

삽입 작업에서 퍼지 추론에 의한 비전 및 힘/토크 센서의 퓨전

* 이 승호*, 이 범희*, 고 명삼*, 김 대원**

*서울대학교 제어 계측 공학과 자동화 시스템 공동 연구소

**명지대학교 제어계측공학과

Vision and Force/Torque Sensor Fusion In Peg-in-Hole Using Fuzzy Logic

* Seung-Ho Lee*, Bum-Hee Lee*, Myoung-Sam Ko*, Dae-Won Kim**

* Dept. of Control & Instrumentation Eng. Seoul National University,
Automation and Systems Research Institute

** Dept. of Control & Instrumentation Eng. Myong Ji University

ABSTRACT

We present a multi-sensor fusion method in positioning control of a robot by using fuzzy logic. In general, the vision sensor is used in the gross motion control and the force/torque sensor is used in the fine motion control. We construct a fuzzy logic controller to combine the vision sensor data and the force/torque sensor data. Also, we apply the fuzzy logic controller to the peg-in-hole process. Simulation results uphold the theoretical results.

1. 서론

삽입 작업(peg-in-hole process)은 로봇트를 이용한 자동 공정의 주요한 기본 작업의 하나이다. 삽입 공정시에 사용되는 부품에는 어느 정도의 오차가 포함되므로 삽입 부품의 공차가 줄어들수록 로봇트의 정밀한 위치제어가 필요하게 된다.

로봇트의 반복 정밀도(repeated precision)는 기구적 구성과 액츄에이터의 성능을 개선하면 어느정도 향상시킬 수 있다. 그러나 전체 삽입 공정에서의 위치 정밀도(positioning precision)의 향상에는 어느 정도의 한계가 있다. 예를 들어, 로봇트와 작업대가 모두 움직이고 있는 경우 둘 사이의 상대적인 위치 정밀도를 향상시키기는 대단히 어렵다. 따라서 부품사이의 오차를 극복할 수 있는 유연하고 지능을 갖춘 로봇트의 제어 방법이 필요하게 된다. 이에 대한 부분적인 해결 방안으로는 SCARA(Selective Compliance Assembly Robot Arm)형의 로봇트를 사용하거나, RCC(Remote Center Compliance)기구를 사용하는 방법, 그림 1과 같이 부품에 챔퍼를 두는 방법 등을 생각할 수 있다[1]. 그러나 부품에 챔퍼가 없는 경우 혹은 위치 오차가 챔퍼보다 큰 경우에는 이와 같은 방법으로도 해결이 불가능하다.

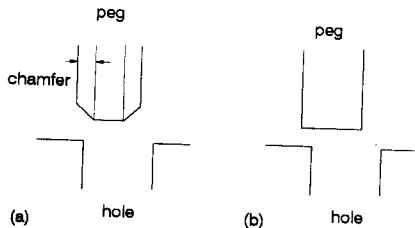


그림 1. 챔퍼가 있는 경우(a)와 없는 경우(b)

이러한 경우에는 로봇트에 센서 시스템을 부가하여 해결할 수 있다. 많이 사용되는 센서 시스템으로는 비전 시스템과 힘/토크 센서 시스템을 들 수 있는데 비전 시스템이 비용이 많이 들고 주로 거친 운동(gross motion) 제어에 적합하고 정밀한 위치제어에는 적합하지 않은 반면, 힘/토크 센서 시스템은 스트레인 게이지를 이용하여 비교적싼 값으로 구현이 가능하고 미세 운동(fine motion) 제어에도 적합하므로 이에 대한 연구가 활발히 이루어졌다.

Goto 등[2]은 힘/토크 정보를 이용한 삽입 작업의 알고리즘을 최초로 제시하였고, 이를 유연한 경우까지 확장했다[3]. Hara 등[4]은 퍼지 추론을 이용하여 보다 정밀도가 높은 결과를 나타냈다. Gurocak 등[5]은 삽입 작업에 전용 하드웨어와 퍼지 추론을 이용하였고, Gottschlich 등[6]은 동역학을 고려한 알고리즘을 제시하였다.

