

유연성 있는 부품의 조립을 위한 부품변형 및 상대오차 측정장치

A Sensing System for Measuring Parts Deformation and a Misalignment in Flexible Parts Assembly

◦김 진 영*, 조 형 석**, 김 성 권***

*한국 과학기술원 자동화 및 설계공학과(Tel: 02-958-3461; Fax: 02- 968-1638)

**한국 과학기술원 기계공학과 (Tel: 042-968-3213; Fax: 042-968-3210; E-mail: hscho@lca.kaist.ac.kr)

***삼성전자 생산기술센터 (Tel: 0331-200-2200; Fax: 0331-200-2420)

Abstracts Flexible parts can be deformed by the contact forces during assembly on the contrary to rigid parts and thus their successful assembly requires informations about their deformation as well as a misalignment between mating parts. However, because of the nonlinear and complex relationship between parts deformation and assembly reaction forces, it is difficult to acquire all required informations from only the reaction forces during assembly. In this paper, we propose a sensing system consisting of a camera and multiple mirrors for flexible parts assembly. Simulation results show that the system can be effectively used for detecting parts deformation and a misalignment between mating parts.

Keywords Assembly, Flexible Part, Part Deformation, Misalignment, Camera

1. 서론

조립이란 서로 독립된 물체를 미리 주어진 기하학적 관계에 맞도록 그들을 위치시키는(fitting) 작업이다. 따라서 조립품에 대한 정확한 정보획득, 정확한 위치설정과 이동이 가능하다면 조립도 항상 이루어질 수 있다. 그러나 실제로 로봇을 이용한 조립에서는 로봇의 위치 정확도 부족, 부품 이송장치의 부정확성, 조립부품의 가공오차, 부정확한 교시 등으로 인해 부품간의 상대오차(misalignment)가 발생하고 이로 인해 조립이 어렵게 되어 성공적인 조립을 위해서는 이러한 오차의 보정이 필요하게 된다.

이와 같은 조립문제를 해결하기 위한 연구로서 그 동안에는 대부분이 부품변형을 무시할 수 있는 단단한 부품(rigid part)을 대상으로 이루어져 왔는데, 이들 방법은 크게 수동 적응법(passive accommodation), 능동 적응법(active accommodation) 그리고 이 두가지 방법을 혼합한 수동-능동 적응법(passive-active accommodation)으로 나뉘어질 수 있다[2]. 이 중에서 능동 적응법에 적용되는 센서에는 시각(vision) 센서, 근접(proximity) 센서 그리고 힘(force) 센서와 같은 접촉(tactile) 센서가 있는데[11], 특히 시각센서는 부품형상 및 위치, 방향 등을 감지할 수 있는 특성으로 인하여 최근들어 그 사용이 증가되고 있다.

한편 부품에 유연성이 있어서 조립시 조립반력에 의해 변형이 발생하거나 단순히 부품을 파지(gripping)하고 있는 중에도 자중에 의해 처짐 등이 발생할 수 있는 유연부품의 조립(flexible parts assembly)에 관해서는 많은 연구가 이루어지지 않았을 뿐 아니라, 그나마도 초보적인 수준에 머무르고 있는데, 이러한 연구로는 다음과 같은 것들이 있다. 우선 Merlet[6]는 유연한 등근 뼈의 삽입작업(peg-in-hole)에서 힘과 변형과의 관계를 유도하였는데 두점 접촉을 전제로 하는 제약이 있을 뿐만 아니라, 유도된 힘-변형 관계식의 과도한 비선형성으로 인해 실제 조립작업 적용에 현실성이 없다. Zheng[13]은 폭이 좁고 길이가 긴 보(beam)를 수평으로 잡고 자중에 의해 처진 상태에서 구멍에 삽입하는 작업을 대상으로 모델링 및 조립전략을 수립하였는데, 이는 자중에 의한 처짐만을 고려한 1차원 변형에 국한하고 있다. Nakagaki[8]는 Zheng과 유사한 유연보의 삽입작업을 대상으로 삽입시의 좌굴모양 및 힘 관계를 해석하였는데, 이도 역시 1차원 변형에 국한하고 있다. 이상의 연구들은 부품의 물성을 알고 있다는 가정하에

서 해석적인 방법을 이용하여 접근한 것이다.

