

(論 文)

소프트핑거 로봇손의 물체 운용계획

정낙영* · 최동훈** · 서일홍***

(1994년 2월 3일 접수)

Dextrous Manipulation Planning of Soft-Fingered Hands

Nak Young Chang, Dong-Hoon Choi, Il Hong Suh

Key Words : Hierarchical Planning(계층적 계획), Soft Finger Contact(소프트핑거 접촉), Contact Mode(접촉모드), Nonlinear Optimization Problems(비선형 최적화 문제)

Abstract

A hierarchical planning strategy for dextrous manipulation of multifingered hands with soft finger contact model is proposed. Dextrous manipulation planning can be divided into a high-level stage which specifies the position/orientation trajectories of the fingertips on the object and a low-level stage which determines the contact forces and joint trajectories for the fingers. In the low-level stage, various nonlinear optimization problems are formulated according to the contact modes and integrated into a manipulation planning algorithm to find contact forces and joint velocities at each time step. Montana's contact equations are used for the high-level planning. Quasi-static simulation results are presented and illustrated by employing a three-fingered hand manipulating a sphere to demonstrate the validity of the proposed low-level planning strategy.

1. 서 론

로봇이 점점 복잡하고 다양한 작업에 적용되게 됨에 따라 보다 정교한 다지 로봇손(multifingered robotic hand)의 개발에 대한 연구가 불가피하게 되었고 이에 따라 로봇손(robotic hand)을 이용하여 파지된 물체를 효과적으로 다룰 수 있는 운용 계획과 제어(manipulation planning and control)문제가 최근 활발하게 연구되고 있다.^(1~12) Sarker⁽⁷⁾ 등은 커다란 물체를 구름 접촉(rolling contact)으로 다루는 두 로봇의 동적 제어문제를 언급했는데 손가락과 물체간의 접촉점과 물체운동의 궤적이 동시에 제어된다. Nagai와 Yoshikawa⁽⁸⁾는 동적 제

어와 하이브리드 위치/힘제어에 기초하여 다지 로봇손의 동적 운용/파지제어기를 제안하였다. 운용 계획에 관하여 Kao^(5,6)는 파지 컴플라이언스와 마찰한계표면의 개념을 도입하여 파지된 물체에 대한 손가락의 미끄럼운동을 예측하였다. 저자들은 손가락 끝과 물체의 접촉점에서 점접촉 모델을 가정하여 구름 및 미끄럼 접촉을 동시에 이용하는 계획법을 제안하였고⁽⁹⁾ 작업환경과 사용자의 관심에 따라 성능지수를 변경함으로써 그 유용성을 입증하였다.⁽¹⁰⁾

본 논문에서는 접촉영역의 접평면상으로 전달되는 접선 마찰력 외에 부가적으로 법선방향에 대하여 비틀림모멘트를 전달할 수 있는 소프트핑거 접촉(Fig. 1)을 하는 로봇손을 위한 효율적인 물체 운용계획법을 제안하였다. 매 시간단계에서 손가락 끝과 물체간의 접촉모드에 따라 접촉력과 관절각의 궤적을 찾기 위한 여러가지 형태의 비선형 최적화 문제가 수식화되고 풀어진다. 물체상의 손가락 끝

*정회원, 대우조선(주) 기술연구소

**정회원, 한양대학교 기계설계학과

***한양대학교 전자공학과

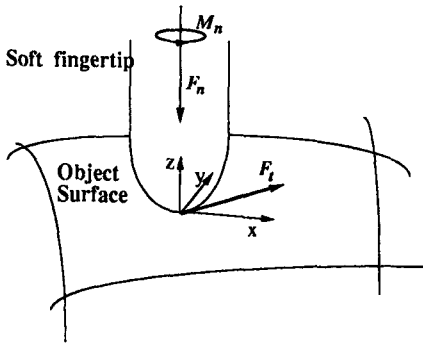


Fig. 1 Soft finger contact

의 접촉점의 이동은 Montana의 접촉방정식⁽⁴⁾을 이용하여 찾아나간다. 제한된 방법의 유효성을 검증하기 위하여 구를 회전시키는 세개의 손가락을 갖는 로봇손을 도입하여 수치적으로 모의실험을 수행하였다.

다음절에서 다지 로봇손을 위한 물체 운용계획 문제가 수식화된다. 3절에서는 로봇손-물체계의 성공적인 운용을 위하여 만족되어야 할 조건들이 언급된다. 4절에서는 비선형계획법을 이용한 하층 계획에 대한 해의 접근방법을 설명하였다. 수치적으로 수행한 모의실험의 결과가 5절에 정리되어 있고 결론이 최종절에서 도출된다.

2. 문제 서술

일반적으로 물체가 움직이면 물체와 손가락 끝간의 접촉점은 구름과 미끄럼 및 스핀운동의 조합을 통하여 이동하게 된다. 따라서 물체 운용계획은 물체상의 손가락 끝의 위치/자세 제적을 지정하는 상층계획과 물체에 원하는 운동을 유발시키기 위하여 필요로 하는 각 손가락의 접촉력과 관절제적을 결정하는 하층 계획의 두 단계로 나뉘어지게 된다. 본 논문에서는 문제를 단순화시키기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- (1) 손가락과 파지된 물체와의 접촉은 연속이고 단지 손가락 끝에서만 발생한다.
- (2) 손가락 끝과 파지된 물체는 강체이다.
- (3) 변형량을 무시할 수 있는 소프트핑거 접촉 모델을 도입한다.
- (4) 접촉운동은 준정적이고 따라서 손가락의 동력학은 무시한다.

상층계획 : 접촉점에서의 상대 운동으로 야기되는

파지된 물체상의 손가락 끝의 위치/자세 제적을 찾아라.

