

로봇손을 이용한 미지 물체의 능동적 형상탐사에 관한 연구

Active Shape Exploration of an Unknown Object by Using Robot Hand

°김진호*, 오상록**, 최혁렬***

*성균관대학교 기계공학과 대학원(Tel : +82-331-290-7481; E-mail : jinhokim@mecha.skku.ac.kr)

**한국과학기술연구원 정보전자연구부(Tel : +82-2-958-5757; E-mail : sroh@amadeus.kist.re.kr)

***성균관대학교 기계공학부(Tel : +82-331-290-7449; E-mail : hrchoi@mecha.skku.ac.kr)

Abstract Geometric probing addresses the problem of determining geometric aspects of a structure from the mathematics and results of a physical measuring device such as a probe. This paper presents a new algorithm to recognize the shape of an unknown object by using a robot hand with a force and torque sensor. The new algorithm is called S.E.P.(Shape Exploration Procedure) which finds the global shape of an unknown object. The proposed method is composed of three major parts; finding contact informations such as contact point, calculation of shape information such as curvature, and expression of global shape from these informations. Comparing with the conventional approaches, the advantages of the proposed method are explained and verified by conducting experiments with a 3-dof SCARA robot

Keywords geometric probing, probe, force and torque sensor, unknown object

1. 서론

인간은 다양한 감각기관을 가지고 외부환경으로부터 시각, 청각, 후각, 촉각, 미각등의 정보들을 받아들이며 이를 이용하여 인간의 행동을 제어한다. 이러한 인간의 감각기능을 로봇에 이식시키려고 오래전부터 연구자들은 노력하여 왔으며, 그중 시각과 촉각은 가장 중요한 감각이다. 이런 두가지 감각중 시각에 관해서는 시각센서(vision sensor)를 이용한 이미지 프로세싱(image processing) 기술의 개발등과 같이 많은 연구가 수행되어 왔으나 상대적으로 촉각에 관해서는 많이 연구되어지지 못하고 있는 실정이다. 이와 같은 이유는 시각이 모든 감각을 주도하는 역할을 하기 때문이라고 여겨진다. 그러나 인간이 보이지 않는 사물을 인식하는 행동양식을 살펴보면 촉각의 중요성을 간과할 수 없으며 로봇에 촉각을 이식시키고 이를 이용한 운동제어등에 관한 연구가 필요하다.

촉각센서로는 촉감센서(tactile sensor)와 힘센서(force and torque sensor) 두가지가 많이 이용된다. 촉감센서는 센서표면에 많은 측정요소(sensing elements)들을 부착하여 센서와 물체사이의 직접접촉에 의해 접촉점의 위치, 힘, 모멘트등을 알려주는 장치이며 힘센서는 로봇에 부착되어 접촉점으로부터 로봇을 통해 전달되어져 오는 힘과 모멘트를 나타내 주는 장치이다.

촉각센서를 이용하여 접촉정보(contact information)를 얻을 수 있는데 접촉정보에는 접촉점의 좌표(position of contact point)와 접촉력(contact force)이 있으며 이 접촉정보를 이용하여 물체의 형상정보(shape information)을 얻는다. 형상정보란 물체의 형상을 결정짓는 데 쓰이는 요소로 물체의 곡률(curvature)등이 물체의 형상정보가 될 수 있다. 형상탐사는 그림 1과 같이 이러한 정보들을 이용하여 물체의 기하학적 형상을 찾아내는 과정이라 할 수 있다.

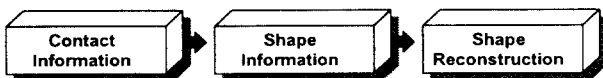


그림 1: 형상탐사 과정

접촉정보 파악에 있어서 Bicchi등은 접촉중심(contact centroid)이라는 새로운 개념을 도입하고 힘센서를 이용하여 접촉점의 좌표

를 알아내는 알고리즘을 제안하였다[1]. 그러나 이들의 알고리즘은 미리 로봇의 표면방정식을 알아야 하므로 복잡한 형상의 로봇에는 적용할 수 없다는 단점이 있다. 한편 Kaneko와 Tanie는 Self-Posture Changeability라는 방법을 제안하여 로봇의 마디 접촉(inner link based contact)시 토크센서만을 이용하여 접촉점과 접촉력을 구하는 방법을 제시하였고[3], Grupen과 Huber는 Self-Posture Changeability의 단점을 보완하는 알고리즘을 제안하였다[4]. 그러나 정확한 접촉점을 알기위해 물체의 곡률을 알아야 한다는 단점이 있다.