Chen[1]은 시각센서를 이용하여 처짐에 의한 유연보의 변형특성을 추출하고 이로부터 변형량을 추정하였다. 이 밖의 유연부품조립에 관한 연구로서 유한요소해석 또는 인간행동의 이식을 통한 호스(hose)의 삽입[3],[10], 시각센서를 이용한 벨트의 조립[7] 등이 있다.

이상의 연구들로부터 알 수 있듯이 단단한 부품의 조립은 RCC와 같은 수동적 컴플라이언스(compliance)가 있는 손목기구를 이용하거나[12] 힘센서의 정보로부터 상대오차를 보정해줌으로써 가능할 수 있다[9]. 그러나 이와 달리 유연부품의 경우에는 부품 자체의 변형으로 인하여 별도의 수동 컴플라이언스 부여를 위한 손목기구의 사용이 부적합하고 따라서 성공적인 조립을 위해서는 상대오차 뿐만 아니라 부품의 변형형상도 알아야 할 필요가 있다. 그런데 조립반력과 부품변형 사이의 관계는 매우 복잡하고 비선형적이어서[6] 힘정보만으로 상대오차와 부품의 변형형상을 알아내기는 매우 어렵다.

따라서 본 연구에서는 하나의 시각센서를 이용하여 상대오차 및 부품의 변형형상을 측정할 수 있는 측정장치를 제안하고, 3차원 공간상의 임의의 형상이 카메라 영상면에 어떻게 투영되는지, 또한 역으로 카메라에 투영된 두개의 2차원 영상정보로부터 3차원 공간상의 형상이 어떻게 재구성되는지 등을 시뮬레이션을 통해 보임으로써 제안된 측정장치의 유효성을 검증하고자 한다.

2. 측정장치의 원리 및 설계

2.1 측정원리

제안된 측정장치는 그림 1(a)와 같이 한대의 카메라와 두개의 평면거울 그리고 두개의 사각뿔거울(pyramidal mirror)로 이루어져 있는데, 한대의 카메라로 부품의 임의의 변형형상을 측정하기 위하여 그림 1(b)와 같이 두개의 거울에 비친 영상을 조합하여 이로부터 부품의 3차원 정보를 알 수 있도록 하였다. 즉 한대의 카메라로 스테레오 영상(stereo vision) 효과를 얻기 위하여 두개의 평면거울을 사각뿔형상의 이웃하는 두면에 배치하고, 사각뿔의 나머지 두면에도 마찬가지로 평면거울을 배치함으로써 이들로부터도 부품의 변형형상 등 원하는 정보를 얻을 수 있도록 하였는데, 이는 사각뿔의 두면만에 의해서는 보이지 않는 반대편에 대한 정보까지 이용할 수 있도록 함으로써

사각(occlusion)에 의한 정보누락을 방지하고 있다.

두개의 사각뿔거울 중 바깥쪽에 배치되어 있는 외측 사각뿔 거울(outer pyramidal mirror)은 사각뿔의 내부 4개면이 평면거울로 이루어져 있으며, 안쪽에 위치한 내측 사각뿔거울(inner pyramidal mirror)은 사각뿔의 외부 4개면이 평면거울로 이루어져 있다. 그림 1(a)에 보여진 것 처럼 먼저 외측 사각뿔거울의 4개면에 투영된 상대오차 및 부품의 변형형상은 내측 사각뿔거울의 대응하는 4개면을 통해 수직으로 위를 향하고, 다시 두개의 평면거울을 거쳐 수직방향으로 놓여있는 카메라의 2차원 평면에 투영되게 되는데, 그림 1(c)는 카메라를 통해 얻을 수 있는 영상을 보여준다.

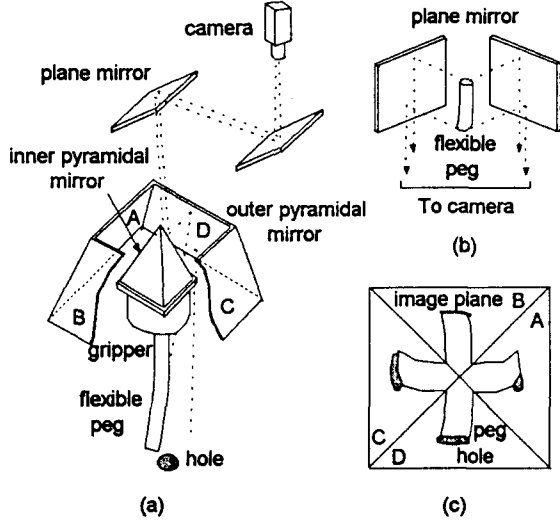


그림 1. 제안된 측정장치

Fig. 1. The schematic of the proposed sensing system: (a) a configuration of the sensing system, (b) sensing principle, (c) an expecting image

