

< 논문 >

미지 물체의 구속상태에 관한 실시간 추정방법

황 창 순*

(2004년 4월 21일 접수, 2004년 8월 3일 심사완료)

Estimation Method for Kinematic Constraint of Unknown Object by Active Sensing

Chang-Soon Hwang

Key Words: Robotic Hand(로봇 손), Regrasping(재파지), Control Method(제어방법), Kinematic Constraint(구속상태), Active Sensing(실시간 능동검출)

Abstract

Control of a multi-fingered robotic hand is usually based on the theoretical analysis for kinematics and dynamics of fingers and of object. However, the implementation of such analyses to robotic hands is difficult because of errors and uncertainties in the real situations. This article presents the control method for estimating the kinematic constraint of an unknown object by active sensing. The experimental system has a two-fingered robotic hand suspended vertically for manipulation in the vertical plane. The fingers with three degrees-of-freedom are driven by wires directly connected to voice-coil motors without reduction gears. The fingers are equipped with three-axis force sensors and with dynamic tactile sensors that detect slippage between the fingertip surfaces and the object. In order to make an accurate estimation for the kinematic constraint of the unknown object, i.e. the constraint direction and the constraint center, four kinds of the active sensing and feedback control algorithm were developed: two position-based algorithms and two force-based algorithms. Furthermore, the compound and effective algorithm was also developed by combining two algorithms. Force sensors are mainly used to adapt errors and uncertainties encountered during the constraint estimation. Several experimental results involving the motion of lifting a finger off an unknown object are presented.

1. 서 론

다지의 로봇 손에 관한 연구가 활발히 진행되고 있지만, 인간의 손과 같이 다양하고 복잡한 작업이 가능한 범용적인 로봇 손은 아직 실현되지 않고 있다.^(1~4) 이와 같은 로봇 손을 실현하기 위한 연구 중에서도 물체의 파지 및 조작에 관한 연구가 대단히 중요하며, 지금까지 수많은 연구가 이루어졌고, 파지 및 조작에 관한 운동학 및 역학의 문제와 기본적인 해법은 거의 해

명되었다.^(5~10) 로봇 손에 관한 종래의 제어는 로봇 손과 대상물체의 운동학 및 역학적 모델에서 수립된 동작계획을 실행하는 방법으로 한다. 기지의 정보에 근거한 제어방법은 로봇 손과 물체에 관해서 많은 정보를 필요로 할 뿐만 아니라, 실제 환경에서 정보 및 작용의 오차(error)나 불확정성(uncertainty) 등에 민감하고, 미지 환경에서 정보의 부족에 대처하기 어려우며, 이로 인해 동작계획의 실현이 용이하지 않다는 문제점을 가지고 있다. 여기서 오차는 로봇 손과 물체의 형상, 크기, 위치, 방향 등과 같이 실제값을 정확하게 얻을 수 없는 것(추정오차, 측정오차), 그리고 로봇 손과 물체의 행동과

* 회원, 한국과학기술연구원 지능로봇연구센터

E-mail : cshwang@kist.re.kr

TEL : (02)958-6812 FAX : (02)958-5629

같이 정확하게 제어할 수 없는 것(실행오차)을 의미한다. 로봇 손과 물체 사이의 접촉점 위치와 같이 센서로 직접 측정할 수 있는 정보에서의 오차, 로봇 손으로부터 물체에 가해지는 힘과 같이 액추에이터(actuator)로 직접 제어할 수 있는 작용에서의 오차 등이 문제가 된다. 불확정성은 마찰계수, 환경과 물체 사이의 접촉점, 환경으로부터 물체에 가해지는 힘 등과 같이 직접적으로 검출(sensing)할 수 없기 때문에 결정할 수 없는 것을 의미한다. 로봇 손으로 물체에 힘을 가했을 때, 물체가 어떻게 반응할 것인가 등이 문제가 된다. 그러므로 로봇 손에서 정보 및 작용의 오차와 불확정성은 피할 수 없는 문제이고, 사전에 알지 못하는 정보나 불확정성을 포함한 정보의 대처방법은 중요한 연구과제로 되고 있으며,⁽¹¹⁾ 본 논문에서 오차와 불확정성을 포함한 문제를 다루도록 한다. 실제 환경에서 물체의 파지 및 조작 운동을 실현하기 위해서는 이상적인 상황의 동작계획에만 의존하지 않고, 실시간적인 센서의 정보를 적극적으로 유효하게 이용함으로써 실제 환경에 유연하게 대응하고, 정보의 오차나 불확정성을 행동하면서 극복할 필요가 있다.^(12~14) 따라서 필요한 정보의 획득에 적합한 로봇 손용 센서와 획득한 정보를 유효하게 이용하는 제어방법을 개발하여 센서의 정보를 적극적으로 이용하면, 대상물체에 관한 부족한 정보와 오차나 불확정성을 포함한 정보라도 뛰어난 적응성의 제어가 가능하게 된다.

로봇 손가락이 특이자세 등의 이유로 조작능력의 한계에 도달한 경우, 물체를 재파지(regrasping)함으로써 새로운 손가락 자세에서 조작을 재개하면 물체의 운동에 더욱 대응할 수 있고 로봇 손의 동작공간(manipulation

workspace)도 넓어진다.^(15, 16) 재파지 동작의 전후에서 손가락의 자세가 주어질 경우, 재파지에 필요한 접촉력은 동작계획에서 역학적 조건을 만족하는 목표치가 구해지지만, 물체에서 손가락을 어떻게 떼어서 안정하게 재파지할 것인가에 대해서는 아무 것도 알 수가 없다. 물체의 재파지는 언제나 물체에 가해지는 접촉력의 재조정을 동반하고, 물체의 안정한 상태를 유지하면서 접촉력을 재조정하는 것은 간단한 문제가 아니며, 예를 들면 역학적 모델에서 손가락과 물체의 접촉점 위치에 관한 사소한 오차라도 조작의 실패로 귀결될 수 있다. 물체에 가해지는 접촉력을 안정하게 재조정하는 문제에서는 주어진 상황에서 물체의 구속상태를 정확하게 추정할 수 있는가 하는 것이 요점으로 된다.^(17~19) 그리고 형상, 크기, 무게, 무게 중심 등의 정보가 사전에 주어지지 않은 미지 물체(unknown object)에서 구속상태를 정확하게 추정하는 것은 지극히 어렵다.

본 논문에서는 다양하고 복잡한 조작에 필요한 미지 물체의 구속상태를 액티브 센싱(active sensing)으로 정확하게 추정할 수 있는 4종류의 알고리즘에 대해 고찰하고, 접촉력을 안정하게 재조정하기 위한 유효한 제어방법을 구축하고, 미지 물체에서 손가락을 안정하게 떼는 작업에 응용하도록 한다. 물체의 다양한 조작을 위한 동작의 계획과 실현을 다룬 저자의 학술대회 논문⁽²⁰⁾이 있지만, 본 논문에서는 미지 물체의 구속상태를 추정하는 방법에 관해 상세하게 다루어 다시 투고하도록 한다.

