

로봇손의 능동접촉에 의한 3차원 볼록한 물체의 곡률탐사

최혁렬*, 김진호**, 오상록***

Exploration of Curvature of Three Dimensional Convex Object by Active Touch of Robot Hand

Choi Hyouk Ryeol*, Kim Jin Ho**, and Oh Sang Rok***

ABSTRACT

In this paper we propose a method of determining the local curvature of a three dimensional convex object using the force and torque information obtained from the active touch of a robot hand. A technique for estimating two dimensional curvature of a convex object are introduced and the way of computing the three dimensional curvature from the two dimensional curvatures is presented. Also, we develop an experimental system consisting of a finger and verify the effectiveness of the proposed method experimentally.

Key Words : Active touch(능동접촉), Tactile sensor(촉각센서), Force/Torque sensor(힘/토크센서), Shape operator(모양연산자)

1. 서론

인간은 대개 시각을 통하여 주위의 물체 및 환경을 인식하나 손으로 만져서도 물체를 인식할 수 있는 능력이 있다. 손은 조작과 감각의 기능이 동시에 존재하는 기관이라고 할 수 있으며 이와 같이 능동적인 운동에 의한 접촉과 이를 이용한 감각작용을 촉지각(haptic sensing)이라고 한다. 로봇에게 있어서도 CCD카메라와 같은 비전센서를 이용한 시각정보는 물체를 인식할 수 있는 중요한 정보중 하나이지만, 시각정보만으로는 불충분하다. 예를 들어, 어두운 곳이나 조명상태가 불량한 환경에서는 시각센서로는 물체를 정확하게 인식할 수 없으

며 시야에서 가려진 물체의 뒷면과 같은 부분은 뒷면에 새로운 카메라를 설치하기 전에는 전혀 감지할 수 없다. 또한, 질감이나 국부적인 형상은 시각으로는 측정 불가능한 물체의 성질이다. 인간은 이러한 경우 손으로 물체를 만져서 불충분한 정보를 보충하거나 새로운 정보를 얻으려고 할 것이다. 로봇이 접촉과 운동을 통하여 얻은 정보를 이용하여 물체를 인식하는 행위를 능동적 센싱(active sensing)이라고 하며 로봇에게 있어서 매우 중요한 능력이다. 로봇손이 능동적 센싱을 하기 위해서는 기본적으로 접촉력, 접촉위치 등을 인식할 수 있는 센서가 필요하며 이에 사용되는 센서로는 크게 두 가지, 촉감센서(tactile sensor)와 힘/토크센서(force-torque sensor)를 들 수 있다. 이 두 센서는 각각 장단점을 갖고 있으며 오래전부터 이에 관하

* 성균관대학교 기계공학과
** 화천기공
*** 한국과학기술원 정보전자연구부

여 많은 연구들이 수행되어 왔다. 촉감센서는 손가락과 물체와의 접촉점을 계산과정없이 직접 알아내는 것이 가능한 반면에 가격, 신뢰성, 구조의 복잡성등으로 인한 많은 제한이 있다. 이에 반하여 힘/토크센서는 측정된 힘과 토크 정보로부터 접촉의 위치와 접촉력을 계산해야 하는 단점을 가지고 있지만 촉감센서의 많은 단점들을 보상하여 줄 수 있다[1, 2, 3].

능동적 접촉에 의하여 얻을 수 있는 정보는 다양하나 이에 관한 지금까지의 연구는 기하학적 형상을 인식하는 정도에 그치고 있다. 3차원 물체의 기하학적 형상은 면이나 모서리들의 조합이라고 할 수 있으며 이의 특징은 곡률을 이용하여 나타낼 수 있다. 물체의 뾰족한 곳이나 둥근 곳등은 곡률의 차이때문에 나타나는 것이며 물체의 형상을 결정짓는 가장 중요한 정보이다. 지금까지 임의의 물체의 곡률을 식별하기 위한 다양한 방법들이 시도되었다.

Fearing과 Binford는 구형의 촉감센서를 사용해서 곡률을 결정하는 방법을 제안하였고[4], Charlebois등은 촉감센서로부터 얻어진 곡률정보를 기초로 하여 곡면의 형상을 표현하는 방법을 제안하였다[5]. Kaneko와 Tanie는 토크센서만을 사용하여 접촉 위치를 계산하는 "Self-Posture Changeability"라는 방법을 제안하였다[6]. 그리고 Grupen과 Huber는 로봇손의 운동정보를 가지고 평면상에서 곡률을 구하는 알고리즘을 제안하였다[7].