4.2 모델링

제안된 측정장치를 이용하여 부품의 변형 및 상대오차를 측정하기 위해서는 실제 부품의 위치 및 변형형상과 카메라에 투영된 영상 사이의 사상(mapping)관계를 알아야 한다. 제안된 측정장치는 그림 1에서 보는 것 처럼 여러개의 거울로 이루어져 있기 때문에 작업공간상의 임의의 한점에서 출발한 빛이 여러개의 거울에 차례로 반사되면서 카메라 영상면에 사상되는 것이므로, 작업공간과 센서공간 사이의 사상관계는 결국 거울의 반사법칙을 이용하여 구할 수 있다.

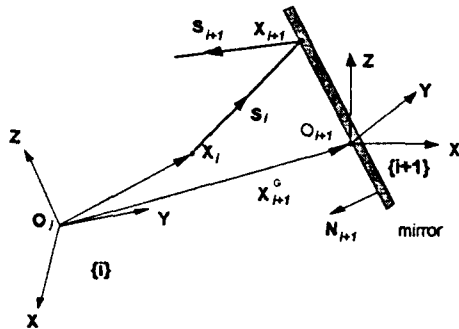


그림 2. 거울의 반사법칙

Fig. 2. A diagram showing the incident ray and the reflected ray

이를 위하여 우선 그림 2와 같은 하나의 거울에 대해서 입사광과 반사광의 방향이 어떤 관계를 갖는지, 또한 입사광이 거울면의 어디에 부딪히는지를 구하고자 한다. 즉 임의의 좌표계 {i}에서 정의된 공

간상의 한점 $X_i = (x_i, y_i, z_i, 1)^T$ 에서 방향 코사인(direction cosine) $S_i = (l_i, m_i, n_i, 1)^T$ 로 출발한 빛이 법선벡터(normal vector)가 $N_{i+1} = (L_{i+1}, M_{i+1}, N_{i+1}, 1)^T$ 인 거울면에 부딪히는 위치 $X_{i+1} = (x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}, 1)^T$ 과 반사되는 빛의 방향 코사인 $S_{i+1} = (l_{i+1}, m_{i+1}, n_{i+1}, 1)^T$ 은 다음과 같다[4],[5].

$$X_{i+1} = X_i + \frac{(P_{i+1} - X_i \cdot N_{i+1})}{S_i \cdot N_{i+1}} S_i = R_{i+1} X_i \quad (1)$$

$$S_{i+1} = S_i - 2(S_i \cdot N_{i+1}) N_{i+1} = r_{i+1} S_i \quad (2)$$

여기서 P_{i+1} 은 좌표계 {i}의 원점에서 {i+1}번째 거울면까지의 수직거리로써 이것과 영상좌표행렬(image-coordinate matrix) R_{i+1} , 반사행렬(reflection matrix) r_{i+1} 은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{i+1} = X_{i+1}^a \cdot N_{i+1} \quad (3)$$

$$R_{i+1} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{L_{i+1}^2}{P_{i+1}} & -\frac{M_{i+1}L_{i+1}}{P_{i+1}} & -\frac{N_{i+1}L_{i+1}}{P_{i+1}} & \frac{P_{i+1}}{P_{i+1}} \\ \frac{L_{i+1}M_{i+1}}{P_{i+1}} & 1 - \frac{M_{i+1}^2}{P_{i+1}} & -\frac{N_{i+1}M_{i+1}}{P_{i+1}} & \frac{P_{i+1}}{P_{i+1}} \\ \frac{L_{i+1}N_{i+1}}{P_{i+1}} & -\frac{M_{i+1}N_{i+1}}{P_{i+1}} & 1 - \frac{N_{i+1}^2}{P_{i+1}} & \frac{P_{i+1}}{P_{i+1}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$r_{i+1} = \begin{pmatrix} 1 - 2\frac{L_{i+1}^2}{P_{i+1}} & -2\frac{L_{i+1}M_{i+1}}{P_{i+1}} & -2\frac{L_{i+1}N_{i+1}}{P_{i+1}} \\ -2\frac{L_{i+1}M_{i+1}}{P_{i+1}} & 1 - 2\frac{M_{i+1}^2}{P_{i+1}} & -2\frac{M_{i+1}N_{i+1}}{P_{i+1}} \\ -2\frac{L_{i+1}N_{i+1}}{P_{i+1}} & -2\frac{M_{i+1}N_{i+1}}{P_{i+1}} & 1 - 2\frac{N_{i+1}^2}{P_{i+1}} \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서 X_{i+1}^a 은 좌표계 {i}의 원점에서 {i+1}번째 거울까지의 변위 벡터이며, P_{i+1} 은 입사광선 S_i 의 {i+1}번째 거울에 수직인 성분으로써 다음식으로 주어진다.