2. 물체의 조작에서 고려해야 하는 문제

로봇 손으로 물체를 조작하는 경우, 물체를 최대한 정확하게 목표점으로 이동해야 한다. Fig. 1과 같이 미지 물체의 조작은 손가락의 작용에 의한 물체의 반응을 예측할 수 없기 때문에 목표로 하는 운동을 실현하는 것이 대단히 어렵다. 인간의 행동이 미지 물체의 반응에 대처할 수 있는 이유로는 조작하는 도중에 운동의 안정성을 실시간으로 판별할 수 있고, 안정한 상태의 유지에 필요한 접촉력의 변화를 촉각 정보에서 얻을 수 있고, 불안정한 상태를 해소하기 위한 회복 동작을 즉시 실행할 수 있기 때문이다. 실제 환경에는 미지이고 불확정적인 요인이 다

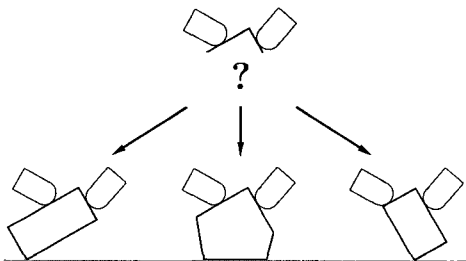


Fig. 1 Manipulation of unknown object

수 존재하므로, 미지 물체에서 목표로 하는 운동을 로봇 손으로 실현하기 위해서는 조작하는 도중에 물체의 구속상태를 정확하게 추정할 필요가 있다. 그리고 환경의 명확한 모델이나 지식에 근거한 동작계획을 수립하지 않고, 실제 환경과 직접적인 상호작용을 반복하면서 작업의 목표를 달성하지 않으면 안된다.

로봇 손에 의한 물체의 조작은 작업의 안정성, 범용성, 적응성을 향상시켜야 한다. 따라서 다른 동작에 응용할 수 있는 일반적인 문제를 포함한 작업을 연구대상으로 선택할 필요가 있고, 본 논문에서는 두 손가락의 로봇 손으로 평평한 책상 위에 놓인 물체를 조작하는 작업에 대해 고찰하기로 한다. 이 작업은 오차와 불확정성을 포함한 것으로서 환경(책상)과의 접촉문제를 포함하며, 환경과 물체의 접촉점 위치에 관한 불확정성, 환경으로부터 물체에 가해지는 힘에 관한 불확정성, 환경과 물체의 접촉상태에 관한 변화(미끄러짐) 등을 고려할 필요가 있다. 그리고 물체의 조작에 책상의 윗면을 이용함으로써 로봇 손의 자유도가 부족해도 다양한 작업이 가능하다. 환경과 물체의 접촉문제를 풀기 위해서 물체의 구속상태를 추정하지 않으면 안된다. 특히 물체에서 손가락을 떼는 동작의 실현에는 물체의 구속상태를 정확하게 추정할 필요가 있다. 여기서 물체의 구속상태에 관한 정보는 책상 윗면과 물체의 접촉점(구속점) 위치, 손가락과 물체의 접촉점에서 책상 윗면과 물체의 접촉점(구속점)까지의 방향(구속방향)으로 분류할 수 있다. 그리고 본 논문의 실험에서는 비전 센서에 의한 시각 정보를 사용하지 않고 있으므로, 사람이 눈을 감고 손가락의 촉각 정보만으로 물체의 구속상태를 더듬거리며 찾는 동작을 실현하는 것에 해당한다. 과지 동작의 경우에 센서를 사용하지 않고 오차나 불확정성을 자동적으로 수용할 수 있는 적응적인 기구(adaptive mechanism)를 채용한 연구가 많지만,^(21~23) 재과지 동작에 필수적인 구속상태의 추정은 인간이 촉각 정보를 사용하여 추정하는 것과 같이 적응적인 기구의 개발만으로 실현하기 힘들다고 생각된다. 물체의 조작에 비전 센서를 사용하면 정보의 부족을 어느 정도 극복할 수 있고, 인간이 시각과 촉각을 함께 사용하면 더욱 정밀하고 다양한 작업이 가능한 것과 같이 이질적인 정보 사이의 상승적인 상호보완성의 근거를 확보할 수 있다.

물체의 조작에는 정보의 오차나 불확정성이 운동하는 도중에 축적되어 확대되는 특징이 있다. 따라서 정보의 오차나 불확정성을 행동하면서 보상하지 않으면 처음에 주어진 높은 정밀도의 정보는 단시간에 정확도를 잃을 가능성이 있고, 이로 인해 운동 전체의 안정성도 유지할 수 없다. 그리고 기지의 모델에 근거한 동작계획은 실제 환경의 오차나 불확정성을 반영하지 않으며 추정오차, 측정오차, 실행오차 등에도 민감하기 때문에 물체의 조작을 사전에 계획한 대로 실행하는 것은 지극히 어렵다. 따라서 조작하는 도중에 센서의 정보를 적극적으로 이용하면서 동작계획과 실제상황을 비교하고, 오차나 불확정성을 포함한 정보나 부분적인 정보에서 적절한 행동을 결정하고, 오차나 불확정성을 행동하면서 보상할 수 있는 유연한 제어방법의 개발이 필요하다.

3. 실험장치

실험을 위해 일본의 도쿄대학(University of Tokyo)에서 제작된 로봇 손은 Fig. 2와 같이 와이어 구동의 두 손가락으로 이루어져 있고, 각 손가락은 3자유도의 구조이다. 센서는 Fig. 3과 같이 3축의 힘 센서, 압전 필름(PVDF: Polyvinylidene Fluoride)을 사용한 촉각 센서가 장착되어 있다. 와이어의 구동은 제어성과 응답성을 중시하여 보이시 코일 모터에 의한 다이렉트 구동을 채용했다. 동력전달기구를 포함한 구동방식과 자유도의 구성은 Stanford-JPL 로봇 손⁽²⁴⁾과 같으며, 각 손가락의 관절배치는 $P_y-P_x-P_x$ 이다.⁽²⁵⁾ 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 접착

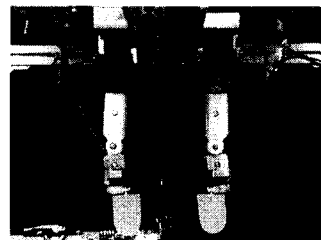


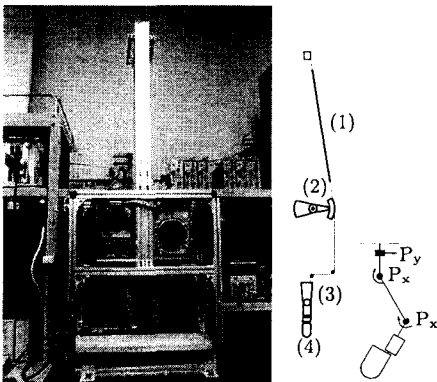
Fig. 2 Two-fingered robotic hand

제로 붙이고, 실리콘으로 채운 구조이다. 촉각 센서에 전달되는 진동을 신호처리하여 손가락과 물체의 미끄러짐을 검출한다.⁽²⁶⁾ 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.

