

센서퓨전 기술을 이용한 정밀조립작업

°이종길*, 이범희*

* 서울대학교 제어계측공학과

Precise Assembly Task Using Sensor Fusion Technology

°J.K. Lee*, B.H. Lee*

* Department of Control & Instrumentation Engineering,
Seoul National University

ABSTRACT

We use three sensors such as a vision sensor, a proximity sensor, and a force/torque sensor fused by fuzzy logic in a peg-in-hole task. The vision and proximity sensors are usually used for gross motion control and the information is used here to position the peg around the hole. The force/torque sensor is used for fine motion control and the information is used to insert the peg into the hole precisely. Throughout the task, the information of all the three sensors is fused by a fuzzy logic controller. Some simulation results are also presented for verification.

1. 서 론

자동화 분야의 산업에 로봇이 응용되면서 생산성에 큰 향상이 이루어져 왔다. 기존의 로봇 작업은 대개 단순작업이거나 인간에 의해 지시된 대로만 움직이는 작업이 대부분을 차지해 왔다. 그러나, 이러한 작업은 외부환경이 변하거나 로봇의 동작오차가 누적됨에 따라 원하는 결과를 얻지 못하는 경우가 발생한다. 이러한 문제는 로봇이 외부환경에 적절히 대응할 수 있는 지능을 지니게 함으로써 해결할 수 있다. 로봇이 외부환경을 인식하고 이를 제어에 이용하기 위해서는 센서 시스템을 이용하는 것이 필요하다.

센서는 접촉센서와 비접촉센서로 나눌 수 있는데 접촉센서에는 힘/토크 센서, touch센서 등이 있고, 비접촉센서에는 원거리센서, 근접센서, 비전센서 등이 있다. 이러한 센서를 단일하게 사용하는 경우에는 많은 한계가 있다. 이와 같은 단일 센서의 한계를 극복하는 방법으로는 같은 종류의 센서를 여러 개 사용하거나 서로 다른 종류의 센서를 사용하는 방법이 있다. 여러가지 센서로부터의 데이터를 융합하는 센서퓨전 기법들이 많이 연구되어 왔는데 다음과 같은 방법들이 있다. [1]

- 1) 가중평균기법

- 2) 칼만 필터
- 3) 베이지언 추정 (Bayesian Estimation)
- 4) 다중 베이지언 (Multi-Bayesian)
- 5) 통계 결정 이론 (Statistical Decision Theory)
- 6) 샤페-덴스터 증거 추론 (Shafer-Dempster Evidential Reasoning)
- 7) 퍼지 논리
- 8) 확정 요인을 가진 생산 규칙 (Production rules with Confidence Factors)

위와 같은 방법들은 대개 확률적인 방법에 기초하고 있는데 확률적인 방법에 의한 센서퓨전은 측정대상의 확률적 특성을 알아야하고 잡음의 평균, 분산 등을 알아야 하는 어려움이 있다. 센서 융합을 이용해서 작업에 응용한 경우도 많은데 A.M.Flynn[2]은 소나 센서와 적외선 센서를 이동로봇의 주행에 필요한 주변환경을 인식하는데 사용했고, John M. Richardson[3]등은 센서융합의 기법을 제시함과 아울러 제시된 기법에 의해서 비전정보와 음향정보를 융합하는 예를 보였다. M.A.ABIDI[4]등은 유체교환시스템(Fluid interchange system)과 모듈교환시스템(Module interchange system)에 다중센서 데이터를 사용했다. S.H.Lee[5]는 퍼지추론을 이용한 비전센서와 힘/토크센서의 융합에 의해서 삽입작업을 연구했다.

삽입작업은 로봇의 조립작업 중 가장 대표적인 작업의 하나인데, TATSUO GOTO[6]등은 유연한 기계구조를 가진 로봇에 힘센서를 효과적으로 이용하여 정밀한 삽입작업을 수행했다. DANIEL E. Whitney[7]는 매니플레이터의 미세 동작(Fine Motion)에 힘 되먹임 제어를 하고 이에 의해 삽입작업을 수행했다. Tomas Lozano-Perez[8]등은 configuration space의 개념과 원상(Pre-image)의 개념을 도입해서 로봇 미세동작의 자동생성(Automatic synthesis)을 연구했다. S. N. Gottschlich[9]등은 동력학적인 접근에 의한 정밀조립작업을 수행했고, Wolfgang Seyfferth[10]등은 조립작업을 위한 동력학 모델을 제시했다. 이외에 퍼지이론을 이용한 조립작업도

