. 물체의 구속상태를 추정하기 위해서 물체를 조금 움직였기 때문에 관절각의 목표치와 실제치가 조금 달랐고 지속적인 차이로 남았다.

원통의 물체를 Pure rolling 운동과 Slide rolling 운동으로 왼쪽으로 회전시키는 운동은 물체의 표면을 따라가는 동작을 실현하기 위해서 힘 센서의 응답속도를 높였고, 목표로 하는

물체의 운동을 실현할 수 있었다.

6.3 바닥면과의 미끄러짐 접촉을 동반하면서 원통 물체를 굴리는 동작

Fig. 23과 같이 지름이 40.0 [mm]인 원통의 물체를 Pure rolling 운동과 Slide rolling 운동으로 1.0 [rad] (57.3 [deg]) 만큼 회전하면서 왼쪽으로 이동시키고, 그리고 Slide rolling 운동으로 20.0 [mm] 만큼 왼쪽으로 이동시키는 운동을 생각한다. 조작하는 도중에 손가락과 물체는 미

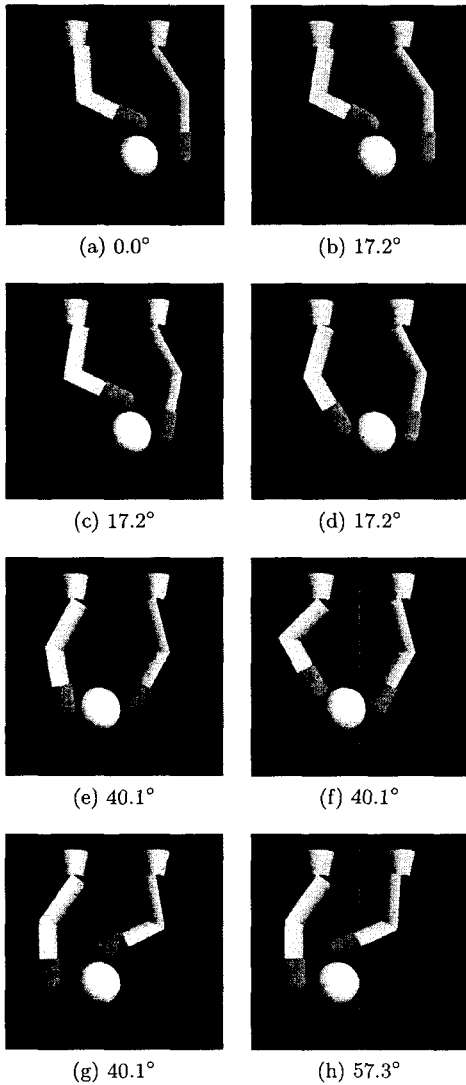


Fig. 23 Procedure of rolling and dragging a cylinder

끄러짐이 없는 Pure rolling 운동을 하고, 물체와 바닥면은 Pure rolling 운동과 미끄러짐이 있

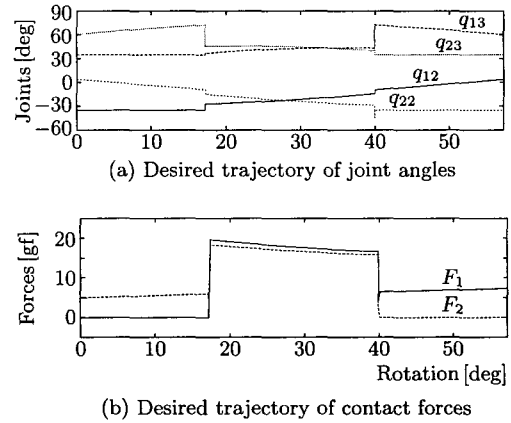


Fig. 24 Motion planning of rolling and dragging the cylinder

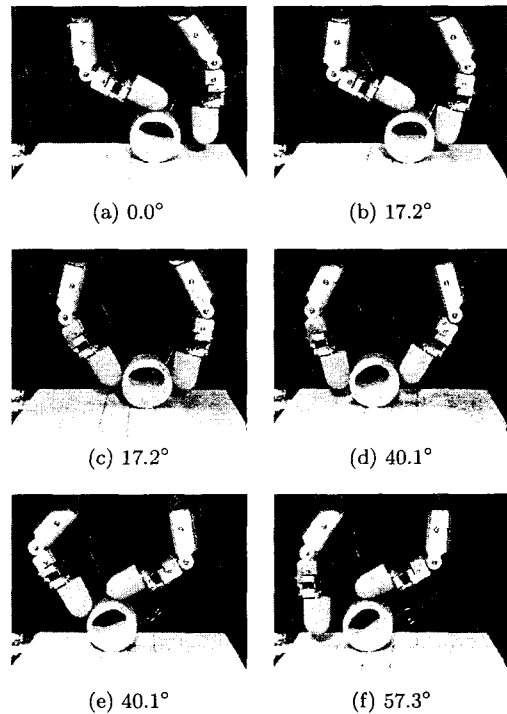


Fig. 25 Experiment of rolling and dragging the cylinder

는 Slide rolling 운동을 한다. 왼 손가락으로 원통의 연직 상부를 누르면서 왼쪽으로 이동시키고, 원통이 17.2 [deg] 만큼 회전하면 연속적인 재파지로 두 손가락을 물체의 양측에 접촉시키고, 40.1 [deg] 만큼 회전할 때까지 두 손가락으로 바닥면과 미끄러지면서 회전시키고, 40.1 [deg] 만큼 회전하면 연속적인 재파지로 왼 손가락을 떼고, 57.3 [deg] 만큼 회전할 때까지 한 손가락으로 이동시킨다. Fig. 24는 이 동작의 계획이고, 각 손가락의 관절각과 접촉력의 목표치를 나타낸다. 여기서 접촉력의 최소치는 물체와 바닥면이 Pure rolling 운동을 하는 경우에 5.0 [gf], Slide rolling 운동을 하는 경우에 2.5 [gf]이고, 물체의 무게는 12.5 [gf]이다.