4. 접촉력을 재조정하는 동작

4.1 작업 모델

이 동작의 간단한 예로서 Fig.4와 같이 수직 평면 내의 2차원, 2 손가락, 환경(책상)과 1점 접촉의 경우를 중심으로 동작의 제어에 필요한 정보와 문제점을 고찰한다. 대상물체는 책상 윗면,



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

Fig. 3 Experimental system

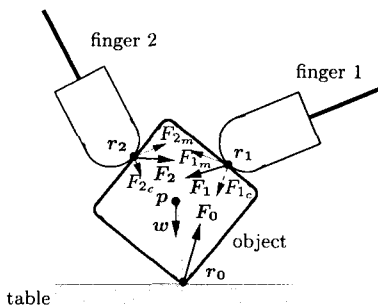


Fig. 4 Static equilibrium of object

제1, 2 손가락과 각각 접촉점 r_0, r_1, r_2 에서 구속을 받아서 책상 위에 정지하고 있다. 여기서 각 접촉점에서 접촉력을 F_0, F_1, F_2 , 접촉법선을 n_0, n_1, n_2 , 그리고 물체의 무게와 무게 중심을 각각 p, w 이라고 한다. 모든 벡터는 정지좌표계(global frame)를 기준으로 한다. 물체의 정지조건은 마찰의 안정조건을 만족하면서 각 접촉점에서 물체에 가해지는 힘과 모멘트의 평형상태를 유지하는 것이다. 여기서 2차원의 문제를 고찰하므로 미끄러짐에 의한 쿨롬 마찰만을 고려한다. 사전에 준비되는 정보는 p, w 이고, 센서에서 직접 측정되는 정보는 $r_1, r_2, n_1, n_2, F_1, F_2$ 이고, 미지이고 불확정적인 정보는 r_0, F_0 이다. 그리고 제어할 수 있는 정보는 F_1, F_2 뿐이다. 이 동작의 목표는 힘과 모멘트의 평형방정식과 각 접촉점에서 마찰의 안정조건을 만족하면서 손가락에 의해 물체에 가해지는 접촉력(F_1, F_2)을 변화시키는 것이다. 따라서 접촉력의 변화를 적절하게 결정하여 제어하는 피드백 알고리즘의 개발이 필요하다.

4.2 동작의 실현에 필요한 정보

구속점(r_0)은 물체의 운동을 구속하는 회전중심이다. 제 i 접촉점(r_i)에서 접촉력(F_i)은 구속방향의 성분(F_{ic})과 구속방향에 직교하는 가동방향의 성분(F_{im})으로 나뉜다 (Fig.4). 그리고 각 접촉력($F_i = F_i f_i$)은 크기(F_i)와 방향(f_i)으로 분해된다. r_i 에서 F_i 의 F_{im} 성분은 구름 마찰보다 미끄러짐 마찰이 훨씬 크기 때문에 r_i 에서의 미끄러짐으로 해소되기 보다는 r_0 에서의 굴림으로 해소된다. F_{ic} 성분은 물체의 표면에서 접선방향의 성분과 법선방향의 성분으로 나뉘며 미끄러짐의 발생은 두 성분의 비가 결정한다.

접촉력을 재조정하는 동작은 구속점이 기지인 경우와 미지인 경우로 나뉘서 생각할 수 있다. 구속점이 기지인 경우는 물체에 관한 힘과 모멘트의 평형방정식에서 접촉력의 변화량과 변화방향을 계산할 수 있다. 필요한 정보(구속점)가 주어져 있기 때문에 동작의 가능여부는 사전에 알 수 있다. 구속점이 미지인 경우는 구속점의 위치를 명시적으로 필요로 하지 않는 알고리즘을 개발해야 한다. 필요한 정보가 주어지지 않기 때문에 동작의 가능여부는 실행해 보지 않으면 모른다. 본 논문에서는 구속점이 미지인

경우를 대상으로 오른 손가락의 접촉력(F_1)을 증가하면서 왼 손가락의 접촉력(F_2)을 동시에 감소하는 간단한 문제에 대해 고찰하기로 한다.

이 동작을 안정하게 실현하기 위해서 물체의 구속상태를 알 필요가 있지만, 그 정보는 반드시 구속점의 위치로 표현될 필요는 없으며 힘의 구속방향이 더욱 필수적이다. 센서의 정밀도는 전기적인 노이즈나 기술적인 문제 등에 많은 영향을 받으므로 센서의 정보를 유효하게 이용하는 것은 쉽지 않다.

5. 물체의 구속상태를 추정하는 방법

5.1 액티브 센싱의 필요성

앞에서 언급한 것과 같이 미지 물체에서 접촉력을 안정하게 재조정하기 위해서는 접촉점에서 힘의 구속방향(구속력의 작용선)을 구해야 한다. 그러나 힘 센서의 정적인 정보만으로 구속방향을 정확하게 추정하는 것은 불가능하다. 그리고 외력 등의 미지 요인이 있으면 구속방향의 계산은 더욱 불가능하게 된다. 따라서 실제로 다양한 검출오차가 존재하는 힘 센서의 정보를 유효하게 이용하여 힘의 구속방향을 정확하게 추정하기 위해서는 필요한 정보를 능동적으로 획득하는 액티브 센싱의 방법을 사용해야만 하고, 물체를 조금 움직여서 그 반응을 보도록 한다. 액티브 센싱은 주어진 상황에 따라 사용하는 센서를 결정하고 대상물체에서 주목해야 하는 방향을 결정하는 센서 플래닝(sensor planning)의 개념도 포함한다. 힘 센서의 정밀도가 충분히 높으면 구속방향이 정확하게 구해지지만, 실제로 센서의 정밀도는 낮으며 손가락과 물체의 변형, 접촉점에서의 미소한 미끄러짐 등의 여러가지 오차요인이 겹쳐서, 센서 정보의 정밀도를 제어에 이용할 수 있을 정도로 높이는 것은 쉽지 않다. 센서 정보의 사용방법과 제어 알고리즘은 서로 밀접한 관계에 있으므로 센서의 특성에 근거하여 최적의 제어 알고리즘을 선택해야 한다.