$$P_{i+1} = S_i \cdot N_{i+1} \quad (6)$$

여러개의 거울에 의해 빛이 차례로 반사되어 나가는 경우에 있어서 빛이 n번째 거울표면에 부딪히는 위치 X_n 과 n번째 거울에서의 반사광의 방향 S_n 은 (1), (2)를 이용하면 다음과 같이 구해진다.

$$X_n = R_n R_{n-1} \dots R_1 X_0 = R_n X_0 \quad (7)$$

$$S_n = r_n r_{n-1} \dots r_1 S_0 = r_n S_0 \quad (8)$$

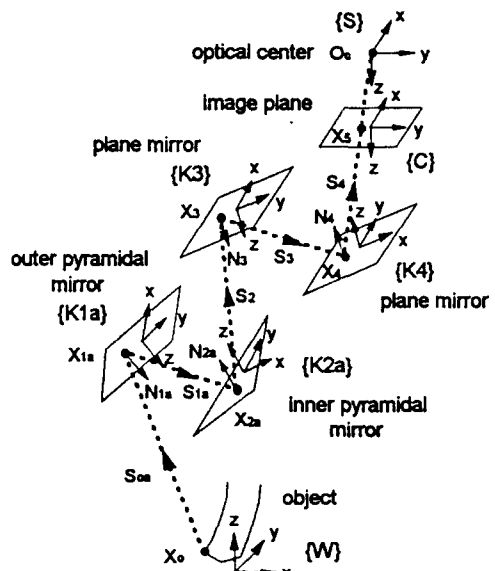


그림 3. 측정장치의 좌표계

Fig. 3. The coordinate system of the proposed sensing system

제안된 측정장치에 위의 결과를 적용하기 위하여 그림 3과 같이 좌표계를 설정한다. 여기서 {K1a}, {K2a}는 4개의 외측 사각뿔거울 및 내측 사각뿔거울 중에서 각각 하나의 거울에 대한 좌표계이며, {K3}, {K4}는 두 평면거울의 좌표계, 그리고 {C}는 카메라 영상면에 부착되어 있는 좌표계이다. 또한 {W}는 측정대상물을 기술하기 위한 작업공간의 좌표계이며, {S}는 광학계의 중심 O_c 에 원점을 갖는 센서 좌표계이다. 측정대상물의 임의의 한점 X_0 에서 S_{0m} 의 방향으로 출발한 빛이 {K1a}, {K2a}, {K3}, {K4}의 4개의 거울면에 반사된 후 S_4 의 방향으로 되어 카메라 영상면의 한점 X_s 에 투영된다고 할 때 X_s 및 S_4 를 어떤 기준좌표계 {B}에 관해서 기술하면 다음과 같다.

$${}^B X_s = {}^B R_5 {}^B R_4 {}^B R_3 {}^B R_2 {}^B R_1 {}^B X_0 = {}^B R_{51} {}^B X_0 \quad (9)$$

$${}^B S_4 = {}^B r_4 {}^B r_3 {}^B r_2 {}^B r_1 {}^B S_0 = {}^B r_{41} {}^B S_0 \quad (10)$$

(9)와 (10)은 거울의 법선벡터와 변위벡터의 함수이므로 이들을 알면 (9)와 (10)을 적용할 수 있는데, 이들은 모두 기준좌표계 {B}에 관해서 기술되어야 하며, 또한 법선벡터의 경우에는 단위벡터이어야 한다.

4.3 설계

제안된 측정장치를 설계하기 위해서는 측정장치의 사용환경으로부터 그에 맞는 사양을 결정해야 하는데, 조립하려는 대상물의 크기와 이에 기초한 측정영역(field of view), 사용 로봇의 크기 및 조립대상물을 파지할 핸드(hand)의 크기, 그리고 로봇의 장착을 고려하여 결정되는 측정거리(working distance) 등으로부터 설계변수를 결정할 수 있다. 우선 이들로부터 카메라 렌즈의 초점거리(focal length) f 를 구하면 다음과 같다.

$$f = \frac{cw}{c+v} \quad (11)$$

여기서 c 는 카메라 활상면의 크기이고 v 는 측정영역의 크기, w 는 측정거리이다. 다음으로는 거울들의 크기와 배치위치 그리고 배치각도 등을 결정한다. 이와 같은 측정장치의 설계변수들은 그림 4와 같은 광로추적 시뮬레이션을 통해 주어진 사양을 만족하도록 결정할 수 있다.

