

< 논문 >

로봇 손에 의한 자유곡면 물체의 파지 및 조작에 관한 운동학

황 창 순*

(2004년 2월 21일 접수, 2004년 6월 2일 심사완료)

Kinematics of Grasping and Manipulation of Curved Surface Object with Robotic Hand

Chang-Soon Hwang

Key Words: Robotic Hand(로봇 손), Fingertip Surface Grasping(손가락 표면 파지), Fingertip Surface Manipulation(손가락 표면 조작), Curved Surface Object(자유곡면 물체), Inverse Kinematics(역 운동학)

Abstract

Kinematics of grasping and manipulation by a multi-fingered robotic hand where multi-fingertip surfaces are in contact with an object is solved. The surface of the object was represented by B-spline surfaces in order to model the objects of various shapes. The fingers were modeled by cylindrical links and a half ellipsoid fingertip. Geometric equations of contact locations have been solved for all possible contact combinations between the fingertip surface and the object. The simulation system calculated joint displacements and contact locations for a given trajectory of the object. Since there are no closed form solutions for contact or intersection between these surfaces, kinematics of grasping was solved by recursive numerical calculation. The initial estimate of the contact point was obtained by approximating the B-spline surface to a polyhedron. As for the simulation of manipulation, exact contact locations were updated by solving the contact equations according to the given contact states such as pure rolling, twist-rolling or slide-twist-rolling. Several simulation examples of grasping and manipulation are presented.

1. 서론

인간의 손과 같이 정밀하고 다양한 작업이 가능한 범용적인 로봇 손은 우주, 심해, 원자로 등과 같이 인간이 직접 작업할 수 없는 극한적인 장소에서 절실히 요구되고 있지만, 제작과 사용이 어렵기 때문에 아직 개발되고 있는 상태이다. 이와 같이 개발이 늦어진 이유로는 액추에이터(actuator), 구동기구에 대한 소형화의 곤란 등과 같은 하드웨어적인 문제와 각종 센서의 정보를 이용하여 감각계와 제어계를 결합하기 위

한 협조적인 제어기술의 미완성 등과 같은 소프트웨어적인 문제를 생각할 수 있다. 다기능의 범용적인 로봇 손을 실현하기 위해서 물체의 파지(grasping) 및 조작(manipulation)에 관한 연구가 대단히 중요하며, 지금까지 많은 연구가 이루어졌고, 적어도 손가락 끝(fingertip)에 의한 물체의 파지 및 조작의 문제를 해석하는 운동학과 역학은 거의 해명된 상태이다.^(1~6) 하지만, Fig. 1과 같이 인간의 손가락은 물건을 파지하여 조작하는 경우에 손가락 표면(fingertip surface)을 널리 사용하고 물체와의 접촉점도 손가락 및 물체의 표면 위를 이동한다. 따라서 인간의 손과 같이 다기능의 범용적인 로봇 손을 개발하기 위해서 손가락 표면을 적극적으로 이용

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

하는 물체의 파지 및 조작을 고찰할 필요가 있다.^(7~9) 본 연구에서는 부분적으로 언급된 손가락 표면에 의한 물체의 파지 및 조작에 관한 문제를 통일적으로 논하기 위해서 파지 및 조작에 관한 운동학 및 역학적 문제의 분류, 운동의 유지에 필요한 손가락의 수와 자유도 등과 같은 일반론을 정리했고, 직선, 원통, 구 등과 같이 비교적 간단한 형상의 물체와 손가락 표면의 접촉 문제를 해석했다.⁽¹⁰⁾ 그리고 남겨진 문제는 복잡한 형상 물체와 손가락 표면의 접촉 문제를 해석하는 것이고, 현실적으로 존재하는 복잡한 형상의 물체를 표현하는 방법이 문제의 요점이 된다.

본 논문의 목적은 복잡한 형상의 물체를 다루는 방법을 고찰하는 것이며, 복잡한 형상의 물체를 B-스플라인 곡면으로 표현하고, 손가락 표면에 의한 B-스플라인 곡면 물체의 파지 및 조작의 운동학을 해석하고, 해석용 시뮬레이션 시스템을 개발하여 파지 및 조작에 관한 운동학적 문제의 시뮬레이션을 행하는 것이다.

본 논문에서 손가락과 물체의 접촉은 언제나 손가락 표면에서 일어나고, 접촉면은 미소하여 1점 접촉으로 간주하고, 로봇 손의 모든 관절은 독립적으로 구동되고, 물체의 형상, 크기, 위치, 방향 등과 같이 파지 및 조작에 필요한 정보는

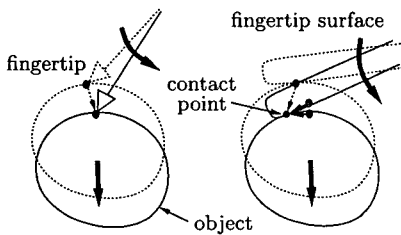


Fig. 1 Manipulation by fingertip and fingertip surface

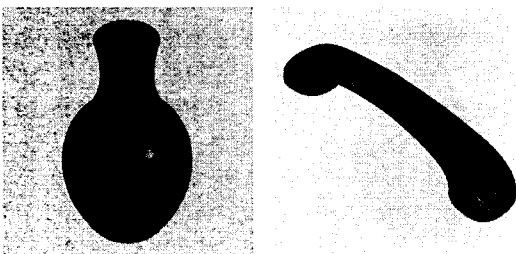


Fig. 2 Examples of B-spline surface object

사전에 주어지는 것으로 가정한다. 그리고 물체의 파지는 로봇 손의 가능한 모든 링크를 사용하여 수행하고, 물체의 조작은 준정적인(quasi-static) 운동이 되도록 수행한다.

2. B-스플라인 곡면 물체와 로봇 손

2.1 B-스플라인 곡면 물체

로봇 손에 의한 작업성능은 다양한 형상의 물체를 파지 및 조작하는 것으로 향상될 수 있다. 실존하는 복잡한 형상의 물체를 자유곡면으로 표현할 경우에 자유곡면의 표현방법은 다음의 조건을 만족할 필요가 있다.

- 의도하는 형상이 간단히 표현될 것
- 형상의 부분적인 변형과 전체적인 변형이 간단할 것
- 복수의 곡면을 부드럽고 간단하게 연결할 수 있을 것

이와 같은 기능을 실현하기 위해서 CAD 시스템에서 이용되는 자유곡면의 표현방법으로 Coons 곡면, Bezier 곡면, B-스플라인 곡면이 있다. 특히 B-스플라인 곡면은 위의 조건을 잘 만족하기 때문에 널리 이용되고 있다.

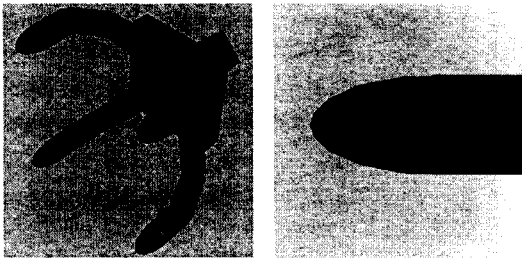
B-스플라인 곡면의 표현에는 조정점(control points)으로 곡면을 생성하는 방법과 실제 점(data points)으로 곡면을 생성하는 방법이 있다. 어느 방법이나 다음과 같은 조정점에 의한 곡면의 표현식으로 나타낼 수 있다.^(11~13)

$$R(u, v) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M_{i,k}(u) N_{j,l}(v) P_{i,j} \quad (1)$$

여기서 u, v 는 매개변수, $M_{i,k}(u), N_{j,l}(v)$ 는 u, v 방향의 B-스플라인 기저 함수(basis function), k, l 은 u, v 방향의 오더(order), $P_{i,j}$ 는 B-스플라인 곡면의 조정점 좌표이며 그 수는 $(m \times n)$ 개이다. 본 논문에서 취급하는 물체의 표면은 Fig. 2와 같이 B-스플라인 함수로 표현되고, 조정점으로 곡면을 생성하는 방법을 사용하기로 한다.