Demay와 Schutter는 힘제어가 되는 로봇을 가지고 곡면의 특징을 나타내는 방법에 관하여 언급하였다[8]. 또한 Kaneko등은 오목한 곡면을 접촉을 통하여 식별하는 방법에 관하여 언급했는데 2차원 형상에 제한되는 단점이 있다[9].

본 논문에서는 힘/토크센서를 이용한 능동적 센싱 전략을 통하여 3차원 볼록한 물체의 곡률을 알아내는 방법을 제안한다. 힘/토크센서는 손가락 끝이나, 손바닥으로부터 가장 먼 손가락의 조인트에 설치되어 있다고 하고 손가락의 능동적 운동과 이 과정 중에 접촉으로부터 얻어진 힘과 토크 정보로부터 곡률을 계산하게 될 것이다.

한가지 중요한 점은 3차원 볼록한 물체에는 특정한 점에서 무한개의 곡률이 존재하며, 따라서 한 두개의 방향에 따른 곡률을 찾아내었다고 해서 그 점에서 국부적인 형상을 모두 알고 있다고는 할

수 없다는 것이다. 즉, 3차원 물체에 있어서 곡률은 방향에 따라서 정의될 수 밖에 없으며 특정한 방향에 관한 곡률의 인식은 물체의 국부적인 3차원적 기하학적 형상을 알아내는데에 불충분하다. 따라서, 접촉에 의한 곡률의 인식방법 뿐만이 아니라 미분 기하학을 이용하여 몇개의 측정된 곡률을 이용하여 무한하게 존재하는 물체의 곡률을 유도하는 방법을 제안하고자 한다. 이로부터 물체의 국부적인 형상을 완벽하게 인식할 수 있게 될 것이다.

본 논문의 구성은 먼저, 2절에서는 이론적인 배경을 설명하고, 3절에서는 주어진 방향을 따라 곡률을 구하는 방법을 제안한다. 그리고, 4절에서는 얻어진 임의의 방향에 관한 곡률을 이용해서 물체의 3차원 곡률특성을 구하는 방법을 제안하게 될 것이다. 마지막으로 5, 6절에서는 이론을 증명하기 위하여 제작한 실험장치에 관하여 설명하고 또한 이를 이용한 실험을 통하여 제안된 방법의 효용성을 증명하게 될 것이다.

2. 이론적 배경

본 논문에서 제안된 알고리즘은 미분 기하학에 기초를 두고 있으며 본 절에서는 이의 이해를 돕기 위해 몇가지 정의 및 개념들을 다음과 같이 정리한다[10].

Definition 1 공변미분 (covariant derivative)
 $W \in R^3$ 는 벡터 장이고, $v \in R^3$ 는 점 p 에서 접선 벡터라 할 때 v 에 대한 W 의 공변미분은 점 p 에서 접선벡터이며 다음과 같은 식으로 부터 구할 수 있다.

$$\nabla_v W = W(p + tv) \quad (1)$$

$\nabla_v W$ 는 점 p 가 v 방향으로 이동할 때 $W(p)$ 의 초기 변화율을 나타낸다.

Definition 2 모양연산자 (shape operator)

$M \in R^3$ 는 연속한 곡면이며 점 p 는 M 상의 한 점이고 점 p 에서 M 에 대한 접선벡터를 v 라고 하자.

$$S_p(v) = -\nabla_v U \quad (2)$$

이 때 위와 같이 계산된 S_p 를 점 p 에서 M 의 모양연산자라고 하며 여기에서 U 는 M 상의 점 p 부터의 단위 법선 벡터 장이다.

Definition 3 법곡률 (normal curvature)
 u 를 점 p 에서 M 에 접하는 단위벡터라 할 때 $k(u) = S(u) \cdot u$ 를 u 방향에서 M 의 법곡률이라고 부른다.

Definition 4 주곡률 (principal curvature)
 점 p 를 M 상의 한 점이라 하자. 점 p 에서 M 의 법곡률 $k(u)$ 의 최대 값과 최소 값을 점 p 에서 M 의 주곡률이라고 부르며, 본 논문에서는 k_1 과 k_2 로 표시한다. 또한, 이 극값들이 발생하는 방향을 점 p 에서 M 의주방향(principal direction)이라고 하고 이 방향에 있는 단위벡터를 점 p 에서 M 의 주벡터(principal vector)라고 부른다.