연구되었다.[11-12]

이 논문에서는 퍼지추론에 의해 비전센서, 근접센서, 그리고 힘/토크 센서의 정보를 융합하고 이를 삽입작업에 응용하는 것을 보이기로 한다. 비전센서와 근접센서는 픽을 홀의 근처에 가져가는 역할을 하고, 홀에 다가가서는 힘/토크센서에 의해서 미세한 삽입작업을 수행한다. 이 전 과정에서 세 가지의 센서는 퍼지추론에 의해서 융합된다.

2. 삽입 시스템

2.1 문제 정의와 시스템 구성

그림 2.1은 삽입작업을 위한 시스템의 구성을 나타낸다. 여기서 사용하는 센서는 비전센서, 근접센서, 힘/토크센서들이다. 비전센서는 CCD 카메라를 사용하고 픽의 아래방향으로 향하게 한다. 비전센서에 의한 정보는 픽에 가린 홀의 영상을 문턱값(threshold)을 이용해서 구하는 것이고, 이로부터 홀의 면적을 구한다. 근접센서는 로봇 손의 끝에 2쌍을 설치한다. 근접센서의 정보는 센서의 정면에 홀이 있는가를 결정하는 것이다. 힘/토크센서는 로봇 손목에 장착하는데 이 센서의 정보는 픽이 홀과 접촉해 있을 때 발생하는 모멘트 정보이다. 픽은 미리 잡고 있다고 가정하고 픽을 잡을 때 발생하는 위치 오차나 오리엔테이션(orientation)오차는 고려하지 않는다. 로봇트는 z 축 방향으로 일정한 힘을 가하면서 x축, y축 방향으로 움직인다. 따라서, z축 방향으로는 힘 제어를 하고 x축, y축 방향으로는 위치제어를 한다. 삽입에 사용되는 픽은 원통형이고 픽과 홀에는 챔퍼(chamfer)가 없다. z축 방향의 힘이 정해진 값을 넘지 않으면 픽이 홀에 들어간 것을 의미하므로 작업을 끝낸다.

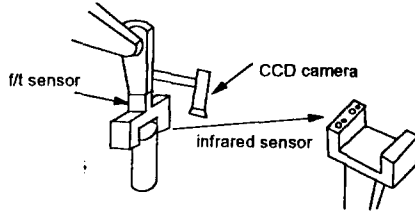


그림 2.1 시스템 구성

로봇트좌표계에 대한 각 좌표계와의 관계는 알고 있다고 가정한다. 이 외에 다음과 같은 가정을 한다.

- 로봇트 손과 픽은 하나의 강체(rigid body)이다.
- 픽의 밑면과 작업대는 완전한 평면이다.
- 주변 조명은 작업에 적절한 상태이다.

2.2 센서정보 해석

2.2.1 비전센서

먼저, 그레이 스케일(grey-scale)의 영상 I' 를 문턱값(threshold)을 이용하여 이진영상(binary image)으로 변환한다. [13] 이렇게 변환된 이진영상에 대한 특성함수 $f(x, y)$ 는 배

경에 해당하는 점에 대해서는 0의 값을 가지고 물체에 대해서는 1의 값을 가진다. 삽입작업에서 홀의 영상을 읽어들이면 홀에 해당하는 부분의 특성함수값이 1이 되도록 문턱값을 정한다.

이차원 물체의 위치를 표현하는 한 점을 택하는 방법으로 면적의 중심(center of area)을 이용한다. 면적의 중심점 (\bar{x}, \bar{y}) 을 계산하기 위해서 픽에 가리워진 홀의 면적 A 와 일차 모멘트 M_x, M_y 를 아래와 같이 결정한다.[14][15]

$$A = \iint_I f(x, y) dx dy \quad (2.1)$$

$$M_x = \iint_I x f(x, y) dx dy \quad (2.2)$$

$$M_y = \iint_I y f(x, y) dx dy \quad (2.3)$$

면적 중심의 좌표 \bar{x}, \bar{y} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{x} = M_x / A \quad (2.4)$$

$$\bar{y} = M_y / A \quad (2.5)$$

$N \times N$ 크기의 이진영상의 경우 다음과 같이 면적 중심의 좌표를 구할 수 있다.