2.2 다관절의 로봇 손

시뮬레이션 시스템에서 사용하는 로봇 손은 Fig. 3과 같이 인간의 형상을 닮은 손가락으로 이루어져 있다. 손가락의 제1, 2 링크는 원통 모



4 fingers
3 links per finger (total 12 links)
4 DOF per finger (total 16 DOF)

Fig. 3 Shape of multi-fingered robotic hand and fingertip

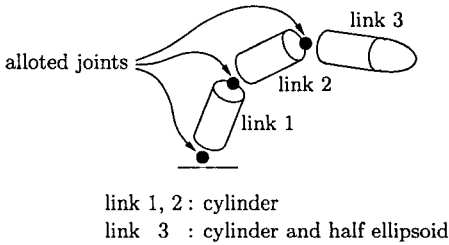


Fig. 4 Finger configuration

양, 끝 부분인 제3 링크는 원통과 타원체가 반반씩 연결된 모양이다 (Fig. 4). 타원체의 손가락 끝 부분에 의해 원통인 경우보다 물체를 조작하는 부분이 넓어진다. 모든 관절은 회전관절이고, 각 손가락의 자유도는 Pure rolling 운동, Twist-rolling 운동, Slide-twist-rolling 운동이 가능하도록 4 자유도이다 (Fig. 17).⁽¹⁰⁾ 제1 링크의 밑 부분에 2 자유도, 제2 링크의 밑 부분에 1 자유도, 제3 링크의 밑 부분에 1 자유도가 배치되어 있다. 손가락의 수는 작업의 안정성을 고려하여 4개로 했다.

3. 손가락 표면에 의한 파지의 운동학

자유도가 m 인 손가락의 관절각 벡터를 $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_m)^T$, $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ 를 물체와 접촉하고 있는 손가락 링크의 기준점(base point)에 고정된 3 단위 벡터, \mathbf{r}_f 를 물체와 접촉하고 있는 손가락 링크의 기준점에 고정된 위치 벡터, $\mathbf{r}(u)$ 를 B-스플라인 곡선, $\mathbf{r}(u, v)$ 를 B-스플라인 곡면, \mathbf{r}_w 를 물체의 대표점, \mathbf{r}_c 를 손가락과 물체의 접촉점이라고 한다. 여기서 u, v 는 B-스플라인의 매개변수이다. 모든 벡터는 정좌표계를 기

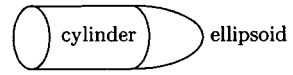


Fig. 5 Shape of fingertip

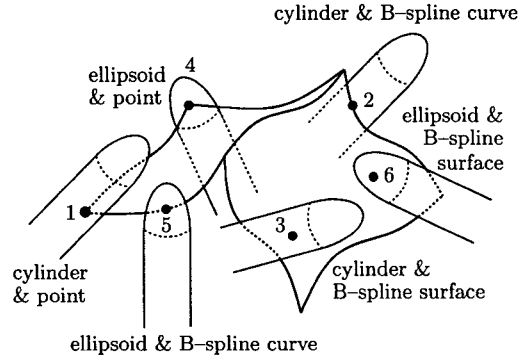


Fig. 6 Cases of contact with B-spline surface

준으로 한다. 그리고 θ_1 은 구하고자 하는 관절각, θ_2 는 손가락의 원통 부분을 나타내는 매개변수, θ_3 는 손가락의 타원체 부분을 나타내는 매개변수이다.

손가락 표면에 의한 파지의 문제는 손가락의 링크 구조, 물체의 형상 및 크기를 알고 있는 경우에 2 종류의 전 운동학(forward kinematics) 문제와 2 종류의 역 운동학(inverse kinematics) 문제로 분류된다.⁽¹⁰⁾ 본 논문에서는 「물체의 위치 및 방향」에서 「손가락의 관절각 및 접촉점의 위치」를 구하는 파지의 역 운동학에 관한 문제를 다루기로 한다.

3.1 손가락과 물체의 접촉조건과 접촉종류

손가락 표면과 물체가 접촉하는 조건은 손가락 표면과 물체 표면이 공유점을 가질 것, 공유점에서의 손가락과 물체의 법선 벡터가 평행할 것, 이렇게 두 가지이다.⁽¹⁰⁾

본 논문에서 다루는 로봇 손의 형상은 Fig. 5와 같이 원통과 타원체의 2 종류로 이루어져 있다. 따라서 로봇 손과 B-스플라인 곡면 물체의 접촉은 Fig. 6와 같이 6 종류로 분류될 수 있다.

- 1) 원통과 점의 접촉 (꼭지점)
- 2) 원통과 B-스플라인 곡선의 접촉 (모서리)
- 3) 원통과 B-스플라인 곡면의 접촉 (면)
- 4) 타원체와 점의 접촉
- 5) 타원체와 B-스플라인 곡선의 접촉

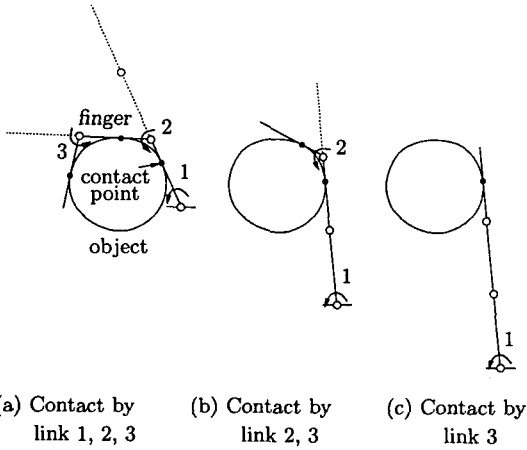


Fig. 7 Procedure of grasping

6) 타원체와 B-스플라인 곡면의 접촉

본 논문에서 각각의 접촉문제를 풀기로 한다.

주어진 물체에 관한 파지는 Fig. 7에 설명된 순서로 다음과 같이 이루어질 수 있다.

- 1) 굴신(bend & extend) 방향 이외의 손가락 관절을 고정하고 손가락을 똑바로 편다.
- 2) 가장 밑 부분의 손가락 관절부터 물체를 향하여 구부린다.
- 3) 손가락과 물체가 접촉하면 회전을 멈추고, 다음 관절을 굽힌다.
- 4) 이런 동작을 마지막 관절까지 순서대로 행한다.

물체의 형상, 크기 및 방향이 주어진 경우, 주어진 순서에 의해 파지에 따른 손가락의 관절각과 접촉점의 위치를 구할 수 있다.

3.2 파지의 역 운동학

파지의 역 운동학은 「물체의 위치 및 방향」에서 「손가락의 관절각 및 접촉점의 위치」를 구하는 문제이다.