Corollary 1 k_1 과 k_2 , e_1 과 e_2 를 점 p 에서 M 의 주곡률과 주벡터라 하자.

이때 $u = \cos \theta e_1 + \sin \theta e_2$ 라 하면, u 방향에서 M 의 법곡률은 식 (3)과 같이 나타내어 진다.

$$k(u) = k_1 \cos^2 \theta + k_2 \sin^2 \theta \quad (3)$$

식(3)의 증명과정은 부록에서 기술하였다.

3. 2차원 곡률의 탐사

로봇손의 능동접촉에 의한 탐사과정은 Fig.1에 개념적으로 나타낸 것과 같다. 능동접촉에 의한 로봇손의 탐사과정은 시각으로는 물체의 식별이 불가능한 경우 로봇손이 미지에 물체에 접촉한 후 이 결과로 얻어지는 힘과 운동의 정보를 이용하여 형상을 추정하는 과정이다.

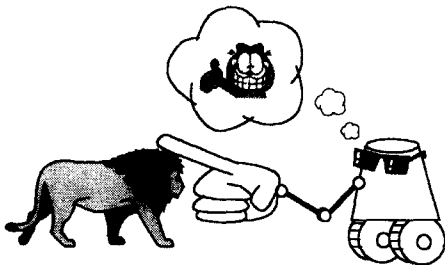


Fig. 1 Active sensing by robot hand

이 때, 한 번의 접촉으로는 물체의 형상을 알아낼 수 없으며 중복되지 않는 접촉을 여러번 반복해

야 하나 가능하면 적은 반복과정을 통하여 정확한 물체의 형상을 알아내는 것이 바람직하다. 미지 물체의 전체적인 형상은 단순한 기하학적 형상으로 조합된 경우 이외에는 표현하기 어려우며 임의의 기하학적 형상을 갖고 있는 물체의 경우 국부적인 형상들을 이용하여 판단할 수밖에 없다. 국부적인 형상은 곡률로서 가장 잘 표현할 수 있으며 본 질에서는 능동적 접촉을 통하여 미지 물체의 2차원 곡률을 인식하는 방법을 제안한다. 곡률은 곡면상의 한 점에서 특정한 방향에 대한 접선의 변화율이며 3차원 물체에 있어서 접선의 방향은 무한히 많으므로 곡률 또한 무한히 많이 존재한다. 따라서, 3차원 물체에 있어서 2차원 곡률이 갖는 의미는 특정한 방향에 대한 곡률을 말하는 것이며 3차원 물체의 국부적인 형상을 알기 위해서는 무한개의 2차원 곡률이 필요하다. 그러나 실제로 무한개의 2차원 곡률을 측정하는 것은 불가능하며 본 논문에서는 3개의 2차원 곡률을 이용하여 모든 방향의 곡률을 알아낼 수 있는 방법을 제안하게 될 것이다. 먼저 2차원 곡률을 탐사하는 방법에 관하여 기술하기 전에 필요한 몇가지 가정을 나열하면 다음과 같다.

- 대상이 되는 미지의 물체는 볼록하다.
- 물체의 곡률은 국부적으로 일정하다.
- 로봇손의 기하학적 형상은 알고 있다.
- 접촉시 로봇손의 변형은 무시할 만하며 로봇 손은, 강체이다.

로봇손과 물체가 접촉하였을 때 접촉점의 위치와 접촉력을 계산하는 방법에 관해서는 서론에서 언급한 것과 같이 이미 많은 연구결과가 발표된 바 있으며 본 논문에서는 이들 중에서 Bicchi등이 제안한 알고리즘을 사용하였다[1]. 손가락은 손 끝과 손마디로 나눌 수 있으며 탐사과정중 임의의 부분에서 접촉이 일어날 수 있으므로 각 경우에 대한 곡률 인식방법에 관하여 제안한다.

3.1 손마디 접촉의 경우

Fig. 2는 손가락 마디에서 접촉이 발생하는 경우를 나타낸 것이다. \sum_s 는 탐색을 위하여 설정한 절대좌표계의 원점을 나타내며 $Q \in R^3$ 는 곡률의 중심까지의 위치 벡터를 나타낸다.