그러나 인간이 삽입 작업을 수행하는 과정을 살펴 보면 힘/토크 정보만을 이용하지 않고 어느 정도의 시각 정보도 활용하므로 비전 센서를 부가적으로 부착하여 센서를 복합적으로 사용한다면 힘/토크 센서만을 사용하는 경우보다 능률의 향상을 기대할 수 있을 것이다.

이 논문에서는 힘/토크 정보 이외에 비전 정보를 부가적으로 사용하여 보다 효율적인 삽입 작업의 알고리즘을 제시하고자 한다. 이때, 힘/토크 정보와 비전 정보의 결합에 퍼지 추론을 이용하여 인간의 경험적 지식을 제어 규칙에 반영할 수 있도록 하고자 한다. 또한 이를 통해 현재 활발히 연구가 이루어지고 있는 센서 퓨전 분야에서 퍼지 추론을 적용해보고 그 효용성을 검토해 보고자 한다.

2장에서는 시스템의 개요와 문제 설정에 대해 설명하고, 3장에서는 단일한 비전 혹은 힘/토크 센서를 사용할 때의 삽입 과정에 대하여 설명한다. 4장에서는 퍼지 논리에 의해 두 센서를 결합시키는 방법에 대해 설명하고 제안된 퍼지 제어기의 구성에 관하여 설명한다. 5장에서는 시뮬레이션을 통해 기존의 방식과 제안된 방식의 효용성을 비교하고 타당성을 확인한다. 6장에서는 결론을 맺는다.

2. 문제 설정 및 시스템 구성

일반적으로 삽입 작업에 이용되는 센서로는 비전 센서와 힘/토크 센서를 들 수 있는데 비전 센서는 거친 운동 제어에 주로 이용되고, 힘/토크 센서는 미세 운동 제어에 이용된다. 종래의 연구는 비전 센서에 의해 개략적인 위치로 이동한 후 힘/토크 센서에 의해 최종적인 삽입을 실행하는 방향으로 진행되었다. 그러나 이는 진정한 의미의 센서 퓨전과는 거리가 있으므로 이 논문에서는 각 센서 정보의 특성을 고려한 퓨전 방법을 제시한다. 이에 대한 구체적

인 방법으로는 인간의 경험적 지식을 제어 규칙으로 이용할 수 있는 퍼지 추론을 이용한다.

고려된 작업 시스템은 그림 2와 같다. 비전 센서는 로봇트의 마지막 링크에 부착하여 펙(peg)에 가려진 홀(hole)의 상을 CCD 카메라로부터 입력으로 받아서 제어에 이용한다. 힘/토크 센서는 손목에 부착하여 힘과 모멘트(moment) 정보를 얻는다.

로봇트에 의한 삽입 작업은 아래의 그림 2와 같이 진행된다. 삽입하려는 물체는 로봇트의 손 끝에 의해 수직하게 내려지며 힘/토크 센서는 로봇트의 손목(wrist)에 장착된 것으로 한다. 로봇트의 손 끝은 X, Y축 방향으로의 위치제어가 이루어지고 Z축 방향으로의 힘제어가 이루어진다. 카메라는 로봇트의 손목에 고정되어 있는 것으로 하고, 카메라의 영상 좌표계와 로봇트 좌표계 사이의 관계는 이미 알고 있다고 가정한다.

삽입하고자 하는 물체는 반지름 R_p 의 등근 원통 모양을 한 펙이며 삽입을 목표로 하는 홀의 반지름은 R_h 이다.

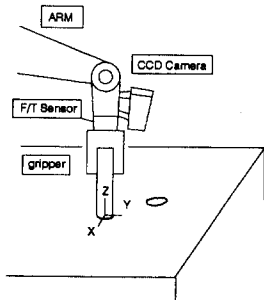


그림 2. 로봇트에 의한 삽입 작업

3. 단일 센서를 이용한 삽입 작업

비전 센서나 힘/토크 센서가 단일하게 사용되는 경우에는 다음과 같은 방법으로 삽입 작업이 수행된다.