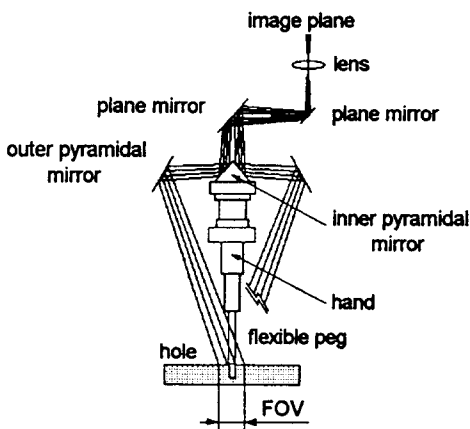


그림 4. 설계변수 결정을 위한 광로 추적

Fig. 4. The ray tracing for determination of design parameters

3. 시뮬레이션

제안된 측정장치를 이용하여 3차원 공간상의 임의의 형상을 측정

할 때 이것이 카메라 영상면에 어떻게 투영(projection)되는지, 또한 역으로 카메라 영상면에 투영된 2차원 영상정보로부터 재구성(reconstruction)한 3차원 형상은 어떻게 되는지 등을 알아보기 위하여 간단한 도형을 대상으로 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션에 사용한 설계변수로서 두 평면거울 및 내측 사각뿔거울의 배치각도는 45° 로 하였고, 외측 사각뿔거울의 배치각도는 57.2° 로 하였다.

한편 3차원 영상을 재구성할 때 두개의 2차원 영상정보에서 물체의 같은 점을 나타내는 대응점(corresponding point)은 알고 있다고 가정하였다. 그림 5에는 카메라 영상면으로부터의 측정거리가 482mm 인 수평평면에 놓여져 있는 원형 및 정사각형 물체에 대해 카메라 영상면에 투영된 모습(projected image)과 이중에서 A, B의 두개의 투영된 영상을 이용하여 역으로 3차원 공간에서 재구성한 모습(reconstructed image)이 보여진다. 그림 6은 측정영역 내의 공간에서 임의의 위치 및 자세로 놓여져 있는 원형 및 정사각형 물체에 대해 마찬가지로 카메라 영상면에 투영된 모습과 이를 이용하여 역으로 3차원 공간에서 재구성한 모습을 보여준다. 그림 5와 그림 6에서 재구성된 영상의 위치와 형상이 원래 물체와 동일함을 알 수 있는데, 따라서 제안된 측정장치를 이용하여 조립대상물의 변형형상 및 상대오차를 측정하는 것이 가능함을 예상할 수 있다.

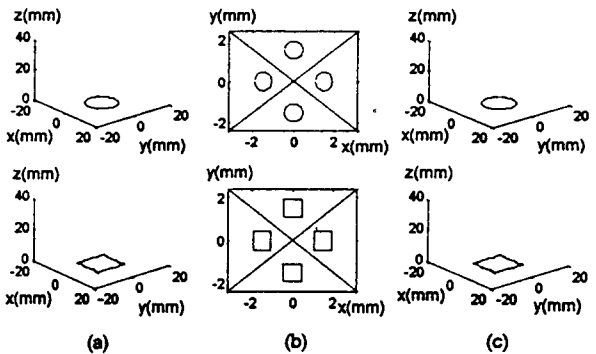


그림 5. 수평평 상에 있는 물체의 투영 및 영상 재구성

Fig. 5. The projection and image reconstruction of an object in horizontal plane: (a) original object, (b) projected image, (c) reconstructed image