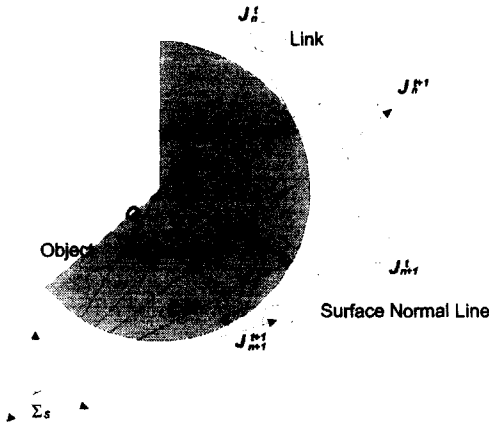


Fig. 2 Vector quantities and notation involved in inner link contact

여기에서 $(\cdot)^i$ 는 i 번째 접촉을 표시하며 C^i 는 접촉점의 위치벡터, J_n 은 n 번째 로봇손가락 관절의 위치벡터를 나타낸다. Fig. 2로부터 i 번째 접촉에 있어서 곡률 중심과 접촉점을 통과하는 위치벡터 $(Q-C^i)$ 와 손가락 링크의 방향을 나타내는 벡터 $(J_{n+1}^i - J_n^i)$ 는 서로 수직하다는 것을 알 수 있으며 이로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$(J_{n+1}^i - J_n^i) \cdot (Q - C^i) = 0 \quad (4)$$

유사하게 $t+1$ 번째 접촉에 대하여도 다음과 같은 식을 쓸 수 있다.

$$(J_{n+1}^{i+1} - J_n^{i+1}) \cdot (Q - C^{i+1}) = 0 \quad (5)$$

또한, $(J_{n+1}^{i+1} - J_n^{i+1})$ 와 $(J_{n+1}^i - J_n^i)$ 이 한 점에서 교차하도록 탐사를 수행한다면 $(J_{n+1}^{i+1} - J_n^{i+1}) \times (J_{n+1}^i - J_n^i)$ 와 $(Q - C^i)$ 는 수직하며 이로부터 새로운 조건식 (6)을 얻게 된다.

$$[(J_{n+1}^{i+1} - J_n^{i+1}) \times (J_{n+1}^i - J_n^i)] \cdot (Q - C^i) = 0 \quad (6)$$

따라서, 곡률 중심의 위치벡터 Q 는 식 (4), (5), (6)을 연립하면 얻게 되며 곡률 반경 ρ 는 다음 식으로부터 구해 진다.

$$\rho = \|Q - C^i\| \quad \text{or} \quad \|Q - C^{i+1}\| \quad (7)$$

3.2 손끝 접촉의 경우

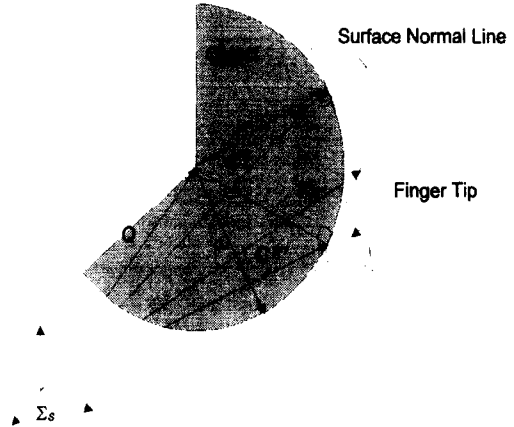


Fig. 3 Vector quantities and notation involved in inner fingertip contact

Fig. 3은 손끝에서 접촉이 발생한 경우를 나타낸 것으로 마디 접촉의 경우에 관한 방법을 적용할 수 없기 때문에 다음과 같은 새로운 방법을 제안한다. 끝의 표면 방정식이 $\phi(x, y, z) = 0$ 일 때 법선 방향의 벡터는 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$\nabla \phi = \frac{\partial \phi}{\partial x} i + \frac{\partial \phi}{\partial y} j + \frac{\partial \phi}{\partial z} k \quad (8)$$

Fig. 3에서 접촉점 C^i 를 통과하는 접평면을 S_i 라고 하고 이 평면위의 임의의 벡터를 T_i 라고 할 때 C^i 를 지나는 접평면의 방정식은 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$S_i = \nabla \phi(C^i) \cdot (T_i - C^i) = 0 \quad (9)$$