5.2 구속상태의 추정 알고리즘

앞에서 언급한 것과 같이 본 논문에서 구현하고자 하는 동작은 사람이 눈을 감고 손가락의 촉각 정보만으로 물체의 구속상태를 더듬거리며 찾는 행동이다. 인간의 행동적인 관점과 체험적인 규칙에서 미지 물체의 구속상태를 정확하

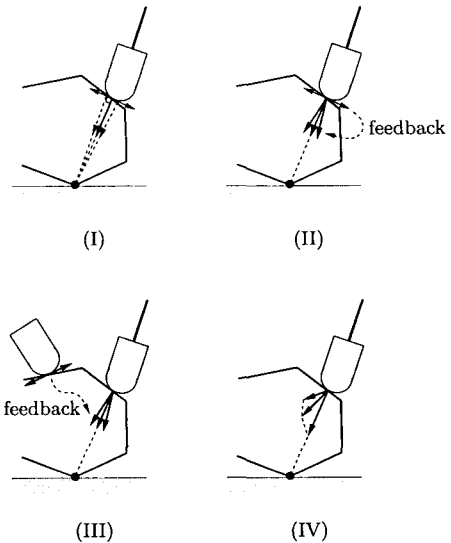


Fig. 5 Algorithms for estimating kinematic constraint

게 추정하는 방법을 분류하면 Fig. 5와 같이 접촉점의 미소변위로부터 추정하는 위치 중심의 방법(I, II)과 접촉력의 미소변화로부터 추정하는 힘 중심의 방법(III, IV)을 생각할 수 있다.

- (I) 관절각의 변화로부터 가동방향을 구하고, 가동방향과 직교하는 방향을 구속방향으로 인식하는 방법 (손가락이 움직이는 방향과 직교하는 방향으로 누르는 방법)
- (II) 추정한 구속방향으로 힘을 가하고, 관절각의 변화로부터 구속방향을 수정하는 방법 (손가락이 움직이지 않는 방향으로 누르는 방법)
- (III) 추정한 구속방향으로 힘을 가하고, 다른 손가락에서의 접촉력의 변화로부터 구속방향을 수정하는 방법 (다른 손가락에 힘이 전달되지 않는 방향으로 누르는 방법)
- (IV) 추정한 구속방향으로 힘을 가하고, 접촉력이 변화하는 방향을 구속방향으로 인식하는 방법 (손가락이 누를 수 있는 방향으로 누르는 방법)

위와 같은 알고리즘들은 기본적으로 물체가 구속점을 중심으로 자유롭게 회전할 수 있고, 물

체에 가한 힘이 책상 윗면에서의 반력과 평형상태를 유지하도록 변화한다는 생각에서 출발한 것이다. 힘과 운동의 상관관계에 대한 기하학적인 접근도 가능하지만, 사람이 어떻게 이 동작을 실현하고 있는가 하는 행동적인 관점과 체험적인 규칙에서 고찰했고, 인간의 행동은 4종류의 알고리즘으로 귀착할 수 있다. 그리고 본 논문에서 다루는 실험의 상황은 인간이 눈을 감고 구현할 수 있는 것보다 용이한 조건의 것으로 한다. 사람도 실현하기 힘든 동작을 감각 및 제어 기능이 사람의 손보다 훨씬 뒤떨어진 로봇 손으로 실행하는 것은 불가능하다.

5.2.1 알고리즘 (I)

알고리즘 (I)은 미지 물체의 구속점 중심의 회전운동을 이용하는 방법으로서, 접촉점의 변위는 구속방향과 직교하는 가동방향으로만 발생한다. 추정된 구속방향으로 접촉력을 조금 변화시키고 관절각의 변화에서 접촉점의 변위를 계산하고 접촉점의 변위로부터 추정된 구속방향을 수정하면, 가동방향으로의 미소한 접촉점 변위는 남지만 접촉력을 정확한 구속방향으로 변화시킬 수 있다. 구속방향의 인식에 오차가 있는 경우, 가동방향으로의 접촉점 변위가 무시할 수 없을 만큼 저절로 커지고 구속방향에 관한 더욱 정확한 정보를 얻을 수 있으므로 다양한 오차에 대해 정확한 작업이 가능하다. 구체적인 작업순서는 다음과 같다.

Step 1. 작업의 개시점에서 접촉점의 위치와 구속방향을 힘 센서로부터 구한다.⁽²⁷⁾ 최초의 구속방향을 접촉법선으로 한다.

$$r^i = r, \quad e_c = n \quad (1)$$

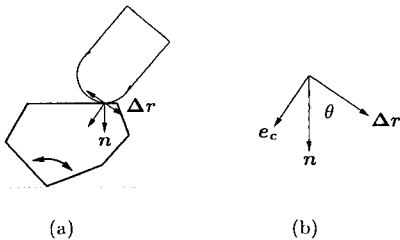


Fig. 6 Constraint direction of forces in algorithm (I)

여기서 r 은 손가락과 물체의 접촉점 위치, r^i 는 최초의 접촉점 위치, n 은 접촉점에서의 단위법선 벡터, e_c 는 구속방향을 가리키는 벡터이다 (Fig. 6).

Step 2. 접촉력을 조금 변화시켜고, Fig. 6 (a)와 같이 관절각의 변화로부터 접촉점의 시종변위(Δr)를 계산한다.

$$\Delta r = r^n - r^i \quad (2)$$

여기서 r^n 은 접촉점의 현재위치이고, 접촉점의 시종변위(Δr)는 r^i 부터 r^n 까지의 변위량이다.

Step 3. $\|\Delta r\|$ 가 위치의 설정치보다 작은 경우, n 을 구속방향으로 한다.

$$e_c = n \quad (3)$$

Step 4. $\|\Delta r\|$ 가 위치의 설정치보다 큰 경우, Fig. 6 (b)와 같이 Δr 과 직교하고 물체를 가리키는 방향을 구속방향으로 한다.

$$e_c = n - \frac{(n \cdot \Delta r)}{\|\Delta r\|^2} \Delta r \quad (4)$$

그리고 n 과 Δr 사이의 각도를 θ 이라고 하면, e_c 의 크기는 $\sin \theta$ 가 되도록 한다.

Step 5. 접촉력을 추정된 구속방향(e_c)으로 변화시킨다.

$$\delta F = c_c e_c \quad (5)$$

$$F_{new} = F_{old} + \delta F \quad (6)$$

여기서 δF 는 접촉력의 미소변화량, c_c 는 구속방향으로의 접촉력의 변화계수이고, 양의 값이 증가를, 음의 값이 감소를 의미한다.

Step 6. 힘의 구속방향이 정확하게 구해질 때까지 Step 2에서 Step 5까지를 일정한 주기로 반복해서 실행한다.