3.1 비전 센서에 의한 삽입 작업

일반적으로 비전 센서를 사용하는 경우 영상 처리에 상당히 많은 계산량이 소요된다. 그 원인은 여러가지를 들 수 있으나 가장 주요한 원인으로서는 2차원 영상으로부터 3차원 데이터를 추출과정을 들 수 있으므로 계산을 간단히 하기 위해 2차원의 영상을 그대로 이용하기로 한다.

삽입 작업 과정에서 비전 센서로 얻어지는 영상은 그림 3과 같이 펙에 가려진 홀의 영상 정보이다. 비전 센서를 통해 얻어진 영상 입력은 먼저 문턱값을 이용하여 이진 영상(binary image)으로 바뀐다. 이때 상의 값은 화소의 값이 '1'의 값을 가지게 되고 배경의 값은 '0'의 값을 가지게 된다.

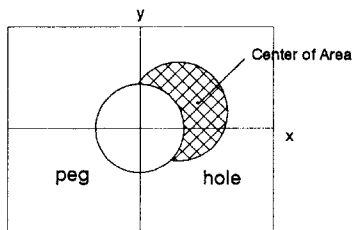


그림 3. 비전 센서로 얻어지는 영상 신호

2차원 물체의 위치 정보를 표현하는데 있어 가장 많이 사용되는 방법은 물체의 무게 중심(center of the area)을 이용하는 것이다[11]. 이 경우 잡음에 보다 덜 민감하게 반응하므로 잡음의 영향을 줄일 수 있는 장점이 있다.

무게 중심의 좌표는 다음의 방법으로 구한다. 먼저, 전체 면적 A 를 구하고 다음 수식을 통해 X, Y 방향의 일차 모멘트(first moment) M_x, M_y 를 구한다.

$$A = \iint f(x,y) dx dy \quad (1)$$

$$M_x = \iint xf(x,y) dx dy \quad (2)$$

$$M_y = \iint yf(x,y) dx dy \quad (3)$$

이때, 무게 중심의 좌표 $C (X_c, Y_c)$ 는 다음과 같다.

$$X_c = M_x / A \quad (4)$$

$$Y_c = M_y / A \quad (5)$$

$N * N$ 크기의 영상일 경우에는 X_c, Y_c 가 각각 다음과 같이 표현된다.

$$X_c = \sum \sum xf(x,y) / \sum \sum f(x,y) \quad (6)$$

$$Y_c = \sum \sum yf(x,y) / \sum \sum f(x,y) \quad (7)$$

$$A = \sum \sum f(x,y) \quad (8)$$

물체의 위치가 구해지면 삽입 작업에서 펙이 이동해야 할 방향을 결정할 수 있다. 단위 벡터 $v (v_x, v_y)$ 를 이동방향으로 정의한다.

$$v_x = \frac{X_c}{\sqrt{X_c^2 + Y_c^2}} \quad (9)$$

$$v_y = \frac{Y_c}{\sqrt{X_c^2 + Y_c^2}} \quad (10)$$

이동 속도와 방향을 결정하기 위해서는 홀 영상의 면적 정보 A 가 필요한데, 이 값이 크면 이동 속도를 크게 하고, 이 값이 작으면 이동 속도도 작게 한다.

3.2 힘/토크 센서에 의한 삽입 작업

그림 4는 삽입 작업시에 펙에 작용하는 힘과 모멘트를 나타낸 것이다. F_z 는 펙을 수직으로 누르는 힘을 나타내며, M_x, M_y 는 각각 x축과 y축 방향의 모멘트를 나타낸다. F_z 를 측정하면 펙이 삽입되었는지의 여부를 알 수 있고, 모멘트를 측정하여 펙이 진행해야 할 방향을 찾아낸다.