상층계획을 위하여는 접촉하는 두 접촉점의 운동을 기술하는 접촉좌표들(Fig. 2) (물체 표면에서의 접촉점의 위치를 기술하기 위하여 η, ξ 로 표현한 u_o 와 손가락 끝 표면에서의 접촉점의 위치를 기술하기 위하여 α, β 로 표현한 u_f 및 두 점의 상대적인 오리엔테이션을 기술하는 접촉각 ψ 의 시간미분값들을 주는 잘 알려진 Montana의 접촉방정식을 이용한다. 즉, Montana의 접촉방정식을 통하여 상대운동을 하면서 접촉하고 있는 두 물체의 접촉점에서의 상대속도가 주어지면 새로운 접촉점의 위치 및 오리엔테이션을 알 수 있다. (Fig. 3) 이 때 접촉점에서의 상대병진속도 v_x, v_y 및 상대회전속도 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 는 하층계획에서 구해지는 관절속도와 손가락의 자코비안(Jacobian)행렬 및 물체와 손가락 끝 표면의 기하학적 형상의 함수로 결정되게 된다.

하층계획 : 상층계획으로부터 얻어진 손가락 끝의 접촉위치 / 자세에서 물체에 원하는 운동을 유발시키기 위한 손가락의 접촉력과 관절속도를 구하라.

하층계획 단계에서 Fig. 4에 나타난 로봇손-물체계는 힘 / 모멘트 평형방정식과 힘 / 속도 영역에서의 접촉유지조건, 소프트핑거 접촉의 마찰조건, 힘과 접촉운동의 방향 및 상대적인 크기들을 연관시키는 관계식 및 힘과 속도공간을 연결시키는 적합

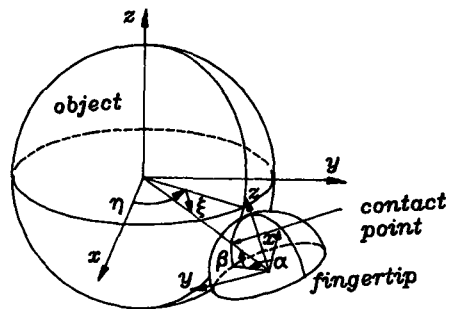


Fig. 2 The contact coordinates of the object and fingertip

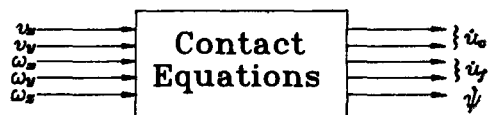


Fig. 3 The relative velocity and Montana's contact equations

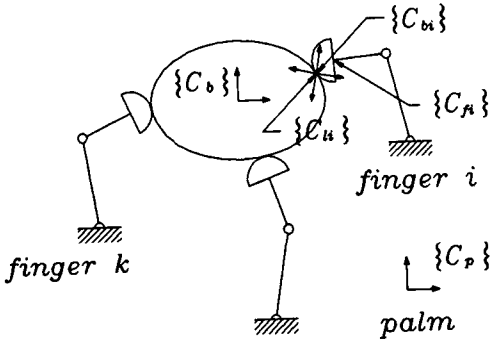


Fig. 4 A k-fingered robotic hand manipulating an object

조건식과 물리적인 제한조건들을 만족해야 한다. 다지 로봇손이 이용될 수 있는 저속의 조립작업 등의 접촉운동에 대한 지배방정식은 접촉하는 두 표면의 마찰특성에 매우 높게 좌우된다. 그러나 일반적인 소프트핑거 접촉운동에 대한 마찰력과 상대속도 등에 관련된 방정식들은 너무 복잡해서 단일한 형태의 수식화가 용이하지 않다. 따라서 접촉모드에 따라서 특징적인 문제로 분리시키고 궁극적으로는 물체운동을 위한 효율적인 계획 알고리즘으로 통합시키게 된다.

3. 물체 운동을 위한 조건

기본적인 접촉모드(즉, 구름, 미끄럼 및 스핀)를 표현하는 지배방정식들은 서로 다르다. 단지 평행방정식과 접촉유지조건만이 모든 접촉모드에 공통적으로 포함된다. 소프트핑거 접촉 모델에 대해서는 점접촉 모델의 경우⁽⁹⁾에서와 같이 적합방정식들을 이용하여 모든 접촉모드를 하나의 일반적인 수식화로 나타내는 것이 매우 어렵고 가능하더라도 그러한 복잡한 수식을 다루는 것을 알고리즘의 효율성이나 수렴성면에서 바람직하지 않다. 따라서, 접촉모드에 따라서 그에 해당하는 수식화만을 이루게 하고 해결하는 것이 보다 타당성이 있게 된다.

3.1 힘 / 모멘트 평형조건

Fig. 5의 모든 벡터들은 물체좌표계에 대해서 표현된 것이다. \vec{F}_i 와 \vec{M}_i 는 i 번째 접촉점에서 손가락을 통하여 물체에 전달되는 힘과 모멘트벡터이다. \vec{p}_i 와 n 은 물체좌표계의 중심에서 i 번째 접촉점까지의 위치벡터와 접촉점의 수를 의미한다. 위치자

t 가 행렬의 전치(transpose)를 나타내고 $[T] \equiv [\vec{F}_e^t, \vec{M}_e^t] \in R^{6 \times 1}$ 가 결과력/모멘트벡터를 의미한다고 할 때 로봇손-물체계의 힘/모멘트 평형방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\vec{F}_e = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i \tag{1a}$$

$$\vec{M}_e = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i \times \vec{F}_i + \vec{M}_i \tag{1b}$$

식(1)은 다음과 같은 행렬식으로 다시 표현될 수 있다.

$$[T] = [G][F] \tag{2}$$

이때 $[F] \in R^{6 \times n}$ 는 물체좌표계에서 본 연쇄된 힘/모멘트벡터이고 $[G] \in R^{6 \times 6n}$ 는 상층계획으로부터 결정되는데 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$[G] \equiv \begin{pmatrix} [I_3] & [O_3] & [I_3] & [O_3] & [I_3] & [O_3] \\ [P_1] & [I_3] & [P_2] & [I_3] & [P_3] & [I_3] \end{pmatrix} \tag{3}$$