형상 정보 파악에 관한 연구에 있어서는 Fearing과 Binford가 촉감센서의 단성 변형원리를 이용하여 물체의 곡률을 구하는 방법을 제안하였고[5], Nicolson과 Fearing은 위에 제안된 방법의 안정성을 해석하였다[6]. Montana는 그의 박사학위 논문에서 두 강체 사이의 구름운동(rolling)의 기구학에 관한 방정식을 풀고 물체의 곡률을 구할 수 있는 방법을 제안하였으며[7], 동일한 시기에 Cai와 Roth 역시 촉감센서와 두 강체 사이의 구름운동을 이용하여 물체의 곡률을 구하는 알고리즘을 제안하였다[8]. 최근에 Charlebois등이 위에 제안된 방법의 단점을 지적하고 새롭게 미끄러짐운동을 이용한 곡률파악 알고리즘을 제안하였다[10].

마지막으로 형상재구성에 대한 연구에서는 Caselli등이 Enveloping Polyhedral Model과 Approximating Polyhedral Model을 제안하여 물체의 형상을 다면체로 근사화 하여 표현하였으나, 매끈한 곡면을 갖는 물체의 형상을 알아낼 수 없다는 단점이 있다[11]. 이에 Charlebois등이 세 손가락 로봇을 이용하여 물체의 접촉정보를 모아 그 접촉점 사이를 B-spline곡선으로 근사화 함으로써 물체의 형상을 알아내려 하였다[10]. 그러나 이 방법도 정확하게 물체의 표면을 재구성 하는 데는 한계를 가지고 있다.

위의 대부분의 연구에서 촉감센서를 사용하였으나, 촉감센서는 가격이 비싸고 많은 신호와 전원선으로 인하여 안정성이 떨어지게 되며 물체와 센서가 직접 접촉하게 되므로 센서의 파손을 가져올 수 있는 단점이 있다. 반면 힘센서를 이용하게 되면 직접 접촉점의 위치를 구할 수 없고 계산으로 구해내야 한다는 번거로움이 있으나, 비용이 절감되고 시스템이 안정적으로 되는 장점이 있다.

본 논문에서는 기존의 촉감센서를 이용한 형상탐사 대신에 힘센서를 이용하여 물체의 형상을 탐사하는 알고리즘을 제안하고자 한다. 접촉점의 위치와 접촉력의 크기, 방향을 구하기 위한 접촉정보검출 알고

리듬, 이를 이용한 형상정보 계산 알고리즘, 그리고 접촉정보와 형상 정보를 이용한 형상재구성 알고리즘을 각각 제안하고 이들을 통합한 S.E.P.라는 형상탐사 시스템을 개발하게 될 것이다.

2. 이론

2.1 S.E.P.(Shape Exploration Procedure)

그림 2는 S.E.P.의 진행과정을 나타낸다. 먼저 (A)와 같이 로봇손을 미지의 물체에 접촉할 때까지 이동하면서 탐사를 계속한다. 다음 (B)의 그림과 같이 로봇손이 물체에 접촉하면 힘센서에서 힘과 모멘트를 측정하여 접촉점의 좌표를 알아낸다. 마지막으로 (C)와 같이 접촉점에 근접한 또 다른 접촉점에 로봇손을 접촉시켜 접촉점의 좌표를 계산하고 두 점사이의 곡률반경을 계산하여 두 점 사이의 기하학적 형상을 찾아낸다. 이러한 (B)(C)의 과정을 형상파악이 완료될 때까지 반복한다.