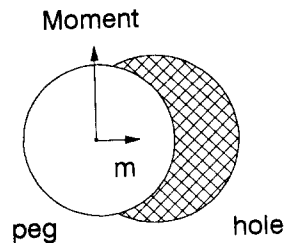


그림 4. 삽입 작업시 펙에 작용하는 힘과 모멘트

벽을 수직으로 누르는 힘이 \vec{F} 일 경우 모멘트 \vec{M} 은 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (11)$$

누르는 힘 \vec{F} 가 일정할 때 모멘트는 거리 r 에 비례하게 되므로 벽이 홀에 근접해 감에 따라 모멘트는 증가하게 된다 [3,6]. 모멘트 $M (M_x, M_y)$ 에 의한 로봇트의 이동 방향 단위 벡터 $m (m_x, m_y)$ 은 다음과 같다.

$$m_x = \frac{M_y}{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}} \quad (12)$$

$$m_y = \frac{-M_x}{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}} \quad (13)$$

4. 퍼지 추론에 의한 삽입 작업

4.1. 제어 규칙의 설계

본 논문에서는 인간의 경험적 지식을 제어 규칙으로 반영할 수 있는 퍼지 추론을 이용하여 거친 운동 제어에서 미세 운동 제어 쪽으로 전이시키는 방식을 생각한다. 삽입 작업 시 적용할 수 있는 인간의 경험적 사실로는 다음과 같은 것 들 수 있다.

- (1) 초기에는 시각 정보의 효용성과 정확도가 힘/토크 센서보다 우수하므로 시각 정보에 주로 의존한다.
- (2) 작업이 진행됨에 따라 시각 정보의 효용성과 정확도가 점차 감소하고 힘/토크 센서의 영향이 증가한다.
- (3) 작업의 후반기에는 주로 시각 정보보다는 힘/토크 정보에 의존하게 된다.
- (4) 초기에는 벽의 이동량을 크게 하고 작업이 진행됨에 따라 이동량을 감소시킨다.

위와 같은 경험적 제어 규칙을 이용하여 규칙 베이스를 구성한다. 시스템의 퍼지 제어기의 구성은 다음 그림 5와 같다.

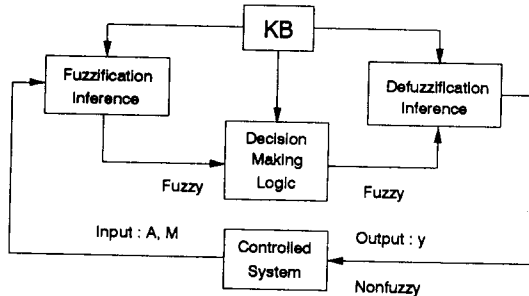


그림 5. 퍼지 제어기의 구성

퍼지 제어기의 입력은 다음과 같이 표현된다. 비전 정보를 이용하여 계산된 벽 영역의 면적을 A 라 정의하며, 힘/토크 정보를 이용하여 얻어낸 Z 축 방향의 힘을 F_z , 모멘트의 크기를 M 으로 정의한다. 또한, 퍼지 제어기의 출력 변수

는 y 로 정의한다. 여기서, Z 축 방향의 힘(F_z)은 직접 제어 규칙에 이용되지는 않고 벽의 삽입 여부를 확인하는데 사용된다.

4.2 퍼지 제어기의 구현

이 시스템에서는 제어기로 퍼지제어기를 사용한다. 퍼지 추론은 입력값으로 언어적 변수를 사용하는데, 이들은 여러 개의 규칙 베이스(rule base)에 의해 하나의 출력을 구하게 된다. 규칙 베이스는 다수의 규칙들로 구성되는데 각각의 규칙은 다음의 형식을 띠게 된다.

IF < condition > THEN < situation >

여기서,

< condition > : 언어적 값으로 표현된 센서 정보의 조합

< situation > : 언어적 값으로 표현된 출력 값

비퍼지값인 출력값은 다음의 과정을 거쳐 구해지게 된다.