이 응용동작은 물체를 기울이는 동작, 물체를 굴리는 동작, 물체에서 손가락을 떼는 동작, 물체를 끌면서 굴리는 동작 등의 요소동작으로 분

해할 수 있다. Fig. 24 (b)에서 먼저 메인 손가락과 서브 손가락을 결정한다. Fig. 25는 실험의 모습이고, Fig. 26은 실험의 결과이다. 두 손가락에 의한 작업으로의 전환은 재파지의 연속이고(Fig. 25 (b)(c)), 두 손가락으로 물체를 바닥면과 미끄러지면서 회전시키는 동작을 실현하기 위해 필요한 접촉력은 재파지에 필요한 힘보다 충분히 크다(Fig. 26 (c)(d)). 따라서 재파지를 하고나서 두 손가락에 의한 조작을 원활하고 안정하게 다시 시작하기 위해서는 재파지의 단계부터 접촉력을 조작에 필요한 값까지 물체를 움직이지 않으면서 증가시켜 둘 필요가 있다. 그리고 증가한 힘이 바닥면에 가해지면 조작하는 도중에 물체와 바닥면의 마찰이 커지고, 안정한 조작을 실현하지 못할 가능성이 있기 때문에 두 손가락과 물체에 한정되게 힘을 넣으면서 접촉력을 증가하지 않으면 안된다. 이것은 물체를 움직이지 않으면서 가볍게 들어올리는 작업에 해당된다. Fig. 26 (c)(d)의 점선에서 두 손가락에 의한 조작의 개시점에서 접촉력의 목표치가 가장 크기 때문에 이 값을 재파지의 목표치로 정했다. 접촉력이 지정치보다 커질 때까지 힘 센서의 출력과 관절각의 변화에서 마찰의 안정성과 물체의 움직임을 감시하면서 접촉력의 접선 성분이 반드시 물체를 들어올리는 방향으로 작용하도록 제어하여 접촉력을 증가시켰다. 두 손가락으로 끌면서 굴리는 동작은 관절 토크에 오프셋을 넣은 상태에서 관절각의 위치제어로 행했다. 힘의 허용폭은 항상 5.0 [gf]이다. 두 손가락으로 끌면서 굴리는 동작은 관절각의 위치제어로 행했지만, 물체를 가볍게 들어올리는 작업을 행하는 동안에 손가락의 말단이 변형하고 물체가 조금 움직였기 때문에 실제의 관절각(q_{13} , q_{23})이 목표치와 조금 달랐다. 접촉력은 왼 손가락에서 허용범위를 조금 벗어났지만 전체적으로 안정한 평형상태를 유지했다. 물체가 바닥면과 매끄럽게 미끄러졌기 때문에 접촉력도 부드럽게 변화했다.

직육면체의 물체를 좌측하단의 모서리를 중심으로 Pure rolling 운동과 Slide rolling 운동으로 왼쪽으로 회전시키고, 그리고 Slide rolling 운동으로 왼쪽으로 이동시키는 운동은 위에서 언급한 동작에 물체를 바닥면에 놓히는 동작을 포함하면 되고, 목표로 하는 물체의 운동을 실현할 수 있었다.