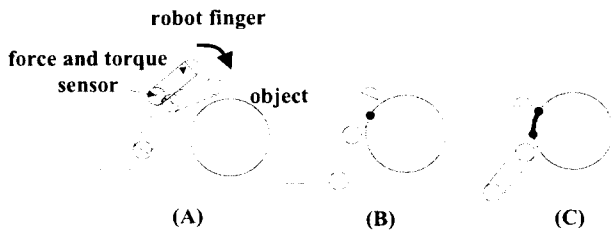


그림 2: S.E.P.의 진행과정

$$\hat{f} = \begin{bmatrix} 0 & -f_z & f_y \\ f_z & 0 & -f_x \\ -f_y & f_x & 0 \end{bmatrix}$$

$\hat{f}r = f \times r$ 을 이용하면 식(1)과 (2)를 다음과 같이 만들 수 있다.

$$m = -\hat{f}r \quad (3)$$

식(3)으로부터 미지수가 3개인 선형방정식을 얻을 수 있으나 왜대 각행렬은 역행렬이 존재하지 않으므로 식(3)만을 이용해서는 접촉점 벡터 r 을 구할 수 없다. 로봇손 끝의 표면방정식을 또 다른 구속조건으로 세워 문제를 해결할 수도 있으나 로봇의 손끝이 복잡한 형상을 한 경우에는 적용하기 어렵다.

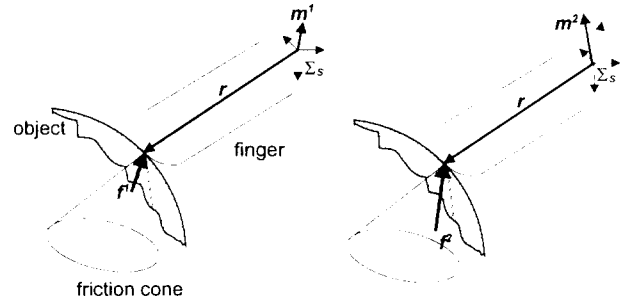


그림 4: 접촉정보 파악 알고리즘의 개념도

2.2 물체의 접촉정보 파악 알고리즘

S.E.P.는 다음과 같은 가정을 필요로 한다.

- 물체와 로봇손은 강체로 이루어져 있다.
- 물체는 고정되어 있다.
- 물체는 볼록한 형상을 갖는다.

그림 3은 일반적인 경우의 힘센서와 접촉점사이의 관계를 나타낸다. Σ_s 는 센서의 좌표계이고 $f \in \mathbb{R}^3$ 와 $m \in \mathbb{R}^3$ 은 각각 센서에서 측정된 힘과 모멘트값이다. $r \in \mathbb{R}^3$ 은 센서에서부터 접촉점까지의 위치 벡터이며 $p \in \mathbb{R}^3$ 는 실제 물체에 작용하는 힘벡터를 나타낸다.

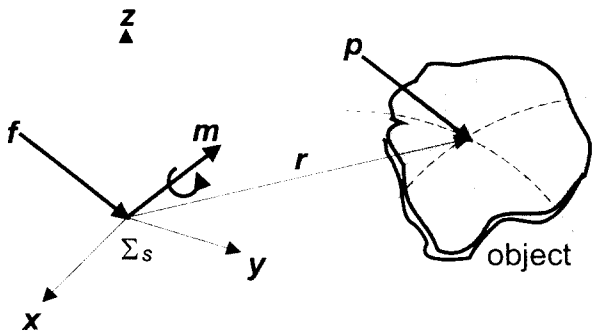


그림 3: 힘센서와 물체 사이의 관계

여기서 다음과 같은 두 식을 세울 수 있다.