$$\bar{x} = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N x f(x, y) / \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N f(x, y) \quad (2.6)$$

$$\bar{y} = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N y f(x, y) / \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N f(x, y) \quad (2.7)$$

위의 중심좌표를 이용하여 로봇트의 이동방향의 단위 벡터(unit vector) $\vec{u}_s = (u_{sx}, u_{sy})$ 를 구한다.

$$u_{sx} = \frac{\bar{x}}{\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}} \quad (2.8)$$

$$u_{sy} = \frac{\bar{y}}{\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}}$$

2.2.2 근접센서

근접센서로는 적외선센서를 많이 이용한다. [16] [17] [18] 적외선센서는 적외선을 방출하는 출광부와 반사되어 오는 적외선을 받아들이는 수광부로 이루어져 있다. 수광부의 전기신호는 반사되어 돌아오는 적외선의 양에 관련된다. 감지하려는 물체의 수직거리에 대한 전형적인 신호의 크기는 그림 2.2와 같다. 감지하려는 물체가 기울어져 있을 때의 센서의 응답도 그림 2.2에 나타내었다. 따라서, 물체의 표면성질을 알면 센서로부터의 거리와 물체의 기울어진 각도를 알아낼 수 있다. 그림 2.3은 기본적인 측정방법을 나타낸다. 빔(beam)의 끝은 같은 평면에 함께 연결되어 있고, 다음과 같은 성질을 가지고 있다.

- 빔들은 같은 평면에 있다.
- 빔들의 끝은 d 거리만큼 떨어져 있다.

- 빔들은 각 축에 대해서 a 각도만큼 대칭적으로 기울어져 있다.

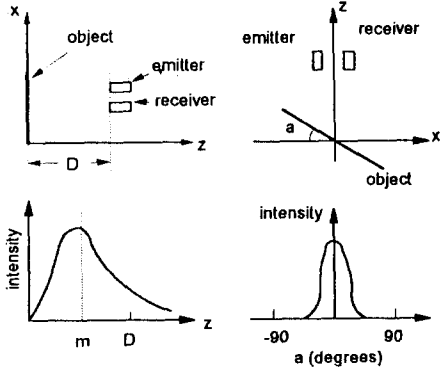


그림 2.2 적외선센서의 응답곡선

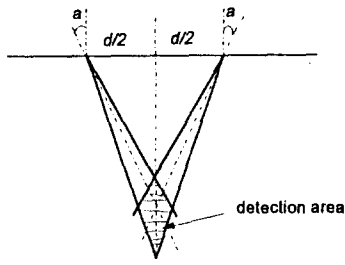


그림 2.3 기본적인 측정방법

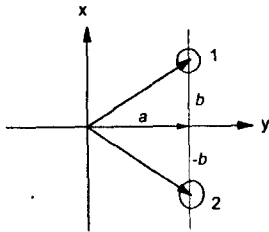


그림 2.4 센서의 응답에 따른 벡터 선택

d와 a는 센서의 특성을 결정한다. 예를 들어 d가 크고 a가 작으면, 센서는 정밀도는 떨어지고 넓은 범위를 측정한다.

근접센서는 거리를 측정하는데 사용되기도 하지만 많은 경우 물체의 유무를 판단하는데 사용된다. 이 경우 센서의 출력은 문턱값을 이용해서 이진값으로 얻어진다.

센서쌍들이 홀을 감지하는 방법은 크게 4가지로 나눌 수 있다. a) 두 개의 센서가 모두 홀을 감지하는 경우, b) 센서 1만이 감지하는 경우, c) 센서 2만이 감지하는 경우, d) 두 개의 센서가 모두 홀을 감지하지 못하는 경우이다. 각각의 경우에 대해서 선택하는 벡터는 다음과 같다. (그림 2.4)

$$a) \text{의 경우 } \vec{u}_r = (0, a) \quad (2.9)$$

$$b) \text{의 경우 } \vec{u}_r = (b, a) \quad (2.10)$$

$$c) \text{의 경우 } \vec{u}_r = (-b, a) \quad (2.11)$$

$$d) \text{의 경우 } \vec{u}_r = (0, 0) \quad (2.12)$$

이 벡터들의 단위벡터를 $\vec{u}_i = (u_{ix}, u_{iy})$ 라 한다.