이때 $[I_3]$ 와 $[O_3]$ 는 3×3 의 단위 및 영행렬이고 $[P_i]$ 는 대각선항이 모두 0인 3×3 의 불균제의 대칭행렬(skew symmetric matrix)이고 다음과 같은 위치벡터 $\vec{p}_i = (p_{ix}, p_{iy}, p_{iz})^t$ 의 벡터적과 일치한다.

$$[P_i] \equiv \begin{pmatrix} 0 & -p_{iz} & p_{iy} \\ p_{iz} & 0 & -p_{ix} \\ -p_{iy} & p_{ix} & 0 \end{pmatrix} \tag{4}$$

3.2 접촉유지조건

손가락 끝과 물체의 표면이 서로 떨어지거나 겹치지 않고 접촉이 연속적이기 위해서는 그들의 공통법선방향의 속도성분이 같아야 한다. \vec{v}_n 을 손가락 끝과 물체 표면의 공통법선의 상대속도라고 하면 \vec{v}_n 은 접촉을 유지하기 위해서 항상 0이 되어야

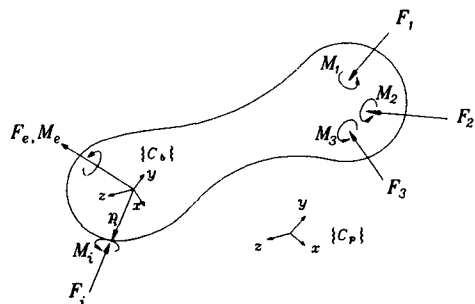


Fig. 5 Modeling of a manipulation of an object with soft finger contact

한다.

$$\vec{v}_n = 0 \tag{5}$$

접촉점에서의 상대속도는 손가락의 자코비안과 과 절속도 및 손가락 끝과 물체표면의 기하학적 형상의 함수로 표현될 수 있다. 로봇손-물체계의 운동학을 포함한 접촉점에서의 상대속도의 구체적인 유도는 참고문헌⁽²⁾에 나와 있다.

식(5)은 또한 힘영역에서도 기술될 수 있다. 접촉점을 통하여 전달되는 힘벡터는 표면의 법선방향으로 전달되는 법선력 \vec{F}_n 과 마찰에 의해서 지지되는 접평면상의 접선력 \vec{F}_t 로 나뉘어질 수 있는데 이때 \vec{F}_n 은 일반적으로 접촉을 유지하기 위해서 접촉표면에 내향이어야 하므로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{F}_n \leq 0 \tag{6}$$

3.3 소프트핑거 접촉 모델

물체의 파지나 운용에 관한 대부분의 연구들은 접촉현상을 점접촉으로 단순화하였고 소프트핑거 접촉의 경우에도 접선력과 비틀림 모멘트간의 연관관계를 무시한 부정확한 모델을 고려하였다. 최근 Howe 등⁽¹³⁾과 Kao^(6,16)의 연구에서 실험결과에 보다 근접한 정확한 소프트핑거 접촉 모델인 타원 부등식의 관계식을 도입하여 접촉 모델링을 보다 현실화하였다. \vec{M}_n 이 법선방향의 비틀림모멘트를 나타낸다고 할 때 접선력과 비틀림모멘트간의 관계는 다음과 같은 타원부등식으로 나타낼 수 있다. (Fig. 6)

$$\frac{|\vec{F}_t|^2}{(\mu|\vec{F}_n|)^2} + \frac{|\vec{M}_n|^2}{M_{n,max}^2} \leq 1 \tag{7}$$

이때 μ 와 $M_{n,max}$ 는 각각 마찰계수와 최대 비틀림모멘트를 의미하고 접촉점에서의 미끄럼과 스핀 속

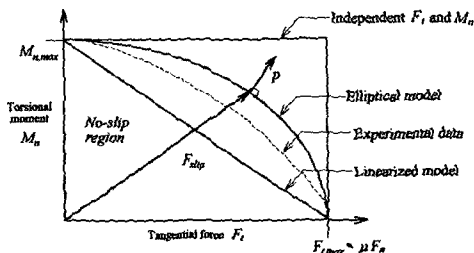


Fig. 6 Comparison of friction models and experimental results in (\vec{F}_t, \vec{M}_n) plane

도에 따라서 정적 및 동적인 값을 갖는다. 미끄럼이나 스핀운동과 같은 상대운동은 타원 부등식이 1이 될 때 발생하므로 점접촉의 경우보다 훨씬 적은 크기의 접선력을 가지고도 미끄럼이 발생할 수 있다. \vec{v}_t 와 $\vec{\omega}_n$ 을 각각 미끄럼 및 스핀속도로 정의하면 접선력과 비틀림모멘트에 대해 $\vec{\omega}_n$ 과 \vec{v}_t 의 상대 크기를 연관시키는 관계식은 상대운동의 방향이 타원 부등식(7)의 단위 법선의 방향 \hat{p} 와 일치한다는 사실로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁶⁾

$$\frac{|\vec{v}_t|}{|\vec{\omega}_n|} = \left(\frac{M_{n,max}}{\mu|\vec{F}_n|} \right)^2 \frac{|\vec{F}_t|}{|\vec{M}_n|} \tag{8}$$

3.4 힘/모멘트와 상대속도의 방향에 관한 적합조건

미끄럼접촉을 하는 경우에 접선력은 미끄럼속도의 반대방향으로 한계치에 다다르게 되므로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\vec{F}_t \cdot \vec{v}_t \approx -|\vec{F}_t||\vec{v}_t| \tag{9}$$

스핀운동이 일어나는 경우에도 접선력과 미끄럼속도의 관계와 유사하게 비틀림모멘트의 향과 스핀속도의 향은 다음과 같은 관계가 성립될 수 있다.