$$f = p \quad (1)$$

$$m = r \times p \quad (2)$$

위의 방정식을 풀기 위해 $f = [f_x, f_y, f_z]^T$ 와 같이 정의한다면 아래와 같은 왜대각행렬(skew-symmetric matrix)을 세울 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 로봇손끝의 기하학적 형상을 모르고도 접촉점의 위치를 계산할 수 있는 방법을 제안한다. 그림 4는 알고리즘의 수행과정을 나타낸다. 먼저 로봇손이 물체와 접촉을 이룬 후 이때의 접촉력과 모멘트를 읽는다. 다음으로 로봇손끝 접촉점의 위치는 변하지 않게 즉 마찰원추(friction cone)안에 있으면서 미리 가해진 힘과 평행하지 않은 임의의 힘을 가해준다. 이로부터 접촉점벡터는 변하지 않고 접촉력과 모멘트만이 변한 구속조건식을 얻을 수 있다. 예를 들어 두 번 측정된 경우 이 때의 힘과 토크를 각각 ${}^1f, {}^2f, {}^1m, {}^2m$ 이라고 하면 다음과 같은 두 개의 식을 얻을 수 있다.

$${}^1m = -{}^1\hat{f}r, {}^2m = -{}^2\hat{f}r \quad (4)$$

여기서

$${}^1\hat{f} = \begin{bmatrix} 0 & -{}^1f_z & {}^1f_y \\ {}^1f_z & 0 & -{}^1f_x \\ -{}^1f_y & {}^1f_x & 0 \end{bmatrix}$$

$${}^2\hat{f} = \begin{bmatrix} 0 & -{}^2f_z & {}^2f_y \\ {}^2f_z & 0 & -{}^2f_x \\ -{}^2f_y & {}^2f_x & 0 \end{bmatrix}$$

이다. 아래와 같은 새로운 행렬을 정의하면

$$D = [{}^1\hat{f}^T : {}^2\hat{f}^T]^T \in \mathbb{R}^{6 \times 3}$$

$$M = [{}^1m^T : {}^2m^T]^T \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$$

(4)번식이 아래와 같은 선형방정식으로 된다.

$$-Dr = M \quad (5)$$

식(5)에서 $rank(D) = 3$ 이므로 의사역행렬을 이용하여 다음과 같이 접촉점벡터 r 을 구할 수 있다[12].

$$r = -D^+M \quad (6)$$

여기에서 $D^+ = (D^T D)^{-1} D^T$ 이다.

2.3 물체의 형상정보 파악 알고리즘

이 방법은 로봇손과 물체의 접촉점에서 물체에 수직인 법선을 구하여 두 법선의 교점의 좌표와 접촉점까지의 거리를 계산하여 곡률반경을 구하는 방법이다. 그림 5와 같이 로봇손을 이용하여 물체의 곡률이 일정하다고 여겨지는 구간에 두번 접촉을 한다. 여기서 $C^i \in \mathbb{R}^3$ 는 로봇과 물체와의 i 번째 접촉점을 나타내며, J_j^i 는 각 조인트의 위치를 나타내는 벡터이고 윗첨자는 시행 순서를, 아래첨자는 관절의 순서를 나타낸다. ρ 는 물체의 곡률반경으로 접촉이 이루어진 두점사이에서는 그 값이 일정하다고 본다.

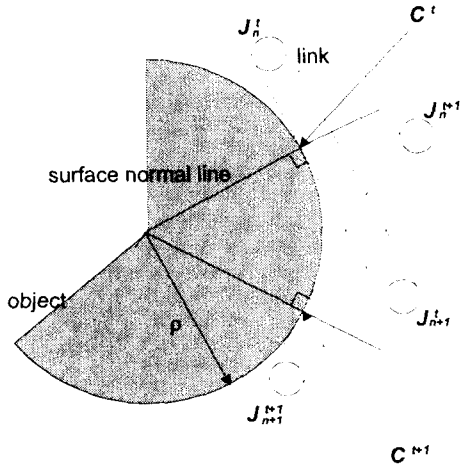


그림 5: 형상정보 파악 알고리즘의 개념도

먼저 법선벡터를 만들기 위해 방향벡터를 알아야 하는데 로봇의 표면방정식을 $\phi(x, y, z) = 0$ 라고 나타낼 때 법선의 방향벡터는 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

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

벡터의 성질을 이용해 법선벡터는 아래식과 같이 쓸 수 있고 a 는 스칼라양으로 방향벡터의 크기를 말한다.