3.2.1 원통과 B-스플라인 곡면

손가락의 원통 부분과 물체의 B-스플라인 곡면 부분과의 접촉문제를 푼다. Fig. 8에서 원통과 B-스플라인 곡면의 접촉조건은

$$I-1. \mathbf{r}_c = \mathbf{r}_{finger} = \mathbf{r}_{object}$$

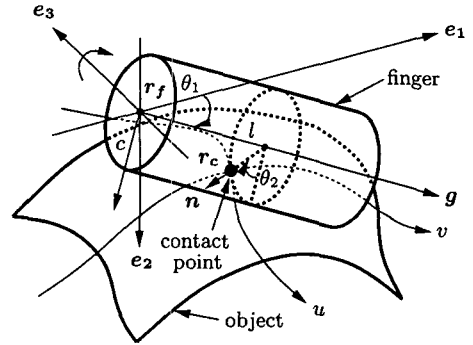


Fig. 8 Contact of cylinder and B-spline surface

$$I-2. (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{n}) = 0$$

$$I-3. (\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{n}) = 0$$

이다. 여기서 \mathbf{r}_{finger} 는 손가락 위의 접촉점으로 l, θ_1, θ_2 의 함수이고(식 (4)), \mathbf{r}_{object} 는 물체 위의 접촉점으로 u, v 의 함수이고, $\mathbf{t}_u, \mathbf{t}_v$ 는 u, v 방향의 B-스플라인 곡면의 접선 벡터로

$$\mathbf{t}_u = \frac{\partial \mathbf{r}(u, v)}{\partial u}, \quad \mathbf{t}_v = \frac{\partial \mathbf{r}(u, v)}{\partial v} \quad (2)$$

u, v 의 함수이고, θ_1 는 \mathbf{e}_3 중심의 회전각, \mathbf{g} 는 원통 중심축의 방향 벡터로 θ_1 의 함수이고(식 (3)), θ_2 는 \mathbf{g} 중심의 회전각, \mathbf{n} 은 원통의 법선 벡터로 θ_1, θ_2 의 함수이고(식 (30)), l 은 접촉점에서 \mathbf{g} 에 내린 수선의 발에서 손가락의 기준점(\mathbf{r}_f)까지의 거리, c 는 원통의 반경이고, $C_i = \cos \theta_i, S_i = \sin \theta_i$ 이라고 한다.

$$\mathbf{g} = [\mathbf{e}_1 \ \mathbf{e}_2 \ \mathbf{e}_3] \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{e}_1 C_1 + \mathbf{e}_2 S_1 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{finger} &= \mathbf{r}_f + l\mathbf{g} + c\mathbf{n} \\ &= c((\mathbf{e}_2 C_1 - \mathbf{e}_1 S_1)C_2 + \mathbf{e}_3 S_2) \\ &\quad + l(\mathbf{e}_1 C_1 + \mathbf{e}_2 S_1) + \mathbf{r}_f \end{aligned} \quad (4)$$

원통과 B-스플라인 곡면의 접하는 조건 I-2, I-3은 B-스플라인 곡면의 접선 벡터($\mathbf{t}_u, \mathbf{t}_v$)와 원통의 법선 벡터(\mathbf{n})가 서로 직교하여 2 벡터의 내적이 영인 것이고, 원통의 법선 벡터가 식 (30)이므로

$$((\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_2)C_1 - (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_1)S_1)C_2 + (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_3)S_2 = 0 \quad (5)$$

$$((\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_2)C_1 - (\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_1)S_1)C_2 + (\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_3)S_2 = 0 \quad (6)$$

이 된다. 식 (5), (6)에서 θ_2 를 소거하여 θ_1 에 대해 정리하면 식 (7)을 얻는다. 그리고 식 (5)에서 식 (8)을 얻게 된다. 여기서 식 (7), (8)은 u, v 의 함수이다.

$$\theta_1(u, v) = \arctan\left(\frac{P_1}{Q_1}\right) \quad (7)$$

$$\theta_2(u, v) = \arctan\left(\frac{P_2}{Q_2}\right) \quad (8)$$

$$P_1 = (t_u \cdot e_3)(t_v \cdot e_2) - (t_u \cdot e_2)(t_v \cdot e_3)$$

$$Q_1 = (t_u \cdot e_3)(t_v \cdot e_1) - (t_u \cdot e_1)(t_v \cdot e_3)$$

$$P_2 = (t_u \cdot e_1)S_1 - (t_u \cdot e_2)C_1$$

$$Q_2 = (t_u \cdot e_3)$$

식 (5), (6)에서 2개의 θ_2 가 구해지는 것 같지만, t_v 를 t_u 와 $t_u \times n$ 의 일차결합(linear combination)으로 표현할 수 있으므로 식 (5), (6)은 같은 의미를 가지며 1개의 θ_2 를 얻을 수 있다.

접하는 조건 I-1은 원통과 B-스플라인 곡면이 공유점을 갖는 것으로, 식 (4)를 대입하여 정리하면

$$F_1(u, v, l) = l(e_1 C_1 + e_2 S_1) + r_f - r_{object} + c((e_2 C_1 - e_1 S_1)C_2 + e_3 S_2) = 0 \quad (9)$$

이 된다. 식 (9) $\times (e_1 C_1 + e_2 S_1)$ 을 정리하여 l 을 소거하면 다음과 같은 u, v 의 벡터 방정식을 얻는다.

$$F_2(u, v) = (e_1 C_1 + e_2 S_1) \times (r_f - r_{object}) + c((e_1 S_1 - e_2 C_1)S_2 + e_3 C_2) = 0 \quad (10)$$

식 (10)은 미지수가 2개인 벡터 방정식 (3개의 식)이지만, 그 중에서 2개의 식이 독립적이다. 따라서 독립적인 2 식에서 수치해석적인 방법으로 u, v 를 구할 수 있고, θ_1, θ_2 , 접촉점(r_c)도 얻어진다. 손가락의 원통 부분과 물체의 B-스플라인 곡선 부분과의 접촉문제도 같은 방법으로 풀 수 있다.

3.2.2 타원체와 B-스플라인 곡면

손가락의 타원체 부분과 물체의 B-스플라인 곡면 부분과의 접촉문제를 푼다. Fig. 9에서 타원체와 B-스플라인 곡면의 접촉조건은

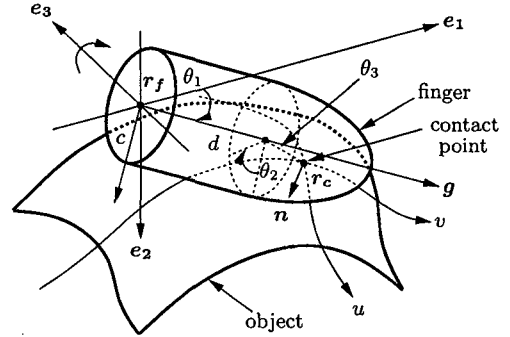


Fig. 9 Contact of ellipsoid and B-spline surface

$$\text{II-1. } r_c = r_{finger} = r_{object}$$

$$\text{II-2. } (t_u \cdot n) = 0$$

$$\text{II-3. } (t_v \cdot n) = 0$$

이다. 여기서 r_{finger} 는 손가락 위의 접촉점으로 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 의 함수이고(식 (12)), n 은 타원체의 법선 벡터로 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 의 함수이고(식 (31)), θ_3 는 타원체를 나타내는 매개변수, h 는 타원체의 중심부터 접촉점까지의 위치 벡터, d 는 원통 부분의 길이, a, b 는 타원체의 장축과 단축의 반지름이다.

$$h = [e_1 \ e_2 \ e_3] \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & -S_2 \\ 0 & S_2 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} aC_3 \\ bS_3 \\ 0 \end{bmatrix} \\ = a(e_1 C_1 + e_2 S_1)C_3 + b((e_2 C_1 - e_1 S_1)C_2 + e_3 S_2)S_3 \quad (11)$$

$$r_{finger} = r_f + dg + h \\ = a(e_1 C_1 + e_2 S_1)C_3 + b((e_2 C_1 - e_1 S_1)C_2 + e_3 S_2)S_3 + d(e_1 C_1 + e_2 S_1) + r_f \quad (12)$$

타원체와 B-스플라인 곡면의 접하는 조건 II-2, II-3은 B-스플라인 곡면의 2 접선 벡터와 타원체의 법선 벡터가 서로 직교하는 것이고, 타원체의 법선 벡터가 식 (31)이므로

$$a(((t_u \cdot e_2)C_1 - (t_u \cdot e_1)S_1)C_2 + (t_u \cdot e_3)S_2)S_3 + b(((t_u \cdot e_1)C_1 + (t_u \cdot e_2)S_1)C_3) = 0 \quad (13)$$

$$a(((t_v \cdot e_2)C_1 - (t_v \cdot e_1)S_1)C_2 + (t_v \cdot e_3)S_2)S_3 + b(((t_v \cdot e_1)C_1 + (t_v \cdot e_2)S_1)C_3) = 0 \quad (14)$$