알고리즘 (I)으로 Fig. 7과 같은 실험을 행했다. 본 논문에서는 옆면이 육각형인 물체만을 대상으로 한다. 물체의 정보는 사전에 주어지지 않고, 초기상태의 물체는 오른 손가락과 책상 윗면 사이에 끼인 것처럼 지지되어서 정지하고 있다. 그리고 Fig. 6과 같이 물체의 윗면은 수평이고, 접촉법선(n)은 접촉점과 구속점을 연결한

벡터(e_c)와 35.0 [deg] 정도의 각도로 교차한다. 이러한 자세에서는 인간이 눈을 감고 하기도 쉽지 않다. 실험의 기준좌표계는 Fig. 7과 같다. 물체와 책상 윗면의 접촉은 선 접촉이고, 윗면의 재질을 고무로 해서 물체와 책상 윗면의 미끄러짐이나 물체의 연직축 중심의 회전을 방지하도록 한다. 위치의 설정치를 0.5 [mm], c_c 를 0.4으로 하고, 구속방향으로 1.00 [sec] 사이에 25.0 [gf]의 힘을 1회 증가 및 감소시킨 경우에 접촉력의 변화를 Fig. 8에 나타냈다. 이 변화는 물체의 안정한 상태를 유지하면서 오픈 루프의 힘 제어를 행한 결과이다. 구속방향이 수렴할 때까지 반복해야 하지만 전반적인 상태의 추이를 고찰하기 위해 한 번의 증감만을 실행했다. 일반적으로 오픈 루프의 힘 제어로 물체의 안정된 상태를 유지하기 힘들지만, 본 논문에서 사용한 로봇 손은 보이스 코일 모터에 의한 다이렉트 방식의 와이어 구동으로 높은 제어성과 빠른 응답성을 구현함으로써 이러한 어려움을 극복했다. 설정치와 c_c 는 위치 제어의 정밀도에 의해 결정되는 값으

로 장치의 성능에 의존하며 실험적으로 구했다. 접촉력이 0.00 [sec]에서 접촉법선인 구속방향으로 증가했다. 접촉점의 시중변위가 설정치보다 작은 경우, 접촉력의 변화방향은 접촉법선인 연직하향이지만 힘 센서의 검출오차로 인해 조금 벗어났다. 0.32 [sec]에 접촉점의 시중변위가 설정치인 0.5 [mm]에 도달하고, 접촉력의 변화방향은 접촉점의 시중변위와 직교하는 방향으로 되었다. 접촉력은 0.32 [sec]부터 증감이 바뀌는 0.50 [sec]까지 거의 정확한 구속방향으로 변화했다. 0.50 [sec]에서 접촉력의 변화방향은 반대로 되지만, 접촉력의 변화는 증가할 때의 궤적에서 조금 벗어났다. 이것은 물체의 구속점 중심의 회전에서 발생하고, 구속방향으로의 접촉점의 시중변위는 더욱 커진다. 그리고 구속방향으로의 접촉점의 시중변위가 큰 경우, 구속방향을 정확하게 추정할 수 없게 된다. 구속방향으로의 예측할 수 없는 접촉점 변위는 물체의 회전, 손가락과 물체의 변형, 접촉점에서의 미소한 미끄러짐 등에 기인한다. 작업의 개시점에서 법선방향으로 접촉력(normal force)을 증가함으로써 구속방향의 추정을 어렵게 만드는 접선방향의 미끄러짐을 최대한 차단할 수 있었다. 따라서 이 알고리즘은 구속방향으로의 접촉점의 시중변위가 충분히 작을 경우에 효과적으로 동작한다.

본 논문의 실험에서 물체와 책상 윗면의 미끄러짐이나 물체의 연직축 중심의 회전을 방지하기 위해서 책상 윗면의 재질을 고무로 했지만, 매끄러운 나무판으로 만든 책상 윗면에서도 목표로 하는 동작(구속상태를 추정하는 동작, 손가락을 떼는 동작)을 구현할 수 있다.⁽²⁰⁾

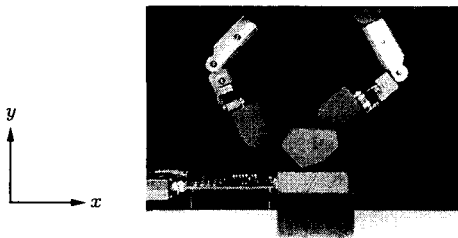


Fig. 7 Experiment of algorithms (I), (II) and (IV)

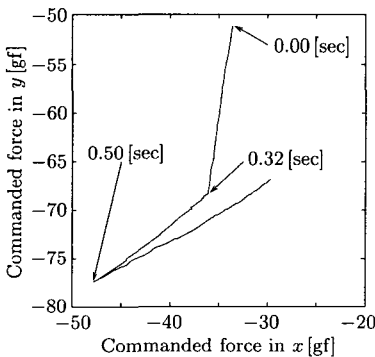


Fig. 8 Experimental result of algorithm (I)

5.2.2 알고리즘 (II)

알고리즘 (II)는 미지 물체에서 접촉점의 변위가 가동방향으로만 발생하는 것을 이용하는 방법으로서, 추정된 구속방향을 가동방향으로의 접촉점 변위가 감소하는 방향으로 수정한다. 이 알고리즘은 구속방향으로의 예측할 수 없는 접촉점 변위에 영향을 받지 않을 것으로 기대한다. 구체적인 작업순서는 다음과 같다.

Step 1. 작업의 개시점에서 접촉점의 위치, 접촉력, 구속방향을 힘 센서로부터 구한다. 최초

의 구속방향을 접촉법선으로 한다.

$$r^i = r, \quad F^i = F_s, \quad e_c = n \quad (7)$$

여기서 F_s 는 힘 센서에 의한 접촉력, F^i 는 최초의 접촉력이다.

Step 2. 접촉력을 조금 변화시키고, 관절각의 변화로부터 접촉점의 시중변위와 접촉력의 시중변화를 계산한다.

$$\Delta r = r^n - r^i, \quad \Delta F = F^n - F^i \quad (8)$$

여기서 F^n 은 접촉력의 현재값이고, 접촉력의 시중변화(ΔF)는 F^i 부터 F^n 까지의 변화량이다.

Step 3. $\|\Delta F\|$ 가 힘의 설정치보다 작은 경우, 접촉력을 추정한 구속방향(e_c)으로 변화시킨다.

$$\delta F = c_c e_c \quad (9)$$

Step 4. $\|\Delta F\|$ 가 힘의 설정치보다 큰 경우, δF 의 방향을 Δr_m 의 역방향으로 조금 회전시킨다. 그리고 δF 의 크기를 일정한 값으로 변화시킨다. δF 의 방향을 구속방향으로 한다.

$$\Delta r_m = \Delta r - \frac{(\Delta r \cdot \Delta F)}{\|\Delta F\|^2} \Delta F \quad (10)$$

$$\delta F = c_c \frac{\Delta F}{\|\Delta F\|} + c_m \Delta r_m \|\Delta F\| \quad (11)$$

$$e_c = \frac{\delta F}{\|\delta F\|} \quad (12)$$

여기서 Δr_m 은 Δr 의 ΔF 와 직교하는 성분이고, 물체의 가동방향을 나타낸다. 그리고 c_c 는 구속방향으로의 접촉력의 변화계수, c_m 은 가동방향으로의 변화계수이다.