유사하게 C^{i+1} 을 지나는 접평면 S_{i+1} 의 방정식은 이 평면위의 임의의 벡터를 T_{i+1} 이라고 할 때 다음과 같이 구하여 진다.

$$S_{i+1} = \nabla \phi(C^{i+1}) \cdot (T_{i+1} - C^{i+1}) = 0 \quad (10)$$

따라서 S_i 와 S_{i+1} 의 교점중 $(Q - C^i)$ 와 $(Q - C^{i+1})$ 벡터를 포함하는 평면상에 존재하는 교점의 벡터를 T 라고 하면 이 벡터는 다음의 분

제를 풀면 구할 수 있다.

$$\text{Min}(\|T - C'\|^2 + \|T - C'^{+1}\|^2) \quad (11)$$

여기에서 T 가 S_i 와 S_{i+1} 상에 동시에 존재해야 된다는 조건으로 부터 다음과 같은 구속조건식을 구할 수 있으며

$$\nabla \phi(C') \cdot (T - C') = 0 \quad (12)$$

$$\nabla \phi(C'^{+1}) \cdot (T - C'^{+1}) = 0 \quad (13)$$

여기에서 $\text{Min}(\cdot)$ 은 (\cdot) 의 최소 노름(norm)을 나타낸다. 식 (10), (11), (12)으로 이루어진 최적화 문제를 풀면 T 의 값을 구할 수 있다. 실제로 이부분은 최적화 문제임에도 불구하고 간단한 산술적인 계산만으로 풀 수 있으므로 실시간 계산이 가능하다. 결과적으로 곡률의 중심 Q 는 손마디 접촉에서의 경우와 같이 다음과 같은 3개의 방정식을 연립하여 얻어지며

$$(T - C') \cdot (Q - C') = 0 \quad (14)$$

$$(T - C'^{+1}) \cdot (Q - C'^{+1}) = 0 \quad (15)$$

$$(T - C') \times (T - C'^{+1}) \cdot (Q - C') = 0 \quad (16)$$

곡률반경은 아래의 식으로 부터 구할 수 있다.

$$\rho = \|Q - C'\| \quad \text{or} \quad \|Q - C'^{+1}\| \quad (17)$$

4. 3차원 곡률의 파악

앞서 언급한 것과 같이 곡률은 물체의 국부적인 형상을 규정짓는 중요한 요소이지만 3차원 물체 표면상의 한 점에서 곡률은 무한이 많이 존재하므로 몇개의 곡률을 알아낸다고 해서 형상을 알아내었다고 할 수는 없다. 따라서 본 논문에서는 곡률 대신에 모양연산자를 이용하여 물체의 국부적 형상을 알아내는 방법을 제안한다. 식 (3)에 의하면 물체상의 한 점에서 2개의 주곡률을 알게 되면 어떤 방향의 법곡률이라도 구할 수 있음을 알게 된다. 결과적으로 2개의 주곡률과 식 (3)을 이용하면 물체의 전반적인 국부 형상을 나타낼 수 있으나 문제는 주곡률과 주방향을 알 수 없다는 것이다. Fig. 4는 주곡률과 주방향을 구하는 방법을 개념적으로 설명한 것이다.

Fig. 4에서 나타낸 것처럼 u_1, u_2 와 u_3 는 접촉점의 접평면 상에서 탐사 방향에 관한 단위벡터이다. 이 때 식(3)으로부터 u_1, u_2, u_3 방향에

대한 법곡률을 $k(u_1), k(u_2), k(u_3)$ 라고 한다면, 이들은 다음과 같은 식으로 주곡률과 관계된다.

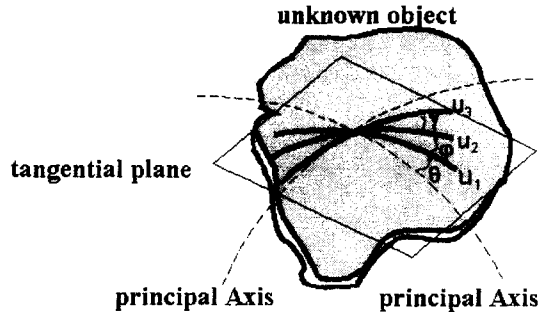


Fig. 4 Extraction of three dimensional curvature

$$k(u_1) = k_1 \cos^2 \theta + k_2 \sin^2 \theta \quad (18)$$

$$k(u_2) = k_1 \cos^2(\theta + \phi) + k_2 \sin^2(\theta + \phi) \quad (19)$$

$$k(u_3) = k_1 \cos^2(\theta + \gamma) + k_2 \sin^2(\theta + \gamma) \quad (20)$$