2.2.3 힘/토크센서

힘/토크 센서는 네 개의 막대위에 4쌍의 스트레인 게이지(strain gauge)를 이용한다. 4쌍의 스트레인 게이지는 힘 좌표계에 대해서 수직방향이므로 세 개의 힘 성분과 세 개의 모멘트 성분은 출력전압을 적절히 더하거나 빼서 구할 수 있다. 이는 센서가 읽은 값에 센서 캘리브레이션 행렬(sensor calibration matrix)을 곱함으로써 이루어진다.[13]

그림 2.5는 펌과 홀의 접촉이 평면으로 이루어진 경우이다. 이때 힘/토크 센서 좌표계의 중심이 받는 힘과 모멘트는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_x &= 0 \\ F_y &= 0 \\ F_z &= \int_A P dA \\ T_x &= \int_A P \cdot y dA \\ T_y &= \int_A P \cdot x dA \\ T_z &= 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

여기서 P는 접촉면에 가해지는 압력이고 모든 점에서 일정하다고 가정한다. dA는 접촉면의 미소면적이다.

접촉면의 센트로이드(centroid)는 다음과 같이 계산된다.[14]

$$x_c = \frac{\int_A x dA}{\int_A dA} \quad (2.14)$$

$$y_c = \frac{\int_A y dA}{\int_A dA} \quad (2.15)$$

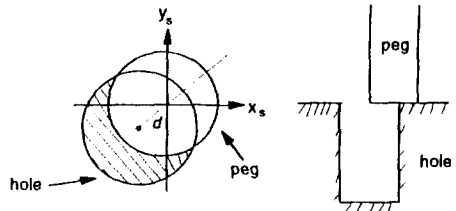


그림 2.5 펌과 홀이 평면으로 만나는 경우

벽과 홀의 접촉이 평면으로 이루어져 있는 경우의 센서 출력은 접촉면의 센트로이드에 힘 $F = P \int_A dA$ 이 가해질 때의 출력과 동일하다.

위의 모멘트 정보를 이용해서 로봇의 이동방향 단위벡터 $\vec{u}_m = (u_{mx}, u_{my})$ 를 구한다.

$$u_{mx} = \frac{T_y}{\sqrt{T_x^2 + T_y^2}} \quad (2.16)$$

$$u_{my} = \frac{-T_x}{\sqrt{T_x^2 + T_y^2}}$$

2. 3 퍼지추론에 의한 센서정보의 용합

기본적인 퍼지제어기는 퍼지화단계, 추론단계, 비퍼지화단계로 이루어져 있고 추론에 필요한 규칙베이스, 데이터베이스를 가진다. 각 단계는 다음과 같은 의미를 지닌다.

- 1) 퍼지화 단계 : 센서로부터의 입력값은 보통집합(crisp set) 이므로 이를 퍼지집합으로 바꾼다.
- 2) 추론 단계 : 퍼지 규칙 집합에 의하여 퍼지추론을 한다.
- 3) 비퍼지화 단계 : 퍼지집합으로 주어진 출력을 보통집합의 출력으로 바꾼다.
- 4) 규칙 베이스 : 퍼지 추론에 필요한 규칙들을 저장한다.
- 5) 데이터 베이스 : 각 퍼지집합의 소속함수들을 저장한다.

2. 3. 1 퍼지화(Fuzzification)

퍼지화는 측정된 입력 공간에서 퍼지집합으로의 사상(mapping)으로 정의된다. 비전센서의 정보(\hat{s}), 근접센서의 정보(\hat{i}), 힘/토크센서의 정보(\hat{m})는 퍼지변수이고 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \hat{s} &= g_s \times s \\ \hat{i} &= g_i \times i \\ \hat{m} &= g_m \times m \end{aligned} \quad (2.17)$$

여기서 s, i, m 은 측정된 값이고, g_s, g_i, g_m 들은 실제값들을 퍼지집합으로 변환하는 스케일 요소(scale factor)들이다.

각 퍼지변수에 대한 퍼지집합은 표 1에 나타나 있고, 소속함수의 모양은 그림 2.6에 나타나 있다.