$$\vec{M}_n \cdot \vec{\omega}_n \leq 0 \tag{10}$$

3.5 힘/속도 공간을 연관시키는 적합조건

힘공간에서 타원 부등식이 1보다 작게 되면 속도공간에서의 손끝과 물체간의 상대속도는 존재하지 않는다. 그러나 접선력과 비틀림모멘트의 크기가 증가하여 타원 부등식이 1로 접근하게 되면 접촉점에서 미끄럼이나 스핀운동과 같은 상대운동이 발생하게 된다. 따라서 힘과 상대속도의 크기를 물리적으로서의 의미있게 연관시키기 위한 적합조건식이 필요하게 된다. 만일 타원 부등식이 1보다 작으면 상대속도는 구름운동을 보장하기 위하여 0이 되어야 하고 타원 부등식이 1이 되면 상대속도가 반드시 0이 아닌 유한한 값을 가져야 되는데 이것은 다음의 방정식을 만족함으로써 유지될 수 있다.

$$\left(1 - \left(\frac{|\vec{F}_t|^2}{(\mu|\vec{F}_n|)^2} + \frac{|\vec{M}_n|^2}{M_{n,max}^2} \right) \right) (|\vec{v}_t|^2 + |\vec{\omega}_n|^2) = 0 \tag{11}$$

타원형 부등식항과 상대 속도항이 동시에 0이 되는 순간은 상대운동이 막 발생하는 순간으로 간주한다.

3.6 설계변수 제한조건

관절각, 관절속도, 관절가속도 및 접촉점에서 전달되는 힘/모멘트의 최대 크기는 관절의 운동범위 및 구동기의 용량에 의해서 제한받기 때문에 적절한 한계치 이내로 제한되어져야만 한다. 접촉점에서의 힘/모멘트는 또한 구동기의 용량내에 있더라도 과도한 하중으로 인한 접촉면의 파손을 방지하기 위하여 제한된다. \vec{q} 를 관절각이라고 하면 이러한 제한조건들은 다음과 같은 부등식으로 나타낼 수 있다.

$$|\vec{q}_i| \leq q_{i,max} \tag{12}$$

$$|\dot{\vec{q}}_i| \leq \dot{q}_{i,max} \tag{13}$$

$$|\ddot{\vec{q}}_i| \leq \ddot{q}_{i,max} \tag{14}$$

$$|\vec{F}_i| \leq F_{i,max} \tag{15}$$

$$|\vec{M}_i| \leq \vec{M}_{i,max} \tag{16}$$

이 때 $q_{i,max}$, $\dot{q}_{i,max}$, $\ddot{q}_{i,max}$, $F_{i,max}$ 와 $\vec{M}_{i,max}$ 는 관절각, 관절속도, 관절가속도 및 전달되는 힘과 모멘트의 한계치를 각각 의미한다.

4. 하층계획을 위한 비선형계획법

4.1 접촉모드에 따른 수식화

$\vec{v}_{i,o}$ 와 $\vec{v}_{i,s}$ 를 각각 공통 접평면내의 물체와 손가락 끝의 접선속도라고 하면 다음과 같이 접촉점에서의 미끄럼/구름을 R_{sr} 을 정의할 수 있다.

$$R_{sr} \equiv \frac{|\vec{v}_i|}{(|\vec{v}_{i,o}| + |\vec{v}_{i,s}|) / 2} \tag{17}$$

이때 $\vec{v}_i = \vec{v}_{i,o} - \vec{v}_{i,s}$ 이다. 또 $\vec{\omega}_{n,o}$ 와 $\vec{\omega}_{n,s}$ 를 각각 접촉점에서의 물체와 손가락 끝의 공통법선에 대한 회전 속도라고 하면 다음과 같이 접촉점에서의 스핀률 R_{sp} 를 정의할 수 있다.

$$R_{sp} \equiv \frac{|\vec{\omega}_n|}{(|\vec{\omega}_{n,o}| + |\vec{\omega}_{n,s}|) / 2} \tag{18}$$

이때 $\vec{\omega}_n = \vec{\omega}_{n,o} - \vec{\omega}_{n,s}$ 이다. 그러면 R_{sr} 과 R_{sp} 에 따라서 다음과 같은 4개의 접촉모드가 존재할 수 있다.

○ 순수 구름모드

R_{sr} 과 R_{sp} 가 동시에 0이라면 접촉조건은 순수 구름이다. 그러면 식(2), (5), (6), (7)과 (11)이 사용된다.

○ 구름-스핀모드

R_{sr} 이 0이고 R_{sp} 가 0이 아닌 값을 갖는다면 접

촉조건은 구름-스핀이다. 그러면 식(2), (5), (6), (7), (10)과 (11)이 사용된다.

○ 미끄럼-노스핀모드

R_{sr} 이 0이 아닌 값을 갖고 R_{sp} 가 0이라면 접촉조건은 미끄럼-노스핀이다. 그러면 식(2), (5), (6), (7), (9)와 (11)이 사용된다.

○ 미끄럼-스핀모드

R_{sr} 과 R_{sp} 가 동시에 0이 아닌 값을 갖는다면 접촉조건은 미끄럼-스핀이다. 그러면 식(2), (5), (6), (7), (8), (9), (10)과 (11)이 사용된다.