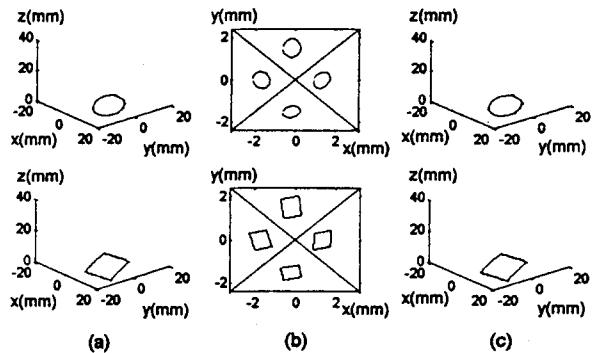


그림 6. 임의의 위치에 있는 물체의 투영 및 영상 재구성

Fig. 6. The projection and image reconstruction of an object in space: (a) original object, (b) projected image, (c) reconstructed image

4. 결론

본 연구에서는 유연부품의 조립작업에서 부품의 변형형상 및 조립상태물 간의 상대오차(misalignment)를 측정할 수 있는 측정장치를 제안하고, 간단한 시뮬레이션을 통해서 제안된 측정장치의 유효성을 검증하였다.

본 연구에서 제안된 측정장치는 여러개의 거울들과 하나의 카메라

라만으로 이루어져 있기 때문에 구조가 간단하고, 로봇 선단에 쉽게 부착되어 이동하면서 측정기능을 수행할 수 있으며, 따라서 실제 조립작업 적용에 용이하다. 적절한 거울배치를 통해 하나의 카메라만을 가지고도 스테레오 영상효과를 얻을 수 있도록 하였으며, 또한 사각에 의한 정보손실도 방지하고 있다.

그리고 3차원 공간상의 원형 및 사각형에 대해 카메라 영상면으로의 투영, 역으로 대응점(corresponding point)을 알고 있는 이들 2차원 정보로부터 3차원 공간상으로 재구성하는 시뮬레이션에 의해 재구성된 모습이 원래 모습과 동일함을 확인하였다. 즉 대응점을 알 수 있다면 제안된 측정장치를 이용하여 부품변형 및 상대오차 측정이 가능함을 확인할 수 있었다.

한편 제안된 측정장치를 실제 조립작업에 적용할 때 대응점을 어떻게 찾을 것인가에 관해서는 앞으로 연구가 필요한 부분이다.

참고문헌

- [1] C. Chen and Y. F. Zheng, "Deformation Identification and Estimation of One-Dimensional Objects by Vision Sensors", *J of Robotic Systems*, Vol. 9, No. 5, pp. 595-612, 1992.
- [2] H. S. Cho, H. J. Warnecke and D. G. Gwon, "Robotic assembly: a synthesizing overview", *Robotica*, Vol. 5, pp. 153-165, 1987.
- [3] S. Hirai, H. Noguchi and K. Iwata, "Transplantation of Human Skillful Motion to Manipulators in Insertion of Deformable Tubes", *Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1839-1845, 1995.
- [4] W. S. Kim, H. S. Cho and S. Kim, "Omnidirectional Sensing Device for Assembly of a Part with Arbitrary Cross-Section" *KACC*, pp. 153-156, 1995.
- [5] R. Kingslake, *Applied Optics and Optical Engineering: Optical Components*, Vol. 3, Academic Press, New York, pp. 269-308, 1965.
- [6] J. P. Merlet, "A Control Law for the Insertion of a Flexible Peg by Using a Robot", *Proc. of 3rd Int. Conf. of RoViSec.*, pp. 453-460, 1983.
- [7] J. Miura and K. Ikeuchi, "Assembly of Flexible Objects without Analytical Models", *Int. Conf. on IROS*, pp. 77-83, 1995.
- [8] H. Nakagaki, K. Kitagaki and H. Tsukune, "Study of Insertion Task of a Flexible Beam into a Hole", *Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 330-335, 1995.
- [9] Y. K. Park and H. S. Cho, "Fuzzy Rule-based Assembly Algorithm for Precision Parts Mating", *Mechatronics*, Vol. 3, pp. 433-450, 1993.
- [10] R. D. Schraft, J. Walther and B. Frankenhauser, "Assembly of Non-Rigid parts with sensor controlled industrial robots", *Proc. of 7th Conf. on Assembly Automation*, pp. 299-310, 1986.
- [11] N. Takashi, H. Ikeda, T. Horiguchi and H. Fukuchi, "Hierarchical Robot Sensors Application in Assembly Tasks", *15th ISIR*, pp. 829-836, 1985.
- [12] D. E. Whitney, "Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts", *ASME J. Dynam. Syst. Measur. Control*, Vol. 104, pp. 65-77, 1982.
- [13] Y. F. Zheng, R. Pei and C. Chen, "Strategies for Automatic Assembly of Deformable Objects", *Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2598-2603, 1991.