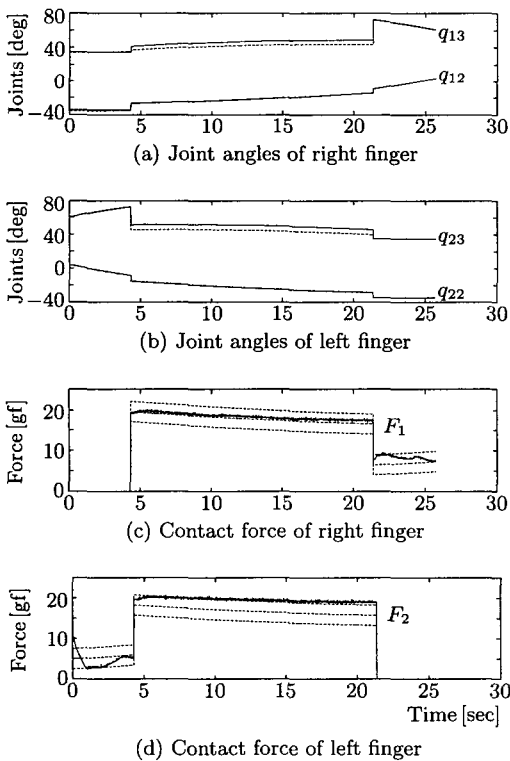


Fig. 26 Experimental result of rolling and dragging the cylinder

7. 결 론

본 논문은 오차나 불확정적인 요인이 존재하는 실제 환경에서 원하는 물체의 운동을 실현하는 것을 목표로 한다. 두 손가락의 로봇 손으로 평평한 바닥면 위에 놓인 물체를 수직평면 내에서 조작하는 작업의 실현에 필요한 요소동작을 분류하고, 실험으로 요소동작의 구체적인 실현 방법을 제시했다. 운동학 및 역학적인 모델에 근거하여 세운 동작계획을 센서의 정보와 직접적으로 연결된 요소동작으로 분해하고, 센서의 정보와 동작계획의 정보를 비교하면서 오차나 불확정성을 포함한 부분적인 정보에서 적절한 행동을 선택했다. 그리고 오차나 불확정성을 행동하면서 효과적으로 보상하고, 요소동작의 제어를 통해서 목표로 하는 조작의 전체적인 운동을 실현하는 방법을 제안했다.

물체를 기울이는 동작은 PVDF를 사용한 촉각 센서로 미끄러짐을 검출하고, 힘을 조금씩 증가하면서 마찰에 의해 미끄러짐이 발생하지 않는 적절한 접촉력을 정했다. 물체의 구속상태를 추정하는 동작은 힘 센서와 관절각의 정보를 효과적으로 이용함으로써 정확하게 검출하는 4종류의 알고리즘을 제안했다. 그리고 물체의 구속상태를 인식하고 접촉력을 구속방향으로 변화시키는 유효한 알고리즘을 2종류의 알고리즘을 조합하여 구성했다. 접촉력을 재조정하는 동작은 물체와 바닥면의 접촉점, 물체의 무게 중심과 구속상태 등을 사전에 몰라도 적절하게 힘을 조정할 수 있다는 것을 보였다. 그리고 형상, 무게 중심 등을 모르는 미지 물체에 대해서 손가락을 안정하게 떼는 동작이 가능하다는 것을 보였다. 물체를 바닥면에 누히는 동작은 손가락 말단의 힘 센서에 의해 검출되는 회전 모멘트의 변화로부터 물체가 바닥면과 면접촉하는 순간을 판단하고, 물체를 회전하는 작업을 멈출 수 있었다. 그리고 응용동작의 예로서는 굴림 접촉으로 원통과 직육면체를 굴리는 동작, 물체와 미끄러짐 접촉을 동반하면서 원통과 직육면체를 굴리는 동작, 바닥면과 미끄러짐 접촉을 동반하면서 원통과 직육면체를 굴리는 동작을 행하고, 요소동작을 조합함으로써 복잡한 작업을 실현할 수 있다는 것을 실험적으로 보였다.

물체를 조작하는 도중에 운동의 상태를 힘 센서와 촉각 센서로 검출했지만, 물체의 위치 및

방향과 같은 정보를 시각 센서로 검출하면 예측할 수 없는 물체의 움직임에 대응할 수 있으며, 더욱 정확한 조작을 실행할 수 있다.