이제 하층계획문제는 접촉모드에 따라서 다음과 같은 4개의 연관되는 최적화 문제로 수식화될 수 있다.

find 접촉력과 관절속도

to minimize 사용자 정의 목적함수

satisfying 식(2)의 평형방정식

식(5), (6)의 접촉유지조건

식(11)의 힘/속도 공간의 적합조건식

식(12)부터 식(16)까지의 설계변수 제한조건

순수 구름일 경우는 식(7)

구름-스핀일 경우는 식(7), (10)

미끄럼-노스핀일 경우는 식(7), (9) 또는

미끄럼-스핀일 경우는 식(7), (8), (9)과 (10)

4.2 하층계획 알고리즘

물체 운동을 위한 하층계획 알고리즘을 효과적으로 다루기 위해서 접촉모드를 4개의 경우로 나누고 그에 해당하는 최적화 문제로 수식화하였다. 그러나 매 시간단계에서 접촉모드를 미리 알 수 없으므로 접촉모드는 관절속도의 초기치를 이용하여 예측한다. (본 연구에서는 이전 시간단계의 관절속도가 현 시간단계에서의 초기치로 사용된다.) 만일 예측된 접촉모드가 순수 구름, 구름-스핀 또는 미끄럼-노스핀 모드라면 각각에 해당하는 최적화 문제가 구성되고 접촉력과 관절속도에 대해서 풀려진다. 미끄럼-스핀모드가 예견되는 경우에는 모드 변화를 막지 않게 하기 위해서 식(8)을 잠정적으로 수식화에서 제외시킨다. 그렇지 않으면 식(8)은 미끄럼-스핀모드에서만 만족되기 때문에 처음에 예견되었던 모드를 계속 유지할 수 밖에 없게 된다. 접촉모드의 변경을 검토하기 위하여 현재의 관절속도를 이용하여 접촉모드가 다시 평가된다. 만일 접촉모드가 변경되지 않고 미끄럼-스핀모드가 아니라면 해가 얻어지고 상층계획 단계로 간다. 만일 처음에

예측된 미끄럼-스핀모드가 변경되지 않았다면 정확한 해를 찾기 위해 식(8)을 포함하는 완전한 최적화 문제가 풀어지고 상층단계로 간다. 만일 모드가 변경된다면 접촉모드가 수렴할 때까지 수정된 접촉모드에 해당하는 최적화 문제가 다시 풀려진다. 매 시간단계에서 접촉력과 관절속도를 찾는 과정이 다음과 같이 요약된다. (Fig. 7)

[Step 0] 초기 관절속도를 이용하여 접촉모드를

예측한다.

[Step 1] 미끄럼-스핀모드를 제외한 경우에 해당되는 최적화 문제를 구성하고 관절속도와 접촉력을 구한다. 미끄럼-스핀모드인 경우에는 모드변경을 방해하는 식(8)을 수식화에서 잠정적으로 제외한 문제를 푼다.

[Step 2] 현재의 관절속도를 이용하여 접촉모드를 다시 평가한다. 접촉모드가 변경되었으면 step

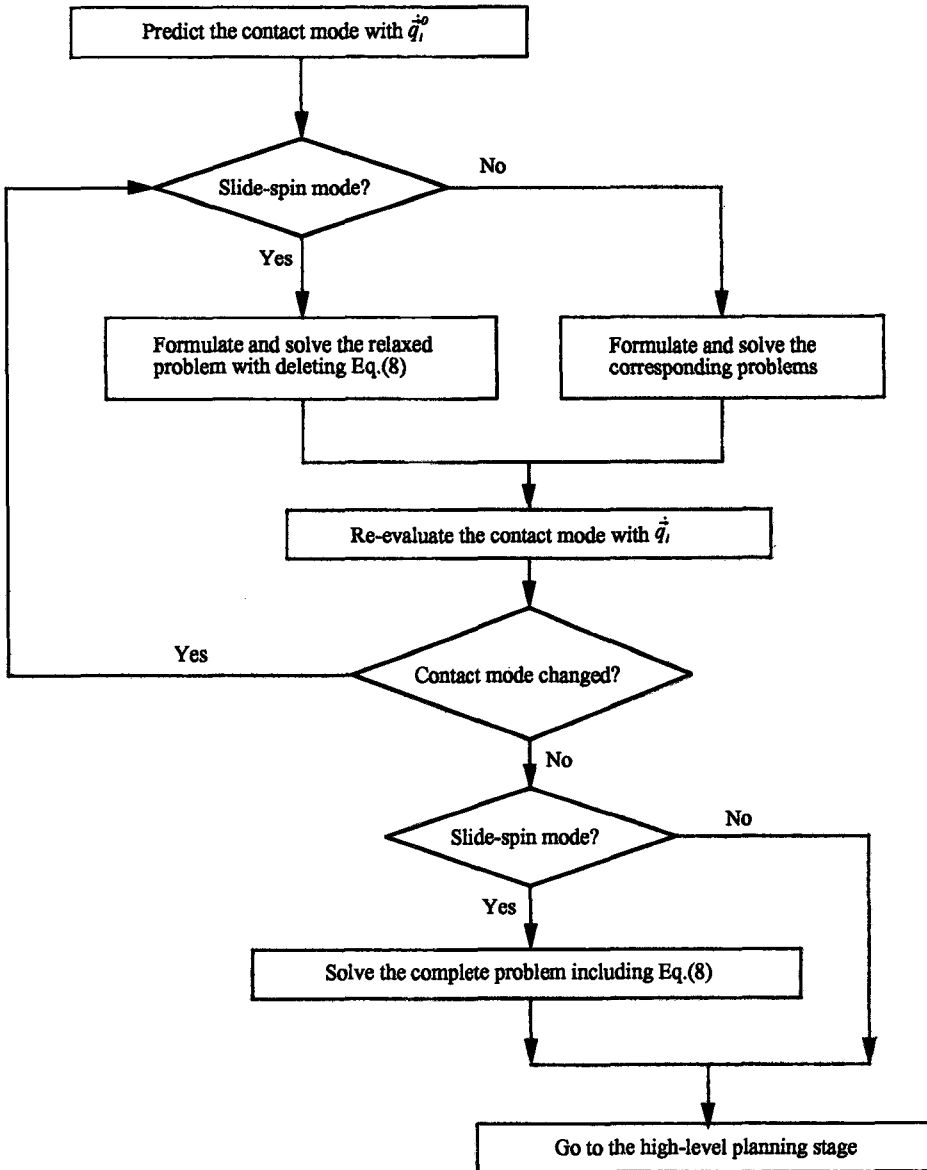


Fig. 7 Flowchart of low-level planning algorithm

1로 가고 접촉모드가 변하지 않고 미끄럼-스핀모드 라면 식(8)을 수식화에 포함시키고 미끄럼-스핀모드에 대한 완전한 문제를 풀고 step 3으로 간다. 접촉모드가 변하지 않고 미끄럼-스핀모드도 아니라면 직접 step 3으로 간다.