- (1) 각 센서의 측정값들에 적당한 상수를 곱하여 퍼지 시스템의 입력으로 한다.
- (2) 적당한 멤버십 함수에 의해 각각의 입력값들을 퍼지값으로 바꾼다.
- (3) 해당하는 규칙 베이스와 추론 방법을 적용하여 출력 퍼지 값을 구한다.
- (4) 출력 퍼지값을 비퍼지화하여 비퍼지값인 출력값을 구한다.

규칙 베이스의 입력은 퍼지화된 센서 측정값으로서 각각의 규칙은 다음의 형태를 가진다.

IF A is V0 AND M is V3
THEN dF is V5, y is V4.
ALSO
IF A is V2 AND ...

여기서 V0, V3, V5 등은 모두 각각의 멤버십 함수를 가지는 퍼지 집합들이다. 본 논문에서는 각각의 입력력 변수에 대해 V0 - V8 의 9 단계의 언어적 값(linguistic value)을 정의한다. 이와 같은 언어적 값을 사용하여 삽입에 필요한 제어 규칙을 작성하는 것은 인간의 경험에 의존하게 되는데 이 제어 규칙을 표 1에 나타낸다. 표 1에서 가로축은 힘/토크 정보(M)를 나타내며, 세로축은 비전 정보(A)를 나타낸다.

표 1. 규칙 베이스의 구성

	v0	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	Moment
v0						v1	v1	v0	v0	
v1					v2	v2	v1	v1	v0	
v2				v3	v3	v2	v2	v1	v1	
v3			v4	v4	v3	v3	v2	v2	v1	
v4		v5	v5	v4	v4	v3	v3	v2		
v5	v6	v6	v5	v5	v4	v4	v3			
v6	v7	v6	v6	v5	v5	v4				
v7	v7	v7	v6	v6	v5					
v8	v8	v7	v7	v6						

vision area

표 1의 언어적 값(v0-v8)을 퍼지화시키기 위해서는 각각의 언어적 값에 대해 멤버십 함수가 먼저 정의되어 있어야 한다. 본 논문에서는 그림 6과 같은 멤버십 함수를 사용한다. 입출력 변수는 n0 - n40 까지의 41개의 값으로 양자화하였는데 이것을 표 2에 나타낸다. 각 양자화 단계에 해당하는 이산 멤버십 함수의 예를 표 3에 보인다.

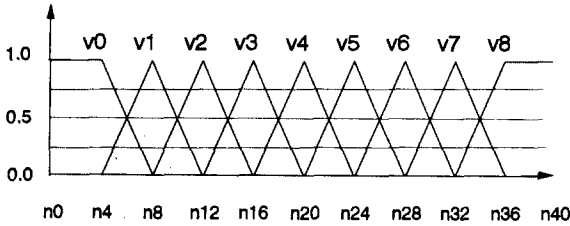


그림 6. 입력변수와 출력변수의 멤버십 함수

표 2. 입출력 변수의 양자화

	area	moment	y
n0	0	0.00	0.10
n4	165	0.67	0.19
n8	180	1.04	0.28
n12	195	1.41	0.37
n16	210	1.78	0.46
n20	225	2.15	0.55
n24	240	2.52	0.64
n28	255	2.89	0.73
n32	270	3.26	0.82
n36	285	3.63	0.91
n40	1000	10.00	1.00

표 3. 양자화의 예

	n7	n8	n9	n10	n11	n12	n13	n14	n15
v1	1.00	0.75	0.50	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
v2	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	0.75	0.50	0.25	0.00
v3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00

추론 방법 (inference method)은 여러 가지가 있으나 여기서는 Mamdani가 제안한 MAX-MIN 추론 방법을 사용하기로 한다. 이는 사용이 간단하고 계산량도 적어서 가장 많이 사용되는 추론 방법의 하나이다. 이를 통해 얻어진 출력값은 퍼지 집합이므로, 결정적 값을 얻기 위해 이를 비퍼지화시킨다. 이것도 여러 가지 방법이 있으나 여기서는 일반적으로 가장 많이 사용되는 방법인 무게 중심법을 사용한다.