Step 5. 힘의 구속방향이 정확하게 구해질 때까지 Step 2에서 Step 4까지를 일정한 주기로 반복해서 실행한다.

알고리즘 (II)으로 Fig. 7과 같은 실험을 행했다. 힘의 설정치를 2.0 [gf], c_c 를 0.3, c_m 을 0.3으로 하고, 구속방향으로 8.00 [sec] 사이에 30.0 [gf]의 힘을 4회 증가 및 감소시킨 경우에 접촉력의 변화를 Fig. 9에 나타냈다. 구속방향이 수렴할 때까지 반복해야 하므로 여러 번의 증감

을 실행했다. 설정치, c_c , c_m 은 위치 제어의 정밀도에 의해 결정되는 값으로 장치의 성능에 의존하며 실험적으로 구했다. 접촉력이 0.00 [sec]에서 접촉법선인 구속방향으로 증가했고, 거의 정확한 구속방향을 중심으로 변화했다. 물체가 구속점을 중심으로 조금 회전했기 때문에 가동방향으로의 접촉점 변위는 신속하게 없어지지 않고 구속방향을 정확한 추정을 위해 4회의 왕복이 필요했다. 그리고 위치 중심의 추정방법(I, II)에서는 물체의 회전, 손가락과 물체의 변형, 접촉점에서의 미소한 미끄러짐 등에 의한 구속방향으로의 예측할 수 없는 접촉점 변위가 최대의 오차요인이 된다.

5.2.3 알고리즘 (III)

알고리즘 (III)은 Fig. 10과 같이 제1 손가락(오른 손가락)에서 접촉력을 추정한 구속방향으로 변화시키고, 제2 손가락(왼 손가락)에서 접촉력의 변화가 최소로 되는 방향으로 구속방향을 수정하는 방법이다. 따라서 오른 손가락의 접촉력을 접촉법선인 구속방향으로 조금 변화시켰을 경우, 왼 손가락의 힘 센서에서 오른 손가락의 구속방향에 관한 추정오차에 상당하는 접촉력의 변화를 검출하고, 이것을 오른 손가락에 피드백하여 구속방향을 수정한다.

양 손가락에서 접촉력의 변화가 협조작업에 의해 선형적인 관계에 있다고 가정한다면, 힘의 구속방향과 가동방향은 특이치 분해에 의해 추정할 수 있지만, 실제로 양 손가락에서 접촉력의 변화는 마찰 등의 영향으로 비선형적인 관계에 있으므로 이 알고리즘은 실시간적인 피드백

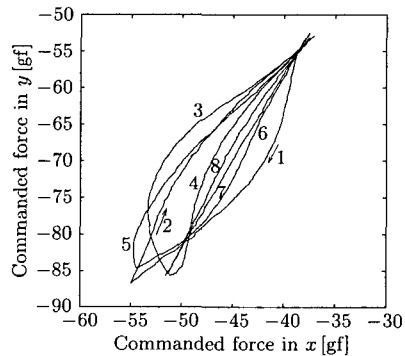


Fig. 9 Experimental result of algorithm (II)

제어에 적합하지 않았다.

5.2.4 알고리즘 (IV)

알고리즘 (IV)는 미지 물체의 접촉력을 추정 한 구속방향으로 변화시킨 경우, 실질적으로 접촉력의 변화는 구속방향으로만 발생하는 것을 이용하는 방법으로서, 접촉력이 변화하는 방향을 힘 센서로부터 검출하여 구속방향을 수정한다. 물론 접촉점에서 접선방향의 미끄러짐이 발생하지 않는 범위 내에서 마찰력이 변화하지만, 법선방향의 접촉력 변화에 비하면 무시할 수 있을 만큼 미소하다. 구체적인 작업순서는 다음과 같다.

Step 1. 작업의 개시점에서 접촉력과 구속방향을 힘 센서로부터 구한다. 최초의 구속방향을 접촉법선으로 한다.

$$F_s^i = F_s, \quad e_c = n \quad (13)$$

여기서 F_s^i 는 힘 센서에 의한 최초의 접촉력이다.

Step 2. 접촉력을 조금 변화시키고, 힘 센서의 출력으로부터 접촉력의 시종변화(ΔF_s)를 계산한다.

$$\Delta F_s = F_s^n - F_s^i \quad (14)$$

여기서 F_s^n 은 힘 센서에 의한 접촉력의 현재 값이고, 접촉력의 시종변화(ΔF_s)는 F_s^i 부터 F_s^n 까지의 변화량이다.

Step 3. $\|\Delta F_s\|$ 가 힘의 설정치보다 작은 경우, n 을 구속방향으로 한다.

$$e_c = n \quad (15)$$

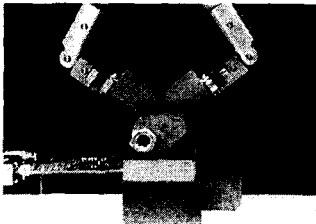


Fig. 10 Experiment of algorithm (III)

Step 4. $\|\Delta F_s\|$ 가 힘의 설정치보다 큰 경우, ΔF_s 의 방향을 구속방향으로 한다.

$$e_c = \frac{\Delta F_s}{\|\Delta F_s\|} \quad (16)$$

Step 5. 접촉력을 추정 한 구속방향(e_c)으로 변화시킨다.

$$\delta F = c_c e_c \quad (17)$$

Step 6. 힘의 구속방향이 정확하게 구해질 때까지 Step 2에서 Step 5까지를 일정한 주기로 반복해서 실행한다.

알고리즘 (IV)으로 Fig. 7과 같은 실험을 행했다. 힘의 설정치를 2.0 [gf], c_c 를 0.2, c_m 을 0.2으로 하고, 구속방향으로 8.00 [sec] 사이에 30.0 [gf]의 힘을 4회 증가 및 감소시킨 경우에 접촉력의 변화를 Fig. 11에 나타냈다. 구속방향이 수렴할 때까지 반복해야 하므로 여러 번의 증감을 실행했다. 설정치, c_c , c_m 은 힘 제어의 정밀도에 의해 결정되는 값으로 장치의 성능에 의존하며 실험적으로 구했다. 접촉력이 0.00 [sec]에서 접촉법선인 구속방향으로 증가했고, 추정오차는 신속하게 없어졌다. 회전관절에서의 마찰의 영향으로 0.00 [sec]부터 구속방향이 바뀌는 0.23 [sec]까지 접촉력의 시종변화는 5.0 [gf] 정도였다. 1.37 [sec]에서 물체가 조금 회전했기 때문에 구속점 중심의 마찰이 변화했고, 구속방향도 급변했다. 이 알고리즘은 전체적으로 정확한 구속방향을 구했다. 그리고 힘 중심의 추정 방법(III, IV)에서는 물체의 구속점 중심의 마찰이 최대의 오차요인이 된다.