여기에서 θ 는 주방향과 첫번째 탐사방향인 이루는 각이며 ϕ 와 γ 는 두 번째와 세 번째 탐사방향인 첫번째 탐사방향과 이루는 각이다. 위의 식에서 $k(u_1), k(u_2), k(u_3)$ 는 3점에서 제안한 방법으로 부터 구할 수 있으며 주곡률 k_1, k_2 와 주방향 θ 는 미지수가 된다. 이로 부터 식 (18), (19)과 (20)을 연립하여 풀면 주곡률 k_1, k_2 와 주방향 θ 를 계산할 수 있다. 따라서 식 (3)으로부터 접평면 위에서 임의의 방향의 곡률을 알 수 있다.

앞서 설명한 곡률 인식과정을 정리하면 그림 5와 같다. 먼저, 로봇손의 탐사 경로를 물체 주위로 설정하고, 그 경로를 따라 손가락을 서서히 움직인다. 손가락이 물체와 접촉하면 센서의 출력으로부터 접촉 여부를 확인하여 접촉점의 위치를 계산한 후 다른 점으로 손가락을 이동시킨다. 이상의 과정을 거쳐 얻은 모든 정보로부터 미지 물체의 국부 형상을 인식하고, 이 국부 형상을 조합하여 전체적인 형상을 재구성한다. 이러한 형상 탐사의 과정 및 그 결과는 컴퓨터 그래픽을 사용하여 나타낸다면 보다 효율적일 것이다.

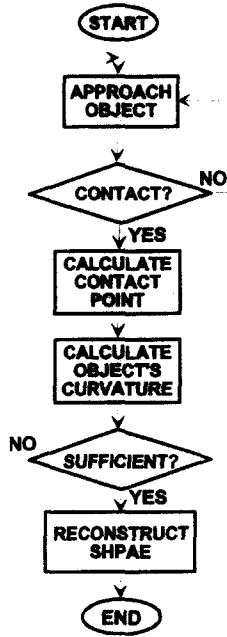


Fig. 5 Flowchart of exploration procedure

5. 실험 장치

Fig. 6는 실험 장치의 개략도이다. 실험 장치는 두 대의 퍼스널컴퓨터를 사용하여 각각의 컴퓨터가 제어와 그래픽 처리를 분산하여 수행하도록 함으로서 각 컴퓨터에 걸리는 부하를 줄여서 실시간 동작이 가능하도록 하였다. 물체의 형상을 탐사하기 위해서 로봇 손 대신에 4자유도의 스카라(SCARA) 로봇을 이용하였다. 로봇의 엔드 이펙터(end effector)에는 상용화된 6축 힘·토크 센서(JR3)를 부착하였고 여기에 알루미늄으로 된 링크를 하나 더 부착하였다. 전체적인 구조는 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 스카라 로봇에 링크가 추가된 평면 3자유도 로봇으로 간주할 수 있으며 부착된 힘·토크센서는 마지막 링크에 작용하는 힘과 토크를 측정한다. 실험과정에서는 알루미늄 막대를 능동적으로 움직여가며 물체에 접촉함으로써 접촉점의 위치를 알아내고 이와 같은 과정을 반복하여 곡률을 알아내게 된다. 제어용 퍼스널 컴퓨터에서는 Borland C++ 를 이용하여 700 Hz의 샘플링 주기로 로봇의 제어를 수행하였고 그래픽 처

리용 퍼스널 컴퓨터에서는 Visual C++와 다이렉트X(directX) 라이브러리를 이용하여 효율적인 3차원 그래픽 처리를 하였다. 두 대의 퍼스널 컴퓨터간 통신은 이더넷(ethernet)을 이용하였다.