S (비전정보)	I (적외선정보)	M (모멘트정보)
S1 : Very Small	ON	M1 : Very Small
S2 : Small	OFF	M2 : Small
S3 : Medium Small		M3 : Medium Small
S4 : Medium		M4 : Medium
S5 : Medium Large		M5 : Medium Large
S6 : Large		M6 : Large
S7 : Very Large		M7 : Very Large

표 1. 퍼지집합

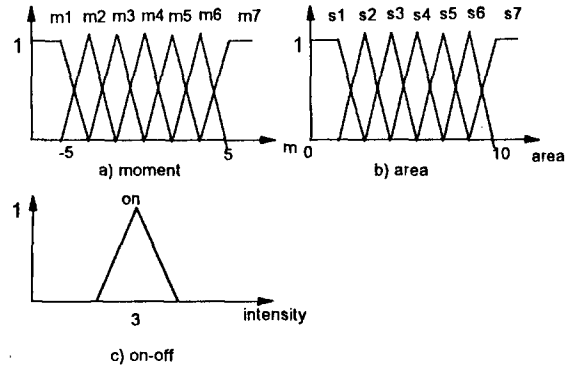


그림 2. 6 소속함수

2. 3. 2 규칙 베이스의 구성과 추론방법

일반적으로 규칙들은 다음과 같이 정해져 있다.

R_k : IF $\sim s$ is S_k and $\sim m$ is M_k and $\sim i_1$ is ON and $\sim i_2$ is ON
THEN $\sim y$ is Y_k

R_{k+1} : IF $\sim s$ is S_{k+1} and $\sim m$ is M_{k+1} and $\sim i_1$ is ON and $\sim i_2$ is OFF
THEN $\sim y$ is Y_{k+1}

R_{k+2} : IF $\sim s$ is S_{k+2} and $\sim m$ is M_{k+2} and $\sim i_1$ is OFF and $\sim i_2$ is ON
THEN $\sim y$ is Y_{k+2}

R_{k+3} : IF $\sim s$ is S_{k+3} and $\sim m$ is M_{k+3} and $\sim i_1$ is OFF and $\sim i_2$ is OFF
THEN $\sim y$ is Y_{k+3}

추론은 먼저 식 2.17에 의해서 표준화된 값(normalized value)으로 계산되고, 그림 2.6의 소속함수를 계산한다. 이로부터 Max-Min 방법에 의해 출력 퍼지집합 Y 를 결정한다.

2. 3. 3 비퍼지화

출력 퍼지집합으로부터 실수값의 출력을 얻는다. 이는 무게중심법에 의해서 이루어진다.

$$y = \frac{\sum_{w=1}^n \mu_Y(y^w) y^w}{\sum_{w=1}^n \mu_Y(y^w)} \quad (2.18)$$

이 출력은 다음과 같이 사용된다.

$$\vec{u}' = ((1-y)(\vec{u}_s + \vec{u}_i) + y\vec{u}_m) \quad (2.19)$$

$$\vec{u} = (1-y^2) g_u \frac{\vec{u}'}{|\vec{u}'|}$$

여기서, g_u 는 스케일링 요소이다. y 는 각 센서값들에 대해서 가중치로 작용한다. y 값은 초기에는 0에 가까운 값을 가

지고, 삽입이 이루어지면서 1에 가까워진다. 그러므로, 초기에는 비전센서와 근접센서의 정보에 가중치를 더 주고 삽입이 진행됨에 따라 힘/토오크센서의 가중치를 크게 한다.

u 는 펌이 진행할 방향의 단위벡터이고, 초기에는 많이 움직이고 삽입이 진행되면서 작게 움직인다.

2. 4 삽입작업

삽입작업은 다음과 같은 순서로 이루어진다.

- 1) 초기위치에 로봇트를 위치시킨다. 여기서, 초기위치한 홀의 영상이 카메라의 범위내에 있고 적외선센서가 홀 위에 위치하는 것을 의미한다.
- 2) 센서값들을 읽는다.
- 3) 센서값들에 스케일 요소들을 곱해서 퍼지화한다.
- 4) 소속함수값들과 규칙베이스로부터 퍼지추론을 한다.
- 5) 퍼지집합인 출력을 구한다.
- 6) 비퍼지화 과정을 거쳐서 실수값의 출력을 구한다.
- 7) 로봇트에 이동할 위치명령을 내린다.
- 8) z축 방향의 힘이 정해진 값(F_z)보다 크면 2)-7)을 반복하고, 정해진 값보다 작으면 삽입이 이루어졌음을 의미하므로 작업을 끝낸다.