[Step 3] Montana의 접촉방정식을 이용하는 상층계획 단계를 통하여 다음 시간단계로 간다.

5. 시뮬레이션 결과

제안된 방법의 유효성을 보이기 위하여 Fig. 8에 보여지고 있는 것과 같이 세개의 손가락을 갖는 로봇손이 구를 회전시키는 작업을 시뮬레이션의 예로 선정하였다. 이 때 Fig. 8의 z축들은 각 관절들의 회전축을 의미한다. 로봇손과 물체의 규격 및 정보들은 각각 Table 1과 Table 2에 나타나 있다. 초기에 기준좌표계와 물체좌표계의 오리엔테이션은 일치시켰고 기준좌표계의 x축을 중심으로 Fig. 9의 속도 곡선을 갖는 회전운동을 원하는 물체운동으로 선정하였다. 1 sec.의 작업을 계획하기 위하여 10 msec.간격으로 시간단계를 나누었다.

Table 1 Specification of robotic hand model

No. of fingers	3		
No. of joints/finger	4		
Link length of each finger [m]			
L ₁ : 0.028	L ₂ : 0.062	L ₃ : 0.036	L ₄ : 0.014
Geometry of fingertip surface			Hemisphere
Materials of fingertip surface			Rubber
Radius of fingertip [m]		0.01	

Table 2 Specification of the object

Geometry of surface	Sphere
Radius [m]	0.03
Mass [kg]	0.2
Coefficient of static friction	0.90
Coefficient of kinetic friction	0.80
Static torsional moment limit [Nm]	0.007
Kinetic torsional moment limit [Nm]	0.006

문제의 해는 한양대학교 응용역학 및 최적설계 연구실에서 개발된 범용 비선형 최적화 솔버인 Integrated design optimization library(IDOL) Ver.1.5⁽¹⁴⁾를 사용하였고 IBM RISC/6000 320H상에서 수행하였다. Augmented lagrange multiplier(ALM)방법을 기초로 한 IDOL은 기존의 ALM방법의 성능을 향상시키기 위하여 다음과 같은 기법들을 고안하였다.

- (1) 설계변수와 Lagrange승수의 초기치의 효율적인 선정
- (2) 구속조건의 스케일링 (scaling)
- (3) 감소방향 벡터의 재출발
- (4) 동적가변 수렴조건 등이다. 구체적으로 감소방향벡터는 broydon-fletcher-goldfarb-shanno (BF-GS)방법을 이용하여 결정되고 선탐색 (line search)에서는 우선적으로 해의 경계를 찾기 위해 증분탐색법이 이용되고 황금분할법에 의하여 경계를 조정 한 후 마지막 4개의 함수값들을 이용하여 해를 내삽하기 위하여 3차 다항식근사법을 적용하였다.

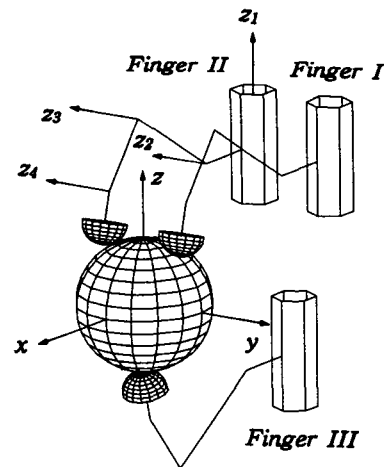


Fig. 8 A re-orienting task of a sphere by a three-fingered hand

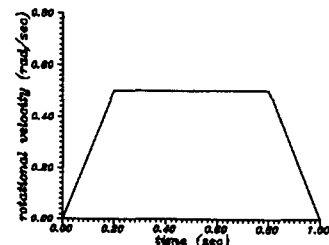


Fig. 9 A velocity profile given to an object

큰 접촉력/모멘트는 적은 위치오차에도 물체의 질량중심에서 과도한 외란모멘트를 유발할 수 있으므로 파지의 안정성면에서 불리하고 깨지기 쉬운 물체를 잡을 때에도 적절하지 않다. 또한 손가락 관절의 속도를 최소화함으로써 손가락 끝의 조작성을 최대로 이용할 수 있고 에너지소모를 최대로 줄

일 수 있다. 따라서 본 시뮬레이션에서는 다음 식과 같이 접촉력/모멘트와 관절속도의 유클리디안놈 (Euclidean norm)의 합을 목적함수로 선정하였다.