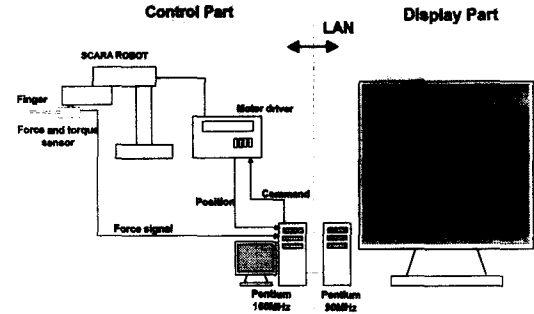


Fig. 6 The schematic of the experimental system

실험에서는 반경이 0.03[m]인 원통형 물체를 로봇이 탐사하여 곡률을 찾아내고 형상을 그래픽으로 나타내는 작업을 수행 하였다. 원통형 물체의 경우 원통의 반경 방향에 관해서는 곡률이 일정하므로 2차원 물체로 간주할 수 있기 때문에 스카라 로봇을 이용해서도 물체의 형상을 탐사할 수 있다. 그러나 물체가 원통이라는 점을 모를 경우 3차원 형상 탐사를 수행해야 하며 이 경우 스카라로봇으로는 자유도가 부족하기 때문에 실험이 불가능하게 된다. 따라서 손가락은 일정한 방향으로 탐사를 수행하도록하고 미지 물체가 놓여 있는 각도를 변화시켜 로봇에 접촉시킴으로서 능동적 탐사와 동등한 효과를 내도록 하여 실험을 수행하였다. Fig. 7은 이와같은 실험 과정을 나타낸 것이다. 원통의 경우 주방향은 원통의 반경방향과 원통의 축방향으로 두 개 존재한다. Fig. 7(a)-(c)에서는 원통의 반경방향에 있는 주방향에 대하여 탐사 방향의 각도 θ, ψ, γ 가 각각 $\pi/9, \pi/4, \pi/2$ 가 되도록 물체의 방향을 바꾸어가면서 실험한 장면이다. 이 때 식 (18)-(20)의 해는 다음과 같다.

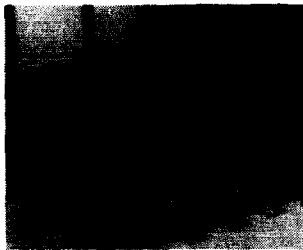
$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{k(u_2) - \frac{1}{2} \{ k(u_1) + k(u_3) \}}{\frac{1}{2} \{ k(u_1) - k(u_3) \}} \right] \quad (21)$$

$$k_1 = \frac{1}{2} \left[\frac{k(u_1) - k(u_3)}{\cos(2\theta)} + k(u_1) + k(u_3) \right] \quad (22)$$

$$k_2 = \frac{1}{2} \left[-\frac{k(u_1) - k(u_3)}{\cos(2\theta)} + k(u_1) + k(u_3) \right] \quad (23)$$



(a) $\theta = \pi/9$



(b) $\psi = \pi/4$



(c) $\gamma = \pi/2$

Fig. 7 The experimental procedures

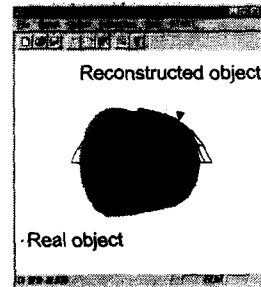
표 1은 실험 결과를 나타낸 것으로 정확한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 제한한 알고리즘에서 오차의 주된 요인은 접촉점을 계산하는 과정에서 올 수 있으며 곡률을 계산하는 과정에서는 오차가 생길 여지가 없다. 형상 재구성과정에서는 계산된 주곡률을 이용하여 다시 특정 방향을 따라

몇 개의 곡률을 계산하고 그 결과를 그래픽으로 처리하였다. Fig. 8은 재구성된 형상을 보인 것으로 몇 개의 곡률을 그려봄으로써 미지의 물체가 원통형이라는 것을 알 수 있다. 본 실험을 통해 임의로 측정된 3개의 곡률을 가지고 주곡률을 구할 수 있음을 확인하였고 얻은 곡률로부터 미지 물체의 곡부적 형상을 재구성할 수 있음을 보일 수 있었다.