3. 시뮬레이션 및 결과

시뮬레이션은 홀의 반지름이 10mm 이고, 펌의 반지름이 9.9mm인 것으로 했다. 적외선센서의 간격은 홀의 반지름인 10mm이고, 펌의 x축으로부터의 거리는 12mm로 했다. 로봇트가 펌을 누르는 힘은 15N 이고, 삽입의 성공은 -z축방향의 힘이 0일때인 것으로 했다. 초기위치를 달리하며 시뮬레이션한 결과를 그림 3.1과 3.2에 나타내었다. 그림 3.1은 초기위치가 홀의 좌표축에 대해서 (-6, 2)이고, 그림 3.2는 (-2, -6)인 경우이다. 면적이 줄어들면서 모멘트가 커짐을 알 수 있다. 각 경우에 대해서 삽입시작의 수는 10미만이다. 삽입의 초기에는 크게 움직이고 삽입이 진행됨에 따라서 움직이는 변위는 작아진다.

4. 결 론

비전센서와 근접센서는 삽입작업의 초기에 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 작업의 초기에는 힘/토오크센서의 출력의 크기가 작아서 모멘트를 구하기가 어렵다. 비전센서만으로는 조명의 영향에 의해서 실제의 홀의 완벽한 영상을 얻기가 힘들다. 따라서, 근접센서를 사용해서 비전센서의 단점을 보완했다. 여러 방향에서 삽입을 시도했는데 홀이 비전센서와 근접센서의 측정영역에 있는한 삽입이 성공함을 알 수 있었다. 앞으로 특정삽입조건이 아닌, 작업조건이 변하는 경우에도

적용할 수 있도록 규칙을 일반화하는 것이 필요하다. 예를 들면, 펌이나 홀의 크기가 변한다면지 또는 원형의 펌이 아닌 여러가지 다각형에 대해서 작업을 수행할 수 있도록 한다면 일반적인 삽입작업에의 응용이 가능할 것이다.

참고 문헌

- [1] Renc. Luo and Michael G. Kay, "Multisensor Integration and Fusion in Intelligent Systems", SMC, Vol.19, No.5, 1988.
- [2] A. M. Flynn, "Combining Sonar and Infrared Sensors for Mobile Robot Navigation", The Int. Journal of Robotics Research, Vol.7, No.6, pp.5-14, December 1988.
- [3] John M. Richardson and Kenneth A. Marsh "Fusion of Multisensor Data", The Int. Journal of Robotics Research, Vol.7, No.6, pp.78-96, December 1988.
- [4] M.A.Abidi and R.C.Gonzalez, "The use of mult-sensor data for robotic applications", IEEE Trans. Robotics and Automation, VOL. 6. NO 2, April 1990.
- [5] 이 승호, "삽입 작업에서 퍼지 추론에 의한 비전 및 힘/토오크센서의 퓨전", 서울대학교 공학 석사 학위 논문, 1993.
- [6] T.Goto, K.Takeyasu and T.Inoyama, "Control algorithm for precision insert operation robots", IEEE Trans. Systems Man and Cybernet. 10 (1980) pp 19-25
- [7] Daniel E.Whitney, "Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, pp.91-97, June 1977.
- [8] Tomas Lazano-Perez, Matthew T. Mason and Russel H. Taylor, "Automatic Synthesis of Fine-Motion Strategies for Robots", The Int. Journal of Robotics Research, Vol.3, No.1, pp.3-24, Spring 1984.
- [9] S.N. Gottochlich and A.C.Kak, "A dynamic approach to high precision parts mating", IEEE Preceed. Robotics and Automation, (1988), pp 1246-1253
- [10] Wolfgang Seyfferth and Friedrich Pfiedrich Pfeiffer, Proc. of the 1992 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1303-1310, July 1992.
- [11] Y. K. Park, H. S. Cho and J. O. Park, "A Fast Searching Method for Precision Parts Mating Based upon Fuzzy Logic Approach", Proc. of the 1992 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1319-1323, July 1992.
- [12] H.B. Gurocak and A.de Sam Lazaro, "A fuzzy logic approach for handling imprecise measurements in robotic assembly", IEEE Intl. Conf. Fuzzy Sets and Systems, 1992
- [13] K. S. Fu, R. C. Gonzalez and C. S. G. Lee, "Introduction to Robotics : Control, Sensing, Vision, and

Intelligence", New York : McGraw-Hill 1987.