$$\|\vec{F}_i\| + \|\vec{M}_i\| + \|\dot{\vec{q}}_i\|, \quad (19)$$

이때 각각의 벡터들은 서로 다른 물리적 단위에 의

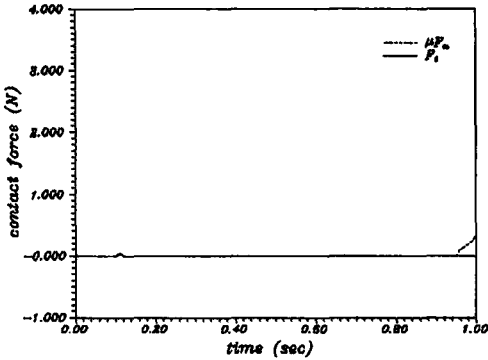


Fig. 10 The contact force of Finger I

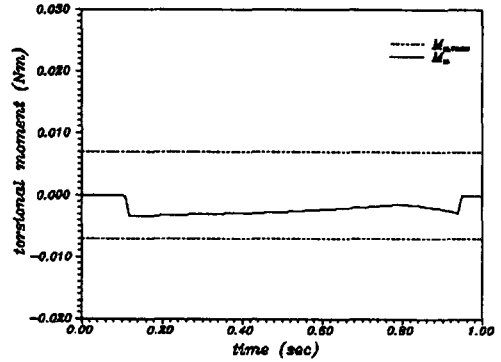


Fig. 13 The torsional moment of Finger I

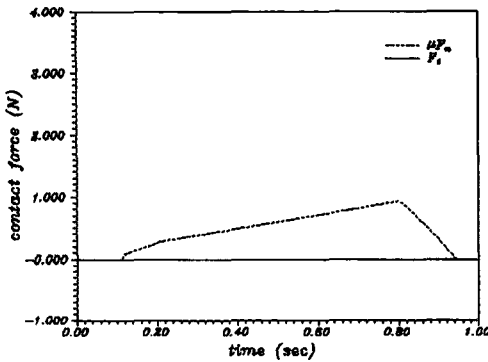


Fig. 11 The contact force of Finger II

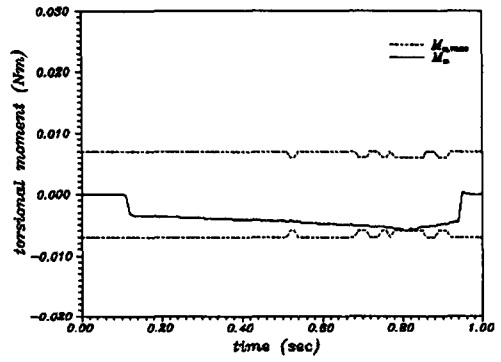


Fig. 14 The torsional moment of Finger II

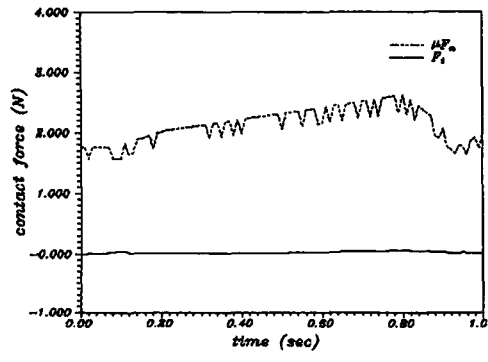


Fig. 12 The contact force of Finger III

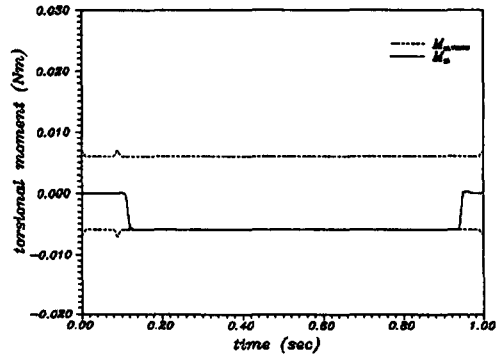


Fig. 15 The torsional moment of Finger III

하여 표현되고 크기의 차가 너무 많이 발생하기 때문에 모든 변수들이 단위 크기의 양을 가지고 최적화 과정에 참여하여 최적화 과정의 수렴성을 향상시키기 위하여 자신의 초기치로 나뉘어진 정규화된 (normalized) 량들이다.

Fig. 10에서 Fig. 12는 각 손가락의 접촉력들을 보여 주고 Fig. 13에서 Fig. 15는 비틀림모멘트를

나타낸다. Fig. 16에서 Fig. 18은 각 손가락들의 관절속도를 나타내고 Fig. 19와 Fig. 20은 미끄럼 구름률과 스핀율을 각각 나타내고 있다. Fig. 19와 Fig. 20에서는 접촉운동이 매 시간단계에서 구름 미끄럼 및 스핀의 조합으로 이루어진다는 것을 보여주고 있고 사실은 Fig. 21의 접촉력과 비틀림 모멘트의 타원율에서도 다시 확인될 수 있다. 만일