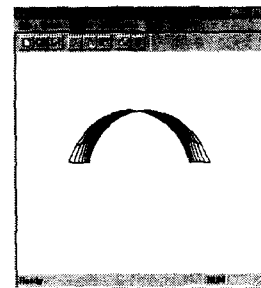
Table 1 Experimental Results

principal curvature	실제 곡률 반경	측정된 곡률 반경
k_1	32.79(1/m)	32.78(1/m)
k_2	0(1/m)	-0.0031(1/m)

principal direction	실제 방향	측정된 방향
θ	20(°)	20.0104(°)



(a) Side view



(b) Front view

Fig. 8 Experimental results

6. 결론

본 연구에서는 로봇손의 능동적 접촉에 의하여 3차원 불록한 물체의 곡률을 구하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 힘/토크센서를 이용하여 얻어진 접촉점의 위치정보로부터 2차원의 곡률을 찾아내고 이를 세 번 반복하여 주곡률과 주방향을 구할 수 있다는 점에 착안하였다. 스카라로봇을 이용하여 실험용 한 손가락 로봇손을 제작하였고 실험을 통하여 제안된 방법의 유용함을 입증할 수 있었다.

참고문헌

1. A., Bicchi, J., K., Salisbury, and D., L., Brock, "Contact Sensing from Force Measurements," Int. Journal of Robotics Research, Vol.12, No.3, pp.~249--262, 1988.
2. X., Zhou, Q., Shi, and Z., Li, "Contact Localization Using Force/Torque Measurements," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation pp.~1339--1344, 1996.
3. T., Yoshikawa, Y., Yu, and M., Koike, "Estimation of Contact Position between Object and Environment Based on Probing of Robot Manipulator," Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.~769--776, 1996.
4. R., S., Fearing, and T., O., Binford, "Using a Cylindrical Tactile Sensor for Determining Curvature," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 6, pp.~806--817, 1991.
5. M., Charlebois, K., Gupta, and S., Payandeh, "Curvature Based Shape Estimation Using Tactile Sensing," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.~3502--3507, 1996.
6. M., Kaneko, and K., Tanie, "Contact Point Detection for Grasping an Unknown Object Using Self-Posture Changeability," IEEE Trans. on Robotics and Automation, pp.~355--367, 1994.
7. M., Huber, and R., A., Grupen, "2-D Contact Detection and Localization Using Proprioceptive Information," IEEE Trans. on Robotics and Automation, pp.~23--33, 1994.

부록

8. S., Demay, and J., D., Schutter, "Identification of Second Order Surface Geometry with a Force Controlled Robot," Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.~473--480, 1996.
9. M., Kaneko, M., Higashimori, and T., Tsuji, "Pulling Motion Based Tactile Sensing for Concave Surface," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.~2477--2484, 1997.
10. B., O'Neill, "Elementary Differential Geometry," Academic Press, 1996.

곡률 k 가 e_1 에서 최대값 k_1 을 가진다고 가정하면.

$$k_1 = k(e_1) = S(e_1) \cdot e_1 \quad (24)$$

이다. e_2 를 e_1 에 수직한 단위 접선벡터라 하고 점 p 에서 임의의 단위 접선벡터를 u 라 하면 u 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u = u(\theta) = ce_1 + se_2 \quad (25)$$

여기에서 $c \triangleq \cos \theta, s \triangleq \sin \theta$ 이다. 따라서 점 p 에서 법곡률은 방향에 대한 함수로 $k(\theta) = k(u(\theta))$ 와 같이 표현할 수 있게 된다. $\{1 \leq i, j \leq 2\}$ 에 대하여 S_{ij} 는 $S(e_i) \cdot e_j$ 라 하고, $S_{11} = k_1$ 이며 모양 연산자는 대칭이기 때문에, $S_{12} = S_{21}$ 이다. 따라서

$$k(\theta) = S(ce_1 + se_2) \cdot (ce_1 + se_2) = c^2 S_{11} + 2scS_{12} + s^2 S_{22} \quad (26)$$

이며 식 (26)를 θ 에 대하여 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{dk}{d\theta}(\theta) = 2sc(S_{22} - S_{11}) + 2(c^2 - s^2)S_{12} \quad (27)$$

이 때 $\theta = 0$ 이면, $c = 1$ 이고 $s = 0$ 이므로 식 (25)으로부터 $u(0) = e_1$ 이다. 가정에 의해 $\theta = 0$ 일 때 $k(\theta)$ 가 최대이므로 $(dk/d\theta)$ 는 0이 된다. 따라서 식 (27)로부터 $S_{12} = 0$ 이고 식 (26)는 다음과 같이 된다.

$$k(u) = k_1 \cos^2 \theta + k_2 \sin^2 \theta \quad (28)$$

Q.E.D