퍼지 제어를 통해 출력되는 값은 표 2를 통해 알 수 있는 바와 같이 0에서 1까지의 값을 전체 집합(universe of discourse)으로 하는 퍼지 집합이고, 이의 질량 중심 y도 $0 \leq y \leq 1$ 인 범위의 값을 갖는다. 출력 y 는 다음의 두가지로 쓰이게 된다.

(1) 로봇의 이동 속력 v 의 결정

이동 속력 $v = y * vF$ (14)
 여기서, vF 는 비례 상수

(2) 로봇의 이동 방향 d 의 결정

$$d = y * v + (1-y) * m$$
 (15)

여기서, v, m 은 각각 비전과 힘/토오 크 정보에 의해 얻어진 방향 벡터

4.3. 삽입 알고리즘

이상에서 제시한 퍼지 제어기에 의해 실제로 삽입을 수행하기 위한 알고리즘을 제시하면 다음과 같다.

- (1) 초기 위치로 펙을 이동시킨다. 이때, 펙과 홀은 카메라 영상을 벗어나지 않아야 한다.
- (2) 힘/토오크 정보와 비전 정보를 받아 들인다.
- (3) 얻어진 입력 정보에 적당한 상수를 곱해서 퍼지 제어기에 의해 로봇 손끝의 이동 방향과 이동량을 결정한다.
- (4) 계산된 출력만큼 로봇 끝을 이동시킨다.
- (5) Fz를 측정하여 펙이 삽입되었는지의 여부를 확인한다.
- (6) 삽입되지 않았으면 (2)-(5) 까지를 반복한다.

5. 시뮬레이션 및 결과 검토

로봇이 물체를 삽입하는 과정에서 발생할 수 있는 오차의 요인으로는 다음과 같은 것들을 들 수 있다.

- 비전 시스템에서 물체를 인식할 때 발생하는 오차
- 로봇 동작의 불확실성으로 인해 발생하는 오차
- 힘/토오크 센서의 측정 오차

본 논문에서 제시한 퍼지 제어기의 성능을 평가하기 위해서 아래와 같이 비전 시스템, 힘/토오크 시스템을 모델링하였고, 이를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다.

(1) 비전 정보의 모델링

사용된 비전 시스템은 128 * 128 인 이진 영상을 입력으로 하며 샘플링 타임은 1/30초이다. 비전 신호의 각 화소 데이터는 0과 1값만을 가지게 되는데 잡음에 의해 한 데이터가 전이될 확률(0에서 1로, 1에서 0으로)은 0.62 %로 했다.

(2) 힘/토오크 정보의 모델링

힘/토오크 정보는 로봇의 손목에 부착된 힘/토오크 센서에 의해 얻어지며 $F = [Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz]^T$ 의 정보를 얻을 수 있다. 제어에 이용되는 정보는 Fz, Mx, My 의 세가지이며 수직 방향으로 F = 10 kg 의 힘을 가했을 경우 Mx, My는 Gaussian 잡음에 의해 다음과 같다고 가정한다.

$$Mx^s = Mx + G (m, \sigma)$$
 (16)

$$My^s = My + G (m, \sigma)$$
 (17)

(3) 로봇 동작에서의 오차 모델링

로봇의 제어 속도를 vx, vy라 할때 제어 오차는 제어 속도 vd에 대해 1/6의 표준 편차를 가지는 Gaussian 분포를 가진다고 가정한다. 즉, 실제 속력은

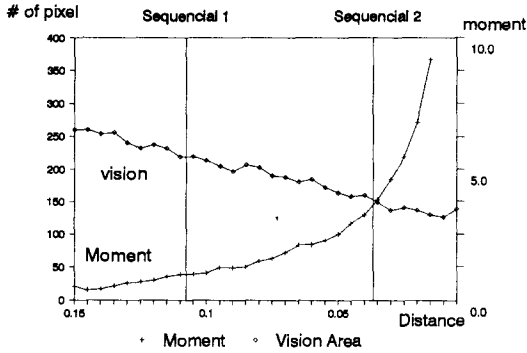


그림 7. 거리에 따른 면적 정보와 모멘트 정보

$$v_{ex} = v_x + G(0, 1/6 * v_x) \quad (18)$$

$$v_{ey} = v_y + G(0, 1/6 * v_y) \quad (19)$$

시뮬레이션에 사용된 조건들은 다음과 같다.