이 된다. 식 (13), (14)에서 θ_3 를 소거하여 θ_2 에 대해 정리하면, 식 (15)를 얻는다. 그리고 식 (13)에서 식 (16)를 얻게 된다. 여기서 식 (15), (16)는 u, v, θ_1 의 함수이다.

$$\theta_2(u, v, \theta_1) = \arctan\left(\frac{P_3}{Q_3}\right) \quad (15)$$

$$\theta_3(u, v, \theta_1) = \arctan\left(\frac{P_4}{Q_4}\right) \quad (16)$$

$$P_3 = (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_1)(\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_2) - (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_2)(\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_1)$$

$$Q_3 = ((\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_3)(\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_1) - (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_1)(\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_3))C_1 \\ + ((\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_3)(\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_2) - (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_2)(\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_3))S_1$$

$$P_4 = b((\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_1)C_1 + (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_2)S_1)$$

$$Q_4 = a(((\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_1)S_1 - (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_2)C_1)C_2 - (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_3)S_2)$$

접하는 조건 II-1은 타원체와 B-스플라인 곡면이 공유점을 갖는 것으로, 식 (12)를 대입하여 정리하면 다음과 같은 u, v, θ_1 의 벡터 방정식을 얻는다.

$$\mathbf{F}_3(u, v, \theta_1) = a(\mathbf{e}_1 C_1 + \mathbf{e}_2 S_1)C_3 \\ + b((\mathbf{e}_2 C_1 - \mathbf{e}_1 S_1)C_2 + \mathbf{e}_3 S_2)S_3 \\ + d(\mathbf{e}_1 C_1 + \mathbf{e}_2 S_1) + \mathbf{r}_f - \mathbf{r}_{object} = \mathbf{0} \quad (17)$$

식 (17)은 미지수가 3개인 벡터 방정식이므로 독립적인 3 식에서 수치해석적인 방법으로 u, v, θ_1 을 구할 수 있고, θ_2, θ_3 , 접촉점(\mathbf{r}_c)도 얻어진다. 손가락의 타원체 부분과 물체의 B-스플라인 곡선 부분과의 접촉문제도 같은 방법으로 풀 수 있다.

손가락의 원통 부분과 점의 접촉은 점을 반경이 영인 구로 생각하고 원통과 구의 접촉⁽¹⁰⁾에서 풀 수 있다. 손가락의 타원체 부분과 점의 접촉도 같은 방법으로 풀 수 있다.

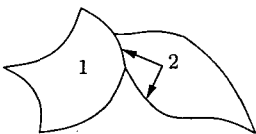


Fig. 10 Parts of B-spline surface

3.3 접촉문제의 해법

B-스플라인 곡면은 Fig. 10의 1(매끄러운 곡면)과 같이 비중복 절점(non-multiple knot values) 부분과 Fig. 10의 2(날카로운 모서리)와 같이 중복 절점(multiple knot values) 부분으로 나눌 수 있다. 형상과 중복을 고려하여 임의로 정한 절점 벡터(knot vector)가 $\{0, 0, 0, 1, 2, 2, 3, 4, 4, 4\}$ 인 경우, 절점 1, 3과 같이 중복되어 나타나지 않는 비중복 절점의 부근에서 B-스플라인 곡면의 미분 연속성이 보장되고, 절점 0, 2, 4와 같이 중복되어 나타나는 중복 절점의 부근에서 B-스플라인 곡면의 미분 연속성이 보장되지 않는다.⁽¹⁴⁾ 일반적으로 B-스플라인 곡면은 비중복 절점 부분에서 접선 벡터가 연속적으로 변하기 때문에 요철이 없는 형상이 되고, 중복 절점 부분에서 접선 벡터가 불연속적으로 변하기 때문에 요철이 있는 형상이 된다. B-스플라인 곡면의 접촉문제를 고찰하는 경우, Fig. 10과 같이 비중복 절점 부분과 중복 절점 부분으로 나누어서 생각할 필요가 있다.

B-스플라인 곡면의 비중복 절점 부분은 각 매개변수의 방향으로 (오더-2)차까지의 미분 연속성이 보장된다. 식 (10), (17)의 비선형 연립 방정식은 일반적으로 Newton-raphson 방법과 같은 수치해석적인 방법으로 풀 수 있지만, 어떤 방법이든지 실제의 해와 차이가 큰 초기치에서 계산을 시작하면 발산할 가능성이 있다. 이 문제점을 극복하기 위해 다음과 같은 순서로 해를 구한다.

Step 1. B-스플라인 곡면을 곡면 위의 점으로 표현된 다면체 근사(polyhedron approximation)로 바꾼다(Fig. 11).

Step 2. 다면체 근사는 직선의 집합이므로 원통과 직선의 접촉⁽¹⁰⁾을 풀어서 u, v 의 초기치를 정한다. 원통과 다면체의 접촉에는 다수의 해가 존재할 수 있으나, 초기위치의 원통이 회

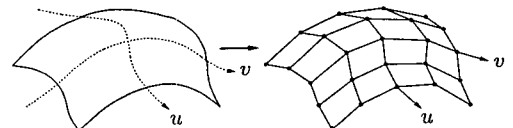


Fig. 11 Polyhedron approximation of B-spline surface

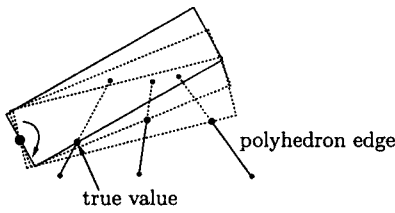


Fig. 12 True value for contact of cylinder and straight line

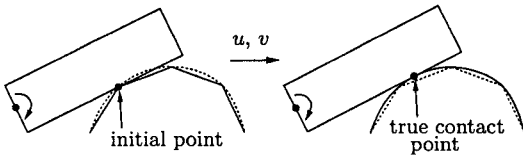


Fig. 13 True contact point of cylinder and B-spline surface

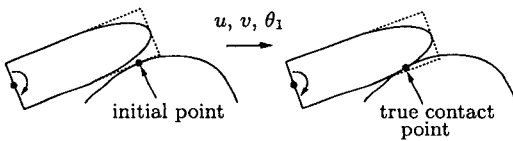


Fig. 14 True contact point of ellipsoid and B-spline surface

전하여 처음으로 다면체 근사의 모서리 직선과 만나는 곳이 접촉점이 된다. 따라서 초기 위치의 원통과 이루는 회전각도가 가장 작은 것이 접촉점, 접촉각도가 되고, 접촉점에서 u, v 의 초기치를 결정한다 (Fig. 12).

Step 3. 결정된 u, v 의 초기치는 실제의 값과 매우 비슷하기 때문에, 식 (10)에서 수치 해석적인 방법으로 u, v 의 해를 구할 수 있다 (Fig. 13).

Step 4. B-스플라인 곡면이 손가락의 원통 부분과 접촉한다고 가정하고 계산했지만, 접촉점이 손가락의 타원체 영역에 있는 경우, 먼저 구해진 u, v, θ_1 을 초기치로 식 (17)을 수치 해석적으로 풀면 u, v, θ_1 의 해를 구할 수 있다 (Fig. 14).