참고문헌

- (1) Dixon, W.E., Walker, I.D., Dawson, D.M. and Hartranft, J.P., 2000, "Fault Detection for Robot Manipulators with Parametric Uncertainty: A Prediction-error-based Approach," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 16, No. 6, pp. 689~699.
- (2) Hor, M.-K. and Wu, S.-C., 1999, "On the Grasping Stability and Optimality under External Perturbations," *J. Robotic Systems*, Vol. 16, No. 9, pp. 509~526.
- (3) Jung, S., Hsia, T.C. and Bonitz, R.G., 2001, "Force Tracking Impedance Control for Robot Manipulators with an Unknown Environment: Theory, Simulation, and Experiment," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 20, No. 9, pp. 765~774.
- (4) Haidacher, S. and Hirzinger, G., 2003, "Estimating Finger Contact Location and Object Pose from Contact Measurements in 3-D Grasping," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robot. and Syst.*, pp. 1805~1810.
- (5) Speeter, T.H., 1990, "Control of the Utah/MIT Dextrous Hand: Hardware and Software Hierarchy," *J. Robotic Systems*, Vol. 7, No. 5, pp. 759~790.
- (6) Michelman, P., 1998, "Precision Object Manipulation with a Multifingered Robot Hand," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 14, No. 1, pp. 105~113.
- (7) Borst, C., Fischer, M., Haidacher, S., Liu, H. and Hirzinger, G., 2003, "DLR Hand II: Experiments and Experiences with an Anthropomorphic Hand," *Proc. of IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, pp. 702~707.
- (8) Namiki, A., Imai, Y., Ishikawa, M. and Kaneko, M., 2003, "Development of a High-speed Multifingered Hand System and Its Application to Catching," *Proc. of IEEE/RSJ*

- Int. Conf. Intelligent Robot. and Syst.*, pp. 2666~2671.
- (9) Ji, X. and Xiao, J., 2001, "Planning Motions Compliant to Complex Contact States," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 20, No. 6, pp. 446~465.
- (10) Rus, D., 1999, "In-hand Dexterous Manipulation of Piecewise-smooth 3-D Objects," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 18, No. 4, pp. 355~381.
- (11) Nguyen, P.T.A. and Arimoto, S., 2002, "Dexterous Manipulation of an Object by Means of Multi-DOF Robotic Fingers with Soft Tips," *J. Robotic Systems*, Vol. 19, No. 7, pp. 349~362.
- (12) Harada, K., Kaneko, M. and Tsuji, T., 2000, "Rolling-based Manipulation for Multiple Objects," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 16, No. 5, pp. 457~468. *Proc. of IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, pp. 2255~2261.
- (13) Sudsang, A. and Phoka, T., 2003, "Regrasp Planning for a 4-fingered Hand Manipulating a Polygon," *Proc. of IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, pp. 2671~2676.
- (14) Hwang, C.-S. and Sasaki, K., 2003, "Control Program of Two-fingered Dexterous Manipulation with Primitive Motions," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robot. and Syst.*, pp. 2902~2907.
- (15) Diftler, M.A. and Walker, I.D., 1999, "Experiments in Aligning Threaded Parts Using a Robot Hand," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 15, No. 5, pp. 858~868.
- (16) Charlebois, M., Gupta, K. and Payandeh, S., 2000, "On Estimating Local Shape Using Contact Sensing," *J. Robotic Systems*, Vol. 17, No. 12, pp. 643~658.
- (17) Hwang, C.-S., 2005, "Kinematics of Grasping and Manipulation of Curved Surface Object with Robotic Hand," *Trans. Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 29, No. 1, pp. 1~13.
- (18) Nagashima, T., Seki, H. and Takano, M., 1997, "Analysis and Simulation of Grasping/manipulation by Multi-fingersurface," *Mech. Mach. Theory*, Vol. 32, No. 2, pp. 175~191.
- (19) Xydas, N. and Kao, I., 1999, "Modeling of Contact Mechanics and Friction Limit Surfaces for Soft Fingers in Robotics, with Experimental Results," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 18, No. 8, pp. 941~950.
- (20) Takao, H., Seki, H., Takano, M. and Sasaki, K., 1995, "Analysis and Simulation of Grasping/manipulation Dynamics by Multi-finger Surfaces," *Proc. of 9th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*, pp. 2272~2276.
- (21) Liu, Y.-H., "Qualitative Test and Force Optimization of 3-D Frictional Form-Closure Grasps Using Linear Programming," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 15, No. 1, pp. 163~173.
- (22) Bicchi, A., 1990, "Intrinsic Contact Sensing for Soft Fingers," *Proc. of IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, pp. 968~973.
- (23) Hwang, C.-S., 2005, "Evaluation and Design for Joint Configurations Based on Kinematic Analysis," *Trans. Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 29, No. 2, pp. 176~187.
- (24) Sasaki, K., Hirota, T., Fujikake, Y. and Nakaki, H., 2001, "Signal Processing for Slip and Contact Sensing and Its Application to a Two-fingered Robotic Hand," *Integrated Computer-aided Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 283~291.
- (25) Doulgeri, Z. and Arimoto, S., 2002, "A Position/force Control for a Robot Finger with Soft Tip and Uncertain Kinematics," *J. Robotic Systems*, Vol. 19, No. 3, pp. 115~131.
- (26) Gomi, H. and Kawato, M., 1996, "Equilibrium-point Control Hypothesis Examined by Measured Arm Stiffness during Multijoint Movement," *Science*, Vol. 272, pp. 117~120.