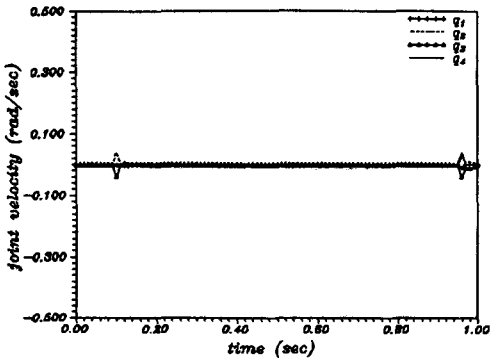


Fig. 16 The joint velocity of Finger I

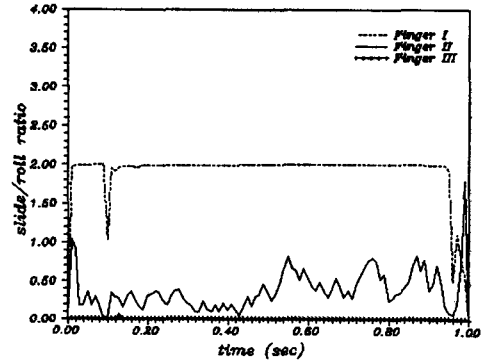


Fig. 19 The slide/roll ratio of each finger

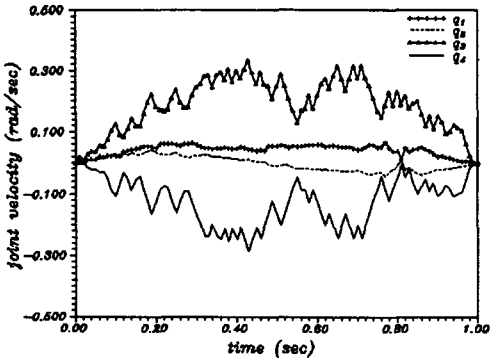


Fig. 17 The joint velocity of Finger II

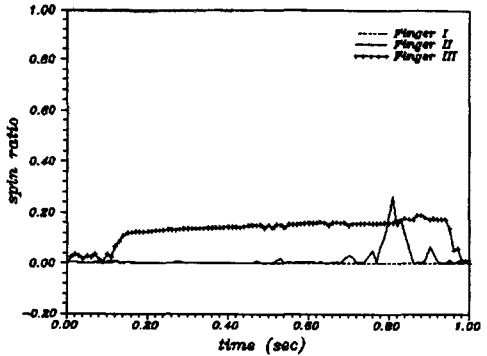


Fig. 20 The spin ratio of each finger

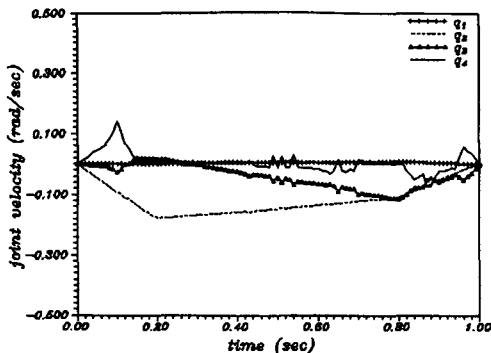


Fig. 18 The joint velocity of Finger III

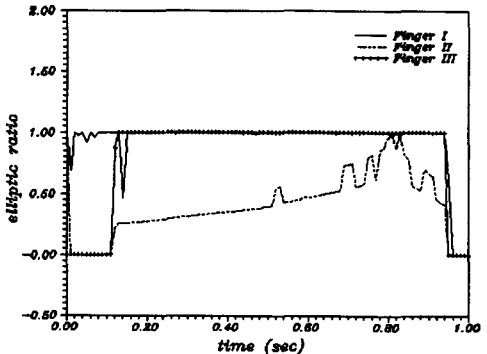


Fig. 21 The elliptic ratio of each finger

접촉운동이 적절히 선정된 목적함수에 의하여 조정될 수 있다면 작업조건에 따라 사용자의 기호에 유리한 해를 얻을 수 있다. Finger III에서는 마찰한계보다 훨씬 적은 접선력으로도 비틀림모멘트의 영향으로 상대운동이 발생하는 것을 관찰할 수 있다.

6. 결 론

다지 로봇손을 이용하여 파지된 물체에 원하는 운동을 유발시키기 위한 계층적인 오프라인 계획법이 소프트핑거 접촉 모델을 가정하여 제안되었다. 하층계획을 위하여 접촉점에서의 상대속도에 의하여 예견되는 접촉모드에 따라 각기 다른 비선형 최적화 문제가 수식화되고 관절속도와 접촉력에 대하여 풀어진다. 이 방법은 관련된 접촉모드에 해당되는 방정식들만이 수식화에 포함되고 매 시간단계에서 접촉모드에 따라 필요한 방정식들이 바뀐다는 의미에서 효율적이며 일반적이라고 할 수 있다. 이 방법은 또한 접촉점에서의 상대운동을 구체적인 접촉모드를 가정하거나 특수한 접촉모드만으로 제한하지 않고 일반적인 상대운동을 고려하였기 때문에 작업조건이나 사용자의 기호에 맞게 적절히 성능지수를 선택함으로써 모든 경우의 운동계획에 적용될 수 있을 것으로 사료된다. 다만 수식화를 구성하는 과정에서 접촉력공간이나 직교좌표공간 외에 관절공간에서의 실질적인 구속조건이 포함되어 있지 않기 때문에 항상 성능지수에 관절공간의 항이 포함되어야 유용한 해가 보장된다는 점이 고려되어야 한다. 세계의 손가락을 갖는 로봇손을 이용하여 구를 회전시키는 경우의 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 유효성을 검증하였다.

참고문헌

- (1) Kerr, J. R., 1984, *An Analysis of Multi-fingered Hands*, Ph. D. Dissertation, Mechanical Engineering, Stanford University.
- (2) Li, Z., Hsu, P. and Sastry, S., 1989, "Grasping and Coordinated Manipulation by a Multifingered Hand," *The Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 8, No. 4, pp.33~50.
- (3) Cole, A.A., Hsu, P. and Sastry, S., 1989, "Dynamic Regrasping by Coordinated Control of Sliding for a Multifingered Hand," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 781~786.
- (4) Montana, D.J., 1988, "the Kinematics of Contact and Grasp," *The Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 7, No. 3, pp. 17~32.
- (5) Kao, I. and Cutkosky, M.R., 1992, "Quasistatic Manipulation with Compliance and Sliding," *The Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 11, No. 1, pp. 20~40.
- (6) Kao, I., 1990, *Quasistatic Manipulation with Compliance and Friction*, Ph. D. Dissertation, Mechanical Engineering, Stanford University.
- (7) Sarkar, N., Yun, X. and Kumar, V., 1993, "Dynamic Control of 3-D Rolling Contacts in Two Arm Manipulation," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 978~983.
- (8) Nagai, K. and Yoshikawa, T., 1993, "Dynamic Manipulation/Grasping Control of Multifingered Robot Hands," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1027~1033.
- (9) Chong, N. Y., Choi, D. H. and Suh, I.H., 1993, "A Finite Motion Planning Strategy for for Multifingered Robotic Hands Considering Sliding and Rolling Contacts," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 180~187.
- (10) Chong, N. Y., Choi, D. H. and Suh, I. H., 1993, "A Generalized Motion/Force Planning Strategy for Multifingered Hands Using both Rolling and Sliding Contacts," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 113~120.
- (11) Fearing, R.S., 1986, "Implementing a Force Strategy for Object Re-orientation," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 96~102.
- (12) Trinkle, J. C., 1989, "A Quasi-Static Analysis of Dextrous Manipulation with Sliding and Rolling Contacts," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 788~793.
- (13) Howe, R. D., Kao, I. and Cutkosky, M. R., 1988, "The Sliding of Robot Fingers Under Combined Torsion and Shear Loading," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.103~105.
- (14) Kim, M. S. and Choi, D.H., 1990, *IDOL V1.5P User's Guide*, Applied Mechanics & Optimal Design Lab., Dept. of Mechanical Design & Production Engineering., Hanyang University.