B-스플라인 곡면은 중복 절점 부분에서 해당 매개변수 방향의 미분 연속성이 보장되지 않는다. 따라서 B-스플라인 곡면의 미분 연속성에 근거한 식 (10), (17)으로 해를 구할 수 없다. B-스플라인 곡면의 중복 절점 부분과의 접촉

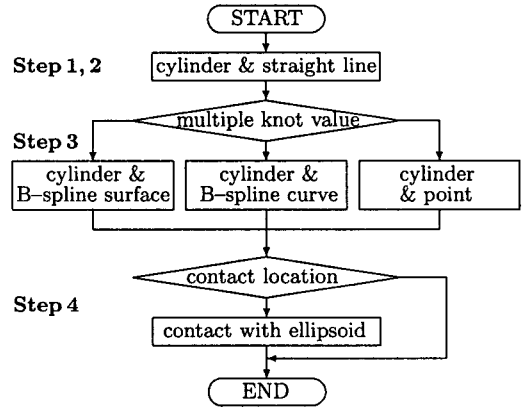


Fig. 15 Algorithm for grasping

은 다음과 같은 알고리즘으로 실제의 해를 구한다 (Fig. 15).

- 1) B-스플라인 곡면의 절점 벡터에서 미분 불연속의 중복 절점을 고른다. 중복 절점 중에 미분 연속인 것도 있으므로, 중복 절점 부근에서 B-스플라인 곡면의 접선 벡터와 B-스플라인 곡면의 좌표를 비교하여 미분 연속의 중복 절점인가, 미분 불연속의 중복 절점인가를 결정한다. 앞으로 미분 불연속의 중복 절점을 중복 절점이라고 한다.
- 2) B-스플라인 곡면을 다면체 근사로 바꾸어 원통과 직선의 접촉을 풀고, u, v, θ_1 의 초기치를 구한다.
- 3) 구한 u, v 의 초기치와 B-스플라인 곡면의 중복 절점을 비교하여, 원통과 B-스플라인 곡면의 접촉인가, 원통과 B-스플라인 곡선의 접촉인가를 결정한다.
- 4) 원통과 B-스플라인 곡면의 접촉은 u, v 의 초기치가 중복 절점과 다른 값인 경우이고, u, v 의 초기치에서 원통과 B-스플라인 곡면의 접촉을 풀어서 u, v, θ_1 및 접촉점(r_c)의 해를 구한다.
- 5) 원통과 B-스플라인 곡선의 접촉은 u, v 의 초기치 중에 한 값이 중복 절점과 매우 비슷한 값이고 한 값이 중복 절점과 다른 값인 경우이다. 매우 비슷한 전자 매개변수의 값을 중복 절점 값에 고정시키고 B-스플라인 곡면을 B-스플라인 곡선으로 생각하고 계산한다. 다른 후자 매개변수 및 θ_1 의 초기치에서 원통과 B-스플라인 곡선의 접촉을 풀어서 후자 매개

변수, θ_1 및 접촉점(r_c)의 해를 구한다.

- 6) 원통과 점의 접촉은 u, v 의 초기치가 중복 절점과 매우 비슷한 값인 경우이고, u, v 의 중복 절점에 해당하는 B-스플라인 곡면 위의 점을 구하고, 원통과 점의 접촉을 풀어서 θ_1 의 해를 구한다.
- 7) 구한 해에서 손가락의 기준점부터 접촉점까지의 거리를 구해서 손가락의 원통 부분과 접촉하고 있는가, 손가락의 타원체 부분과 접촉하고 있는가를 다시 판단한다.
- 8) 손가락의 타원체 부분과 접촉하는 경우, 타원체와의 접촉을 풀어서 실제의 해를 구한다. 계산의 초기치는 원통과의 접촉에서 얻은 값을 사용한다.

4. 손가락 표면에 의한 조작의 운동학

4.1 상대운동에 관한 미소변위의 운동학

본 논문에서 물체의 조작은 언제나 손가락 끝 부분의 링크로 행한다. 손가락 표면에 의한 조작의 문제는 손가락의 링크 구조, 물체의 형상 및 크기를 알고 있는 경우에 2 종류의 전 운동학 문제와 2 종류의 역 운동학 문제로 분류되고, 물체의 조작운동을 유지하는데 필요한 손가락의 수와 자유도가 존재한다.⁽¹⁰⁾ 본 논문에서는 「물체의 위치 및 방향의 미소변위」에서 「손가락의 관절각 및 접촉점의 미소변위」를 구하는 조작의 역 운동학에 관한 문제를 다루기로 한다.

물체의 조작에 관한 역 운동학을 풀기 위해서 물체의 위치 및 방향의 시간적인 변화(미소변위)인 $\delta r_w, \delta \Theta_w$ 가 필요하고, 조작 시작점에서의 물체의 위치 및 방향(r_{w_i}, E_{w_i})과 조작 종료점에서의 물체의 위치 및 방향(r_{w_f}, E_{w_f})을 선

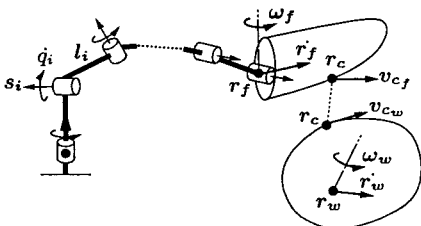


Fig. 16 Velocities of contact points on finger and object

형 보간(linear interpolation)하여 생성한다.⁽¹⁵⁾ 손가락 표면으로 물체를 조작하는 경우, 손가락의 관절각이 변하면 손가락 링크 위의 접촉점이 이동하고, 물체의 위치 및 방향이 변하면 물체 위의 접촉점이 이동한다. Fig. 16와 같이 물체와 접촉하고 있는 손가락 링크 기준점(r_f)의 이동속도를 r'_f , 물체 대표점(r_w)의 이동속도를 r'_w , r_f 의 회전 각속도를 ω_f , r_w 의 회전 각속도를 ω_w , 손가락 위의 접촉점을 r_{c_f} , 물체 위의 접촉점을 r_{c_w} , r_{c_f} 의 상대 이동속도를 r'_{c_f} , r_{c_w} 의 상대 이동속도를 r'_{c_w} 이라고 한다면, 손가락 표면 위의 접촉점의 속도(v_{c_f})와 물체 표면 위의 접촉점의 속도(v_{c_w})는

$$\begin{aligned} v_{c_f} &= r'_f + \omega_f \times (r_{c_f} - r_f) + r'_{c_f} \\ &\equiv J_a \dot{q} + r'_{c_f} \end{aligned} \quad (18)$$

$$v_{c_w} = r'_w + \omega_w \times (r_{c_w} - r_w) + r'_{c_w} \quad (19)$$

이다. 여기서 손가락 관절각의 회전속도(\dot{q}), 손가락 링크 기준점의 회전속도(ω_f), Jacobian(J_a)은

$$\dot{q} = (\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_m)^T \quad (20)$$

$$\omega_f = s_1 \dot{q}_1 + s_2 \dot{q}_2 + \dots + s_m \dot{q}_m \equiv J_s \dot{q} \quad (21)$$

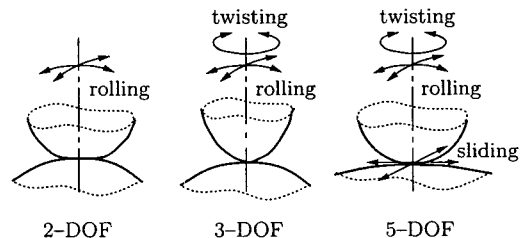
$$J_a = (s_1 \times (r_c - r_1), \dots, s_m \times (r_c - r_f)) \quad (22)$$

$$J_s = (s_1, s_2, \dots, s_m) \quad (23)$$

이고, $J_a \in \mathbb{R}^{3 \times m}$, $J_s \in \mathbb{R}^{3 \times m}$ 이다. 그리고 m 은 손가락의 자유도(관절의 수), s_i 는 제 i 관절 회전축의 방향 벡터, r_i 는 제 i 손가락 링크의 기준점, $i = 1, 2, \dots, m$ 이다(Fig. 16).