$$a\nabla\phi(C) + C \quad (7)$$

각 접촉점 C^t 와 C^{t+1} 에서 법선벡터를 구할 수 있으며 이 두 식을 연립하면 교차점을 얻게 된다.

$$a\nabla\phi(C^t) + C^t = b\nabla\phi(C^{t+1}) + C^{t+1} \quad (8)$$

(8)식에서 구한 교차점의 좌표를 Q 라 하면 물체의 곡률반경 ρ 는 다음과 같이 두점사이의 거리로 나타낼 수 있다.

$$\rho = \|QC^t\| \quad (9)$$

2.4 물체의 형상재구성 알고리즘

그림 6은 형상재구성 알고리즘에 대한 개념도를 나타낸다. 칼로 부우를 써는 것처럼 2.3절의 형상정보 파악 알고리즘을 반복하여 적용하고 이를 중합하면 물체의 형상을 알아낼 수 있다.

그림 7은 위의 세가지 알고리즘을 통합한 S.E.P.의 프로그램 순서도를 보여준다.

3. 실험장치 및 과정

실험장치의 전체적인 개략도는 아래 그림 8에 나타내었다. 3축 SCARA로봇을 이용하였으며 각 관절의 길이는 각각 0.25(m), 0.18(m)이며, 엔드이펙터에 0.20(m)길이의 로봇손을 장착하였다. 한

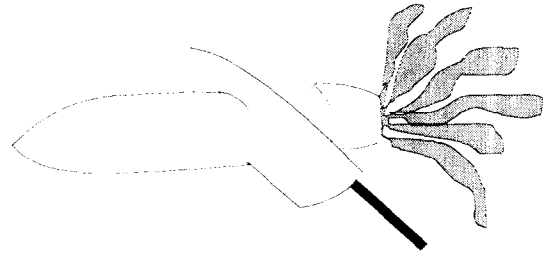


그림 6: 형상재구성 알고리즘의 개념도

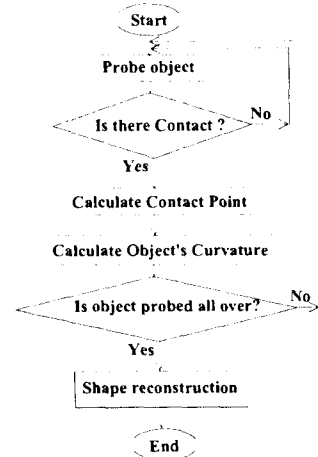


그림 7: S.E.P.의 순서도

대의 퍼스널 컴퓨터(Pentium 166MHz)는 로봇을 제어하게 되어 있으며, 다른 한대의 퍼스널 컴퓨터(Pentium 90MHz)는 LAN을 이용해 데이터를 공유해 로봇의 거동과 최종 물체의 형상을 표시(display)하는 용도로 사용하였다. 로봇에 제어 명령을 주기 위해 D/A-board를 사용하였으며 엔드이펙터의 위치에는 힘센서(JR3)를 장착하였다.

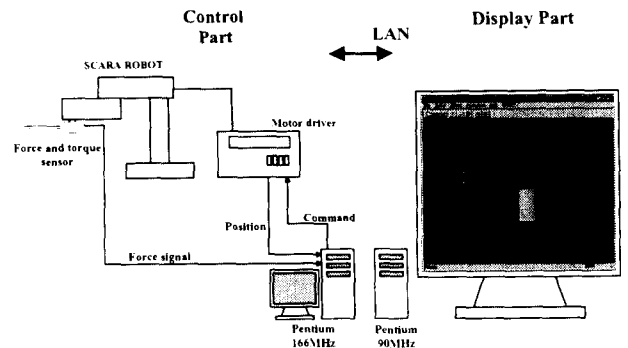
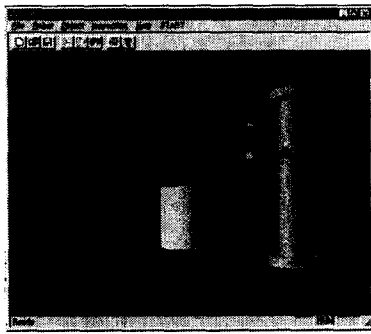