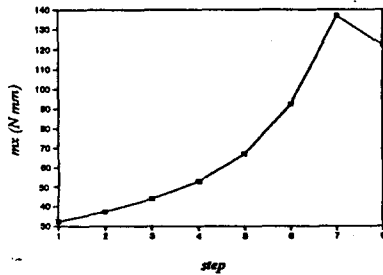
[14] 고 낙용, "조립용 로봇의 힘·토크 센서 및 컴플라이언스 알고리즘의 개발", 서울대학교 공학 석사 학위 논문. 1987.

[15] Crandal et al., "An Introduction to the Mechanics of Solids", 2nd ed., 1987, pp.154-158.

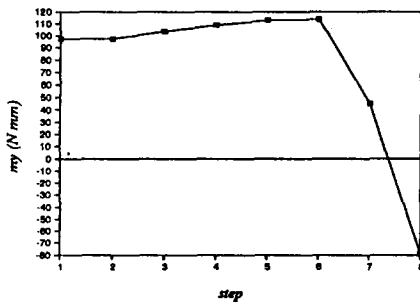
[16] J. Y. Catros, A. Dore, B. Espian, M. parent, J. Y. Yclon, "Automatic Grasping Using Infrared Sensors", Proc. 8th Int. Symp. Industrial Robots, May 1978.

[17] D. J. Balek and R. B. Kelley, "Using Gripper Mounted Infrared Proximity Sensors for Robot Feedback Control", Proc. 1985 IEEE Conf. on Robotics and Automation, Mar 1985.

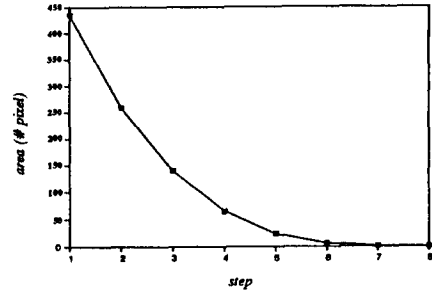
[18] Edward Cheung and Vladimir J. Lumelsky, "Proximity Sensing in Robot Manipulator Motion Planning : System and Implementation Issues", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.5, No.6, December 1989.



a) x성분의 모멘트

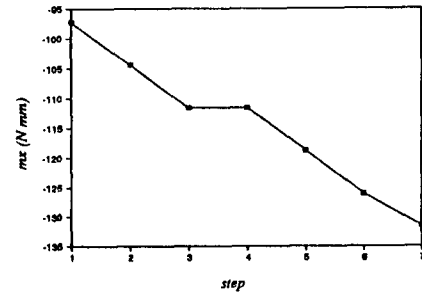


b) y성분의 모멘트

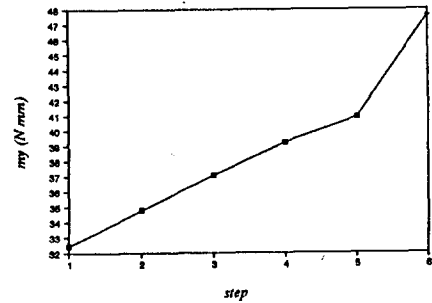


c) 면적정보

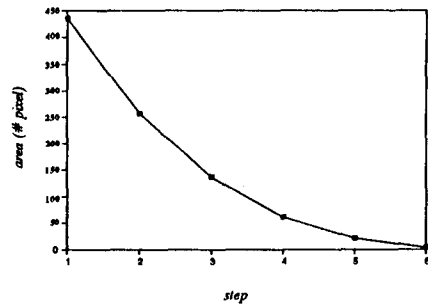
그림 3.1 초기위치 (-6, 2)일 때의 결과



a) x성분의 모멘트



b) y성분의 모멘트



c) 면적정보

그림 3.2 초기위치 (-2, -6)일 때의 결과