Fig. 17과 같이 접촉을 동반하는 2 물체의 상대운동은 다음과 같이 단순하게 분류할 수 있다.⁽¹⁰⁾

1) Pure rolling 운동



(a) Pure rolling (b) Twist-rolling (c) Slide-twist-rolling

Fig. 17 Three types of contact motion

2) Twist-rolling 운동

3) Slide-twist-rolling 운동

굴림(rolling)을 동반하는 상대적 접촉운동의 경우, 식 (18), (19)의 상대속도 r_{c_f} 와 r_{c_w} 가 같다. 그리고 각각의 상대적 접촉운동을 만족하는 조건과 조작운동을 유지하기 위해 필요한 손가락의 수와 자유도가 존재한다.⁽¹⁰⁾ Pure rolling 운동은 접촉점에서 2 물체의 속도 및 법선 중심의 회전속도가 같은 운동이고, 상대 자유도가 굴림의 2 자유도이므로 물체의 6 자유도 운동을 위해 손가락은 4 이상의 자유도를 가질 필요가 있다. Twist-rolling 운동은 접촉점에서 2 물체의 속도가 같은 운동이고, 상대 자유도가 비틀림(twisting)의 1 자유도, 굴림의 2 자유도인 합계 3 자유도이므로 손가락은 3 이상의 자유도를 가질 필요가 있다. Slide-twist-rolling 운동은 접촉점에서 2 물체의 법선 방향의 속도가 같은 운동이고, 상대 자유도가 비틀림의 1 자유도, 굴림의 2 자유도, 미끄러짐(sliding)의 2 자유도인 합계 5 자유도이므로 손가락은 1 이상의 자유도를 가질 필요가 있다.

4.2 조작의 역 운동학

물체의 조작에 관한 역 운동학은 Pure rolling 운동, Twist-rolling 운동, Slide-twist-rolling 운동에 관해 주어진 물체의 위치 및 방향의 미소변위(δr_w , $\delta \Theta_w$)에서 손가락 관절각의 미소변위(δq)를 구하는 문제이다. 여기서 운동하기 전의 접촉점과 관절각, 물체의 위치 및 방향 등은 알고 있는 것으로 한다. 손가락의 법선 벡터를 n 이라고 한다면, 접촉점에서 2 물체의 속도 및 법선 중심의 회전속도가 같아야 한다($v_{c_f} = v_{c_w}$, $(\omega_f \cdot n) = (\omega_w \cdot n)$)는 Pure rolling 운동의 조건에서

$$\delta q = \begin{pmatrix} J_a \\ n^T J_s \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \delta r_w + \delta \Theta_w \times (r_c - r_w) \\ (\delta \Theta_w \cdot n) \end{pmatrix} \quad (24)$$

인 $\delta q \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ 를 얻는다. 그리고, 접촉점에서 2 물체의 속도가 같아야 한다($v_{c_f} = v_{c_w}$)는 Twist-rolling 운동의 조건에서

$$\delta q = J_a^{-1} (\delta r_w + \delta \Theta_w \times (r_c - r_w)) \quad (25)$$

인 $\delta q \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 를 얻는다. 그리고, 접촉점에서 2 물체의 법선 방향의 속도가 같아야 한다($(v_{c_f} \cdot n) =$

$(v_{c_w} \cdot n)$)는 Slide-twist-rolling 운동의 조건에서

$$\delta q = \frac{((\delta r_w + \delta \Theta_w \times (r_c - r_w)) \cdot n)}{(J_a \cdot n)} \quad (26)$$

인 $\delta q \in \mathbb{R}^{1 \times 1}$ 를 얻는다. 물체를 조작하는 도중에 손가락이 특이 자세가 되면 관절각의 미소변위에 대한 해가 존재하지 않게 되므로 지정한 접촉운동을 행할 수 없게 된다. 식 (24)에서 손가락이 전체적 또는 부분적으로 일직선으로 뻗은 경우에 접촉점의 위치(r_c) 및 접촉 법선의 방향(n)에 따라서 관절각의 미소변위(δq)가 존재하지 않을 수 있다. 식 (25)에서 손가락이 전체적 또는 부분적으로 일직선으로 뻗은 경우에 r_c 에 따라서 δq 가 존재하지 않을 수 있다. 그리고 식 (26)에서 J_a 와 n 가 서로 직교하여 $(J_a \cdot n) = 0$ 인 경우에 δq 가 존재하지 않는다. 각각의 운동조건에서 미소변위가 결정되고, 미소변위(δq , δr_w , $\delta \Theta_w$) 만큼 이동한 후의 손가락, 물체의 위치 및 방향은

$$q_{new} = q_{old} + \delta q \quad (27)$$

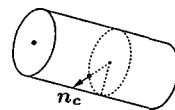
$$r_{w_{new}} = r_{w_{old}} + \delta r_w \quad (28)$$

$$E_{w_{new}} = E_{w_{old}} + \delta \Theta_w \times E_w \quad (29)$$

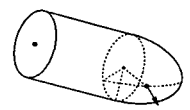
이 된다. 이 계산을 반복함으로써 일련의 조작운동을 표현할 수 있다. 새로운 접촉점은 새로운 q , r_w , Θ_w 에 근거하여 파지의 역 운동학으로 구하면 더욱 정확한 값을 얻을 수 있다.⁽¹⁰⁾

손가락이 원통과 타원체로 구성되어 있으므로, Fig. 18과 같이 손가락의 원통 부분에 의한 조작은 원통의 법선 벡터 n_c (식 (30))를 이용하고, 손가락의 타원체 부분에 의한 조작은 타원체의 법선 벡터 n_e (식 (31))를 이용한다.

$$n_c = [e_1 \ e_2 \ e_3] \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & -S_2 \\ 0 & S_2 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ = (e_2 C_1 - e_1 S_1) C_2 + e_3 S_2 \quad (30)$$



(a) Cylindrical part



(b) Ellipsoidal part

Fig. 18 Normal vectors

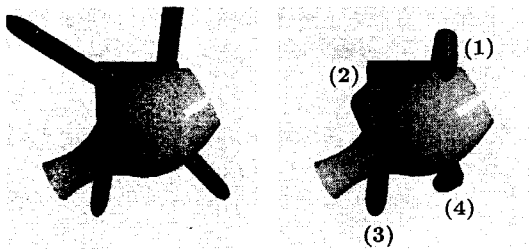
$$\begin{aligned} \mathbf{n}_e &= A_e [e_1 \ e_2 \ e_3] \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & -S_2 \\ 0 & S_2 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} bC_3 \\ aS_3 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= A_e (b(e_1 C_1 + e_2 S_1) C_3 \\ &\quad + a((e_2 C_1 - e_1 S_1) C_2 + e_3 S_2) S_3) \end{aligned} \quad (31)$$

$$A_e = \frac{1}{\sqrt{(bC_3)^2 + (aS_3)^2}}$$

시뮬레이션에 사용하는 다관절의 로봇 손은 1 손가락에 4 자유도를 가정하고, 상대적 접촉운동의 종류에 따라서 사용하는 관절을 선택하고, 필요최소한의 관절을 사용함으로써 접촉운동을 유일하게 결정할 수 있도록 한다. Pure rolling 운동은 제1, 2, 3, 4 관절을, Twist-rolling 운동은 제2, 3, 4 관절을, Slide-twist-rolling 운동은 제4 관절을 사용한다. 그리고 손가락이 일직선으로 뻗는 것과 같은 특이 자세가 되면 지정한 접촉운동을 행할 수 없기 때문에 물체를 재파지(regrasping)함으로써 손가락의 자세를 바꾼 후에 물체의 조작을 계속하기로 한다. 새로운 손가락 자세는 인간이 시뮬레이션 화면을 보고 결정한다.