그림 8: S.E.P.실험을 위한 실험장치

그림 9의 (A)와 (B)는 S.E.P.의 실험 과정으로 그림 9 (A)와 같이 처음 접촉을 이룬후 그때 접촉점의 위치를 계산하고 그림 9 (B)와 같이 접촉점의 차를 두고 다시 접촉을 이루고 접촉점과 두 점 사이의 곡률을 계산하여 두 점 사이를 곡선으로 이어주는 과정을 보여준다.



(A)



(B)

그림 9: S.E.P. 실험과정

표 1: S.E.P. 실험 결과

시행횟수	실제 곡률반경(m)	측정된 곡률반경(m)
1	0.03	0.0312
2	0.03	0.0321
3	0.03	0.0319

4. 결론

표 1은 반경 0.03(m)의 원기둥을 물체로 삼아 세번 측정 한 결과를 표로 나타낸 것으로 평균 5.7%의 오차를 보였다.

그림 10은 두 접촉점 사이의 곡률을 알아내 곡선으로 이어 준 모양을 나타낸다.

5. 결론

로봇손을 이용하여 미지물체의 형상을 알아내기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 힘센서를 이용하여 물체의 형상을 알아낼 수 있어 많은 비용과 계산과정을 줄일 수 있다는 장점이 있으며, 3축 SCARA로봇을 이용하여 제안된 방법의 실효성을 실험적으로 입증하였다.

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.

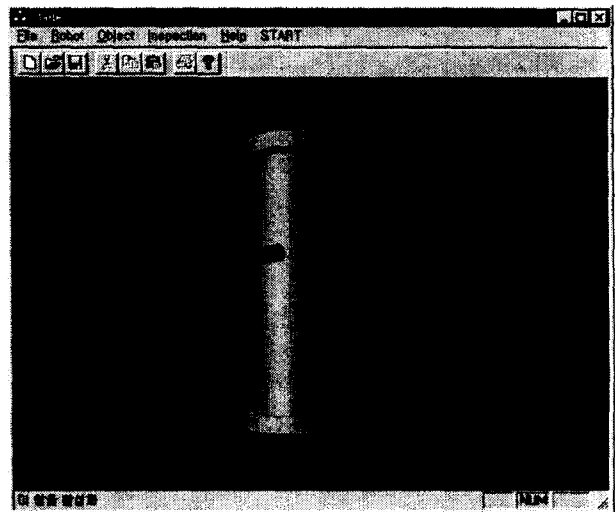


그림 10: S.E.P. 실험 결과

[3] 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.

[4] M. Huber, and R. A. Grupen, "2-D Contact Detection and Localization Using Proprioceptive Information," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 1, pp. 23-33, 1994.

[5] 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.

[6] E. J. Nicolson, and R. S. Fearing, "Fourier Analysis of the Bandlimited Shape Estimation Problem in Tactile Sensing," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2807-2813, 1995.

[7] D. J. Montana, "The Kinematics of Contact and Grasp," *Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 7, No. 3, pp. 17-32, 1988.

[8] C. Cai, and B. Roth, "On the Spatial Motion of a Rigid Bodies with Point Contact," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 686-695, 1987.

[9] H. Zhang, H. Maekawa, and K. Tanie, "Sensitivity Analysis and Experiments of Curvature Estimation Based on Rolling Contact," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3514-3519, 1996.

[10] M. Charlebois, K. Gupta, and S. Payandeh, "Shape Description of General Curved Surfaces Using Tactile Sensing and Surface Normal Information," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2819-2824, 1997.

[11] S. Caselli, C. Magnanini, F. Zanichelli, and E. Caratli, "Efficient Exploration and Recognition of Convex Objects Based on Haptic Perception," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3508-3513, 1996.

[12] T. Yoshikawa, *Foundations of Robotics: Analysis and Control*, The MIT Press, 1988.