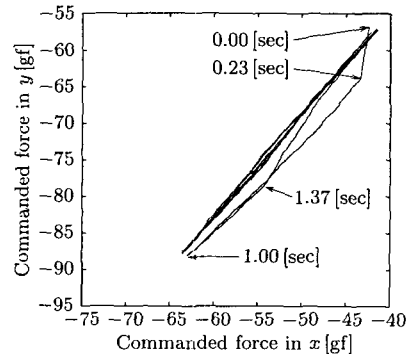


Fig. 11 Experimental result of algorithm (IV)

5.3 유효한 추정 알고리즘

관절각의 변화로부터 추정한 구속방향을 수정하는 방법(II)은 물체의 구속점 중심의 마찰 상태가 불안정하게 되어 구속방향은 수렴하기 어려워질 가능성이 있다. 접촉력의 변화로부터 추정한 구속방향을 수정하는 방법(IV)은 물체의 구속점 중심의 마찰이 항상 한계상태에 가깝게 변화하여 구속방향은 수렴하기 어려워질 가능성이 있다. 이러한 결점을 보완하기 위해서 알고리즘 (II)와 (IV)를 조합하여 미지 물체에서 힘의 구속방향을 더욱 정확하게 추정할 수 있는 유효하고 실용적인 알고리즘을 구성하기로 한다. 구체적인 작업순서는 다음과 같다.

- Step 1.** 작업의 개시점에서 최초상태를 기록한다. 알고리즘 (II)를 위해 접촉점의 위치를, 그리고 알고리즘 (II)와 (IV)를 위해 접촉력과 구속방향을 힘 센서로부터 구한다.
- Step 2.** 알고리즘 (IV)에 의해 접촉력을 추정된 구속방향으로 변화시킨다. 여기서 접촉력의 변화량은 일정하게 유지한다.
- Step 3.** 알고리즘 (II)에 의해 접촉력을 추정된 가동방향의 역방향으로 회전시킨다. 여기서 접촉력의 크기는 변하지 않게 한다.
- Step 4.** 힘의 구속방향이 정확하게 구해질 때까지 Step2에서 Step3까지를 일정한 주기로 반복해서 실행한다.

유효한 알고리즘으로 실험을 행했고, 접촉력의 변화량을 15.0 [gf]으로 하고, 구속방향으로 8.00 [sec] 사이에 30.0 [gf]의 힘을 4회 증가 및 감소시킨 경우에 접촉력의 변화를 Fig. 12에 나타

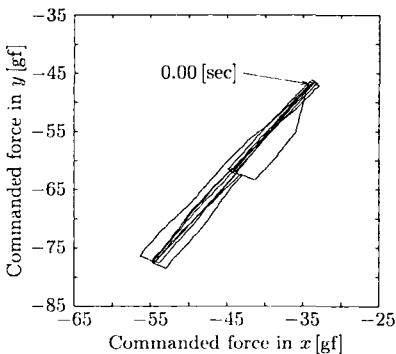


Fig. 12 Experimental result of effective algorithm

냈다. 알고리즘 (IV)으로 15.0 [gf]의 힘을 연속적으로 증감시키고, 알고리즘 (II)으로 15.0 [gf]의 증감마다 추정된 구속방향을 수정한다. 접촉력이 0.00 [sec]에서 접촉법선인 구속방향으로 증가했고, 추정오차는 신속하게 없어졌다. 이 알고리즘의 장점으로 다음을 들 수 있다.

- 1) 구속점 중심의 마찰이 작은 경우, 힘의 구속방향은 대단히 정밀하고 빠르게 인식된다.⁽²⁰⁾
- 2) 물체의 회전, 손가락과 물체의 변형, 미소한 미끄러짐 등에 의한 구속방향으로의 예측할 수 없는 접촉점 변위에 효과적으로 대응한다.
- 3) 3차원에서 물체의 구속상태를 추정하는 작업에 그대로 활용할 수 있다.

구속점 중심의 마찰이 큰 경우, 미끄러짐이 발생하지 않는 범위 내에서 구속점의 접촉력이 임의의 방향으로 변화할 수 있으므로 손가락의 작용에 의한 접촉력의 진정한 구속방향으로의 변화가 힘 센서에 정확히 반영되지 못하는 문제점을 가지고 있다.

6. 응용실험: 손가락을 떼는 동작

Fig. 13과 같이 안정한 접촉상태에 있는 직육면체의 물체에서 손가락을 떼는 동작, 즉 두 손

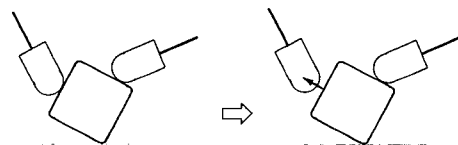


Fig. 13 Schematic view of lifting off finger

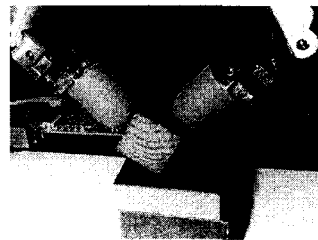


Fig. 14 Experiment of lifting off finger

가락으로 지지하지 않으면 불안정한 상태(굴러서 떨어짐)로 되는 책상 위의 미지 물체를 한 손가락을 땀으로써 두 손가락의 지지에서 한 손가락의 지지로 이행하는 동작에 관해 고찰한다. 직육면체의 정보는 사전에 주어지지 않고, 왼 손가락을 떼는 것으로 한다. Fig. 14와 같이 물체의 구속상태를 유효하게 추정하는 알고리즘을 이용하여, 물체에서 손가락을 안정하게 떼는 동작을 실현한다. 여기서 접촉력의 접선성분과 법선성분의 비가 마찰계수의 추정치보다 작기만 하면 안정한 접촉상태가 유지되는 것으로 한다. 구체적인 작업순서는 다음과 같다.

- Step 1.** 왼 손가락에서 접촉력의 접선성분을 영으로 만드는 제어를 행한다.
- Step 2.** 오른 손가락에서 접촉력의 접선성분과 법선성분의 비를 힘 센서로부터 항상 계산하여, 마찰계수의 추정치와 비교함으로써 접촉상태의 안정성을 판단한다.
- Step 3.** 오른 손가락의 마찰상태가 안정한 경우, 왼 손가락에서 접촉력을 일정한 속도로 감소시킨다.
- Step 4.** 오른 손가락의 마찰상태가 불안정한 경우, 오른 손가락에서 구속방향의 접촉력을 일정한 속도로 증가시킨다.
- Step 5.** 물체에서 왼 손가락을 안정하게 땀 때까지 Step 2에서 Step 4까지를 일정한 주기로 반복해서 실현한다.

미지의 직육면체에서 손가락을 안정하게 떼는 동작을 유효한 추정 알고리즘으로 실현했다.