5. 시뮬레이션 시스템의 개발

개발한 시뮬레이션 시스템은 다관절의 로봇 손을 사용하여 B-스플라인 곡면 물체의 파지 및 조작의 역 운동학 문제를 해석하고, 그 결과를 컴퓨터의 화면 위에 3차원의 화상으로 표시하여 해석 방법의 유효성을 확인할 수 있다. 해석 결과로 각 손가락의 관절각 및 각 접촉점의 좌표, 3



Object orientation [deg]: $R_o(15.0, 36.0, 126.0)$
 Object position [mm]: $T_o(-8.0, 0.0, 16.0)$
 Joint displacements [deg]:
 $q_1 = (-40.0, 29.9, 0.0, 87.8)$ $q_2 = (-10.0, 75.1, 0.0, 36.3)$
 $q_3 = (-35.0, 75.7, 0.0, 8.7)$ $q_4 = (5.0, 70.9, 0.0, 52.8)$

Fig. 19 Grasping of vase

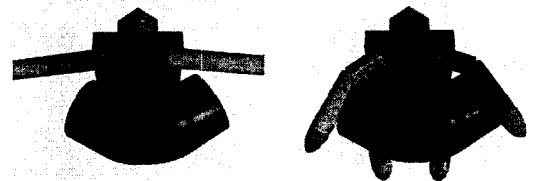
차원의 화상을 표시한다. 시뮬레이션 시스템의 단위는 거리가 밀리미터 [mm], 각도가 도 [deg]이다.

다관절의 로봇 손에서 제1, 2 손가락 링크는 길이가 35 [mm], 반지름이 10 [mm]인 원통이고, 끝 부분인 제3 손가락 링크는 절반이 길이가 25 [mm], 반지름이 10 [mm]인 원통이고 절반이 장축의 반지름이 25 [mm], 단축의 반지름이 10 [mm]인 타원체이다. 손바닥은 폭이 55 [mm], 높이가 55 [mm], 두께가 20 [mm]인 직육면체이다. 제1, 2, 3, 4 손가락은 각각 손바닥의 오른쪽 위, 왼쪽 위, 왼쪽 아래, 오른쪽 아래에 위치한 손가락이다. 그리고 손가락은 각 관절의 중심 회전축 방향이 어떻게 조합되느냐에 따라서 다양한 관절구조를 생각할 수 있다. 중심 회전축의 방향에 의해 관절은 P_x , P_y , R 로 분류된다. P_x 의 회전축은 x 축, P_y 의 회전축은 y 축, R 의 회전축은 z 축이다.⁽¹⁶⁾

6. 시뮬레이션의 예

6.1 물체의 파지에 관한 시뮬레이션

파지의 시뮬레이션은 좌표변환된 물체를 파지하여 각 손가락 링크의 관절각 및 접촉점의 좌표를 구하는 것이다. 물체는 회전변환한 후에 이동변환을 한다. 이동변환 $T_o(t_x, t_y, t_z)$ 은 좌표축의 원점에서 x_o, y_o, z_o 축 방향으로 각각 t_x, t_y, t_z 만큼 이동하는 것이고, 회전변환 $R_o(r_x, r_y, r_z)$ 은 좌표축의 원점에서 x_o, y_o, z_o 축 방향으로 각각 r_x, r_y, r_z 만큼 회전하는 것이다. 여기서 $x_o,$



Object orientation [deg]: $R_o(-171.0, 0.0, 6.0)$
 Object position [mm]: $T_o(7.0, 6.0, 9.0)$
 Joint displacements [deg]:
 $q_1 = (53.0, 16.1, 44.8, 0.0)$ $q_2 = (-57.0, 32.5, 31.9, 0.0)$
 $q_3 = (-28.0, 75.9, 0.0, 50.5)$ $q_4 = (32.0, 75.3, 0.0, 48.9)$

Fig. 20 Grasping of curved pipe

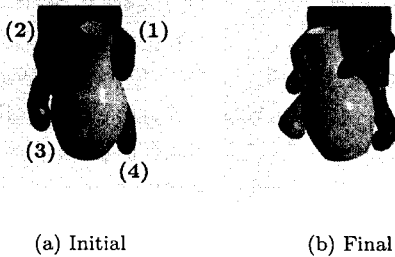
y_0, z_0 축은 원점 고정의 좌표축이다.

Fig. 19은 화병 모양의 물체를 파지한 예이다. 원통과 B-스플라인 곡면, 타원체와 B-스플라인 곡면의 접촉을 해석했다. 제1 손가락은 제1, 3 링크를, 그리고 제2, 3, 4 손가락은 제2, 3 링크를 사용하여 파지했다. 각 손가락의 관절구조는 $P_yP_x-P_x-P_x$ 으로 인간의 손가락과 유사한 구조이다.

Fig. 20은 가운데가 볼록한 굽은 관 모양의 물체를 파지한 예이다. 원통과 B-스플라인 곡면, 원통과 B-스플라인 곡선, 타원체와 B-스플라인 곡면의 접촉을 해석했다. 제1, 2 손가락은 제1, 3 링크를, 그리고 제3, 4 손가락은 제2, 3 링크를 사용하여 파지했다. 각 손가락의 관절구조는 $P_yP_x-P_x-P_x$ 이다.

6.2 물체의 조작에 관한 시뮬레이션

조작의 시뮬레이션은 시작점의 위치 및 방향부터 종료점의 위치 및 방향까지 물체를 조작했을 때의 각 손가락 링크의 관절각 및 접촉점의 변화를 구하는 것이다. 물체의 위치 및 방향은



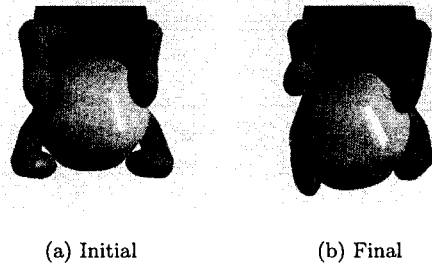
Initial-final object position [mm]:
 $T_o(10.0, 10.0, 45.0) \rightarrow T_w(-9.0, -8.0, -10.0)$
 Initial-final object orientation [deg]:
 $R_o(0.0, 0.0, -5.0) \rightarrow R_w(-13.0, 0.0, 15.0)$
 Initial-final joint displacements [deg]:
 $q_1 = (75.0, 0.0, 0.0, 24.7)$
 $q_2 = (85.0, 0.0, 0.0, 25.3)$
 $q_3 = (85.0, 20.0, -20.0, 18.5)$
 $q_4 = (70.0, 0.0, 0.0, 23.7)$
 \downarrow
 $q_1 = (80.6, 11.7, -42.5, 65.2)$
 $q_2 = (105.3, -82.6, 83.8, -29.8)$
 $q_3 = (54.1, 1.5, 7.9, 66.2)$
 $q_4 = (62.7, 21.1, -21.4, 53.9)$

Fig. 21 Manipulation of vase

u, v 의 값이 영인 물체 위의 대표점(r_w)을 중심으로 변화하고, 이동변환 $T_w(t_x, t_y, t_z)$ 은 대표점에서 x_w, y_w, z_w 축 방향으로 각각 t_x, t_y, t_z 만큼 이동하는 것이고, 회전변환 $R_w(r_x, r_y, r_z)$ 은 대표점에서 x_w, y_w, z_w 축 방향으로 각각 r_x, r_y, r_z 만큼 회전하는 것이다. 여기서 x_w, y_w, z_w 축은 물체의 대표점 고정의 좌표축이다.