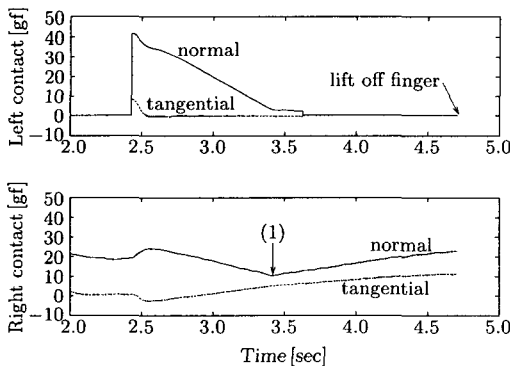


Fig. 15 Experimental result of lifting off finger

마찰계수의 추정치를 0.5으로 하고, 이 동작을 성공한 경우에 접촉력의 변화를 Fig. 15에 나타냈다. 처음에 Step 1의 작용으로 왼 손가락에서 접촉력의 접선성분이 감소하고, 이 영향이 오른 손가락의 접촉력에도 나타났다. 그리고 Step 3의 작용으로 왼 손가락에서 접촉력의 법선성분이 감소하고, 이 영향으로 오른 손가락에서 접촉력의 법선성분은 감소하면서 접촉력의 접선성분은 증가했다. 오른 손가락에서 접촉력의 접선성분과 법선성분의 비가 추정치인 0.5으로 되어서 (Fig. 15 (1)), 작업의 순서는 Step 3에서 Step 4으로 전환되었다. Step 4의 작용으로 오른 손가락의 접촉력이 증가함으로써 오른 손가락에서 마찰의 안정성이 유지되고 왼 손가락에서 접촉력이 다시 감소하기 시작했다.

7. 결론

앞에서 언급한 것과 같이 대상물체와 다지의 로봇 손에 관한 정보 및 작용의 오차와 불확정성으로 인해 실제 환경에서 물체의 조작을 계획한 대로 실현하는 것은 지극히 어렵다. 본 논문에서는 오차나 미지이고 불확정적인 요인이 다수 존재하는 실제 환경에서 목표로 하는 물체의 운동을 실현하기 위한 로봇 손의 제어방법을 구축하는 것을 목표로 하였고, 힘 센서와 관절각의 정보로부터 미지 물체의 구속상태를 정확하게 추정하기 위한 4종류의 알고리즘, 즉 2종류의 위치 중심의 방법과 2종류의 힘 중심의 방법을 개발했다. 구속상태의 정확한 인식은 접촉력을 재조정하는 동작, 물체를 재과지하는 동작, 물체에서 손가락을 떼는 동작 등을 실현하기 위해 필수적인 사항이다. 그리고 2종류의 알고리즘을 조합함으로써 구속상태의 추정에 유효한 알고리즘을 구성했다. 이 알고리즘으로 물체의 형상, 크기, 무게, 무게 중심, 구속상태 등의 정보를 사전에 알지 못해도 접촉력을 적절하게 재조정하는 것이 가능했다. 미지 물체에서 손가락으로 안정하게 떼는 동작에도 응용했다.

앞으로의 전망으로는 본 논문에서 제한한 유효한 추정 알고리즘을 3차원의 문제에도 적용하고, 물체의 복잡한 조작의 실현에 응용할 필요가 있다.

참고문헌

- (1) Napier, J., 1980, "Hands," *Princeton University Press*, pp. 3~93.
- (2) Hirzinger, G., Brunner, B., Landzettel, K., Sporer, N., Butterfaß, J. and Schedl, M., 2003, "Space Robotics-DLR's Telerobotic Concepts, Lightweight Arms and Articulated Hands," *Autonomous Robots*, Vol. 14, No. 2~3, pp. 127~145.
- (3) Bluethmann, W., Ambrose, R., Diftler, M., Askew, S., Huber, E., Goza, M., Rehnmark, F., Lovchik, C. and Magruder, D., 2003, "Robonaut: a Robot Designed to Work with Humans in Space," *Autonomous Robots*, Vol. 14, No. 2~3, pp. 179~197.
- (4) Carrozza, M.C., Dario, P., Vecchi, F., Roccella, S., Zecca, M. and Sebastiani, F., 2003, "The CyberHand: on the Design of a Cybernetic Prosthetic Hand Intended to be Interfaced to the Peripheral Nervous System," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robot. and Syst.*, pp. 2642~2647.
- (5) Murray, R.M., Li, Z. and Sastry, S.S., 1994, "A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation," *CRC Press*.
- (6) Montana, D.J., 1995, "The Kinematics of Multi-fingered Manipulation," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 11, No. 4, pp. 491~503.
- (7) Jia, Y.-B. and Erdmann, M., 1999, "Pose and Motion from Contact," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 18, No. 5, pp. 466~490.
- (8) 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.
- (9) Liu, Y.-H., 2000, "Computing n-finger Form-closure Grasps on Polygonal Objects," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 19, No. 2, pp. 149~158.
- (10) Zheng, X.-Z., Nakashima, R. and Yoshikawa, T., 2000, "On Dynamic Control of Finger Sliding and Object Motion in Manipulation with Multifingered Hands," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 16, No. 5, pp. 469~481.
- (11) 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.
- (12) Michelman, P., 1998, "Precision Object Manipulation with a Multifingered Robot Hand," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 14, No. 1, pp. 105~113.
- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) Erkmen, I., Erkmen, A.M. and Günver, H., 2000, "Robot Hand Preshaping and Regrasping Using Genetic Algorithms," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 19, No. 9, pp. 857~874.
- (16) Harmati, I., Lantos, B. and Payandeh, S., 2002, "On Fitted Stratified and Semi-stratified Geometric Manipulation Planning with Fingertip Relocations," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 21, No. 5~6, pp. 489~510.
- (17) 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.
- (18) Schutter, J.D., Bruyninckx, H., Dutre, S., Geeter, J.D., Katupitiya, J., Demey, S. and Lefebvre, T., 1999, "Estimating First-order Geometric Parameters and Monitoring Contact Transitions during Force-controlled

- Compliant Motion," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 18, No. 12, pp. 1161~1184.
- (19) 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.
- (20) 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.
- (21) Laliberte, T. and Gosselin, C.M., 1998, "Simulation and Design of Underactuated Mechanical Hands," *Mech. Mach. Theory*, Vol. 33, No. 1/2, pp. 39~57.
- (22) Liu, Y.-H., Xu, Y. and Bergerman, M., 1999, "Cooperation Control of Multiple Manipulators with Passive Joints," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 15, No. 2, pp. 258~267.
- (23) Montambault, S. and Gosselin, C.M., 2001, "Analysis of Underactuated Mechanical Grippers," *ASME J. Mechanical Design*, Vol. 123, Sep., pp. 367~374.
- (24) Salisbury, J.K. and Craig, J.J., 1982, "Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 1, No. 1, pp. 4~17.
- (25) 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.
- (26) 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.
- (27) Bicchi, A., 1990, "Intrinsic Contact Sensing for Soft Fingers," *Proc. of IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, pp. 968~973.