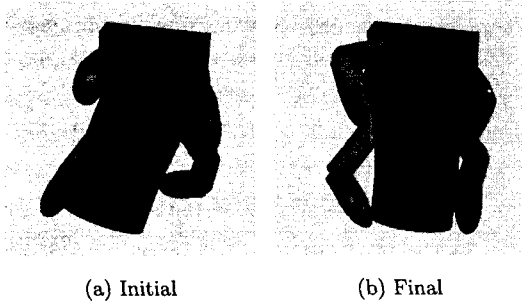
Fig. 21은 화병 모양의 물체를 조작한 예이다. 제1 손가락은 관절구조가 $P_xP_y-P_y-P_x$, 상대적 접촉운동이 Pure rolling 운동이고, 제2 손가락은 $P_xP_y-P_y-P_x$, Pure rolling 운동이고, 제3 손가락은 $P_xP_y-P_y-P_x$, Pure rolling 운동이고, 제4 손가락은 $P_xP_y-P_y-P_x$, Pure rolling 운동이다. 물체를 재파지하지 않고 조작했다.

Fig. 22은 폐곡면 모양의 물체를 조작한 예이다. 제1 손가락은 $P_xP_y-P_x-P_x$, Slide-twist-rolling 운동이고, 제2 손가락은 $P_xP_y-P_x-P_x$, Slide-twist-rolling 운동이고, 제3 손가락은



Initial-final object position [mm]:
 $T_o(0.0, 0.0, 20.0) \rightarrow T_w(0.0, 0.0, 20.0)$
 Initial-final object orientation [deg]:
 $R_o(0.0, 0.0, 0.0) \rightarrow R_w(0.0, 0.0, 10.0)$
 Initial-final joint displacements [deg]:
 $q_1 = (55.0, 0.0, 50.0, -10.4)$
 $q_2 = (55.0, 0.0, 50.0, -10.4)$
 $q_3 = (45.0, 0.0, 35.0, 51.8)$
 $q_4 = (40.0, 0.0, 35.0, 62.6)$
 \downarrow
 Regrasping(new joint displacements):
 $q_3 = (50.0, -1.2, 30.0, 39.0)$
 $q_4 = (50.0, -1.3, 30.0, 48.0)$
 \downarrow
 $q_1 = (55.0, 0.0, 50.0, -0.4)$
 $q_2 = (55.0, 0.0, 50.0, -24.9)$
 $q_3 = (50.0, -1.8, 43.2, 8.9)$
 $q_4 = (50.0, -1.5, 40.5, 28.5)$

Fig. 22 Manipulation of irregular ball



(a) Initial

(b) Final

Initial-final object position [mm]:

$$T_o(10.0, 10.0, 40.0) \rightarrow T_w(-20.0, -20.0, -20.0)$$

Initial-final object orientation [deg]:

$$R_o(10.0, 0.0, 70.0) \rightarrow R_w(-10.0, 0.0, 20.0)$$

Initial-final joint displacements [deg]:

$$q_1 = (75.0, 15.0, 0.0, 8.9)$$

$$q_2 = (15.0, 80.0, 15.0, 10.9)$$

$$q_3 = (0.0, 70.0, 0.0, 15.4)$$

$$q_4 = (0.0, 20.0, 70.0, 38.5)$$

↓

$$q_1 = (71.1, 43.2, -44.2, 26.3)$$

$$q_2 = (15.0, 70.3, 2.7, 79.6)$$

$$q_3 = (0.0, 63.9, -64.3, 64.1)$$

$$q_4 = (0.0, 20.0, 70.0, -12.5)$$

Fig. 23 Manipulation of curved pipe

$P_x P_y - P_x - P_x$, Twist-rolling 운동이고, 제4 손가락은 $P_x P_y - P_x - P_x$, Twist-rolling 운동이다. 조작하는 도중에 제3, 4 손가락이 일직선으로 뻗었기 때문에 물체를 재파지하고 조작했다.

Fig. 23은 굽은 관 모양의 물체를 조작한 예이다. 제1 손가락은 $P_x P_y - P_y - P_x$, Pure rolling 운동이고, 제2 손가락은 $P_y P_x - P_y - P_x$, Twist-rolling 운동이고, 제3 손가락은 $P_y P_x - R - P_x$, Twist-rolling 운동이고, 제4 손가락은 $P_y P_x - P_x - P_x$, Slide-twist-rolling 운동이다. 물체를 재파지하지 않고 조작했다.

7. 결론

본 논문의 결론은 다음과 같다.

- (1) 복잡한 형상의 물체를 표현하는 수단으로 B-스플라인 곡면을 도입했고, 원통과 타원체로 구성된 손가락으로 B-스플라인 곡면 물체를 파지하고 조작하는 경우에 일어날 수 있는 접촉의 종류를 분류했고, 원통과 B-스플라인 곡면, 원통과 B-스플라인 곡선, 원통과 점, 타

원체와 B-스플라인 곡면, 타원체와 B-스플라인 곡선, 타원체와 점의 접촉문제를 해석했다.

- (2) 손가락 표면을 이용하여 B-스플라인 곡면 물체를 파지하고 조작하는 역 운동학 문제를 해석하는 시뮬레이션 시스템을 개발했다.

- (3) 개발한 시뮬레이션 시스템을 이용하여, 화병 모양, 굽은 관 모양, 폐곡면 모양 등의 B-스플라인 곡면으로 표현된 다양한 형상의 물체를 대상으로 파지 및 조작의 문제를 실제로 해석했고, 시뮬레이션 시스템의 유효성을 확인했다.

앞으로의 전망으로는 물체의 위치 및 방향, 손가락의 관절각에 기초하여 물체를 효과적으로 재파지(regrasping)하기 위한 동작의 결정, 즉 재파지 동작의 최적화와 손가락 표면을 이용한 물체의 파지와 조작에 관한 역학 등에 관해 연구할 필요가 있다.

참고문헌

- (1) Murray, R.M., Li, Z. and Sastry, S.S., 1994, "A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation," *CRC Press*.
- (2) Montana, D.J., 1995, "The Kinematics of Multi-fingered Manipulation," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol.11, No.4, pp.491~503.
- (3) You, J.-H., Park, J.-H., Choi, D.-H., Chong, N.Y., 1998, "Optimal Grasp Design of Multi-fingered Robot Hand Based on Manipulability and Stability", *Trans. Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol.22, No.7, pp.1367~1374.
- (4) Liu, Y.-H., 2000, "Computing N-finger Form-closure Grasps on Polygonal Objects," *Int. J. Robot. Res.*, Vol.19, No.2, pp.149~158.
- (5) Helmke, U., Hüper, K. and Moore, J.B., 2002, "Quadratically Convergent Algorithms for Optimal Dextrous Hand Grasping," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol.18, No.2, pp.138~146.
- (6) Zhu, X. and Wang, J., 2003, "Synthesis of Force-closure Grasps on 3-D Objects Based

- on the Q Distance," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol.19, No.4, pp.669~679.
- (7) Rus, D., 1999, "In-hand Dexterous Manipulation of Piecewise-smooth 3-D Objects," *Int. J. Robot. Res.*, Vol.18, No.4, pp.355~381.
- (8) Jia, Y.-B. and Erdmann, M., 1999, "Pose and Motion from Contact," *Int. J. Robot. Res.*, Vol.18, No.5, pp.466~490.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) Tiller, W., 1983, "Rational B-splines for Curve and Surface Representation," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Sep., pp.61~69.
- (12) Piegl, L. and Tiller, W., 1987, "Curve and Surface Constructions Using Rational B-splines," *Computer-aided Design*, Vol.19, No.9, pp.485~498.
- (13) Charlebois, M., Gupta, K. and Payandeh, S., 1999, "Shape Description of Curved Surfaces from Contact Sensing Using Surface Normals," *Int. J. Robot. Res.*, Vol.18, No.8, pp.779~787.
- (14) Rogers, D.F. and Adams, J.A., 1989, "Mathematical Elements for Computer Graphics," *McGraw Hill*, pp.445~456.
- (15) McKerrow, P.J., 1993, "Introduction to Robotics," *Addison Wesley*, pp.131~174.
- (16) Hwang, C.-S. and Sasaki, K., 2003, "Evaluation of Robotic Fingers Based on Kinematic Analysis," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robot. and Syst.*, pp.3318~3324.