- Rh = 2.00 [cm]
- Rp = 1.99 [cm]
- m = 0.0
- $\sigma = 2.0$
- sampling time = 1/30 [sec]
- $v_d = 20.0$ [mm/sec]

시뮬레이션은 다음과 같은 방법으로 실행하였다. 펙의 중심이 홀의 중심으로부터 (0.3cm, 0.3cm)의 위치에 있는 것으로 하고, 이 위치에서 삽입 과정을 시작하는 것으로 하였으며, 삽입 과정 중 펙이 홀을 지나치면 삽입이 실패한 것으로 하였다.

그림 7은 펙이 홀에 근접함에 따라 면적 정보(A)와 모멘트 정보(M)의 변화를 나타낸 것이다. 가로축은 펙의 중심과 홀의 중심과의 거리를 나타내며, 왼쪽 세로축은 면적 정보(A)를 나타내고, 오른쪽 세로축은 모멘트(M)를 나타낸다. 기존의 삽입 작업 방식인 센서의 순차적 이용 방식(비전으로 적당한 위치까지 이동 후 힘/토오크 정보에 의해 미세 제어를 행하는 방식)에서는 비전 정보의 사용 한계에 따라 성능의 차이를 나타내게 된다. 본 논문에서는 그림 7의 1, 2를 각각 비전 정보의 사용 한계로 하는 두가지 경우와 퍼지 제어기에 의한 경우를 비교해 보았다. 즉 순차 제어 1에서는 그림 7의 'Sequential 1'까지 비전에 의한 위치 제어가 이루어지고 그 이후에는 힘/토오크 센서에 의한 제어가 이루어지는 것으로 하였다. 각각의 경우에 대해 50 회씩 시뮬레이션을 실행하였으며, 효율성의 지표로서 사용된 사항은 #MEAN과 #MAX, %SS의 세가지이다. 여기서 #MEAN은 삽입까지의 평균 시도 횟수를 나타내며, #MAX는 최대 시도 횟수를 나타낸다. 또한 %SS는 삽입의 성공률을 나타낸다.

표 4. $v_d=20\text{mm/sec}$ 일 경우의 효율 비교

	순차 제어 1	순차 제어 2	퍼지 제어기
#MAX	13	9	10
#MEAN	12.00	7.09	9.28
%SS	98%	94%	100%

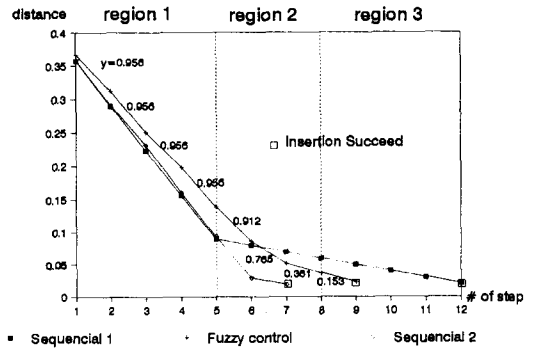


그림 8. 각 방식에 의한 삽입의 전형적인 예

표 4를 보면 %SS는 (퍼지 제어기 < 순차 제어 1 < 순차 제어 2) 의 순서를 보이며 퍼지 제어기의 경우 100%의 성공률을 나타내는 것을 볼 수 있다. #MEAN과 #MAX에서는 효율성에서 (순차 제어 1 < 퍼지 제어기 < 순차 제어 2) 인 것을 볼 수 있다. 각 경우에 대해 전형적인 삽입 곡선을 그림 8에 나타내었다. 퍼지 제어기를 사용하는 경우 다른 방식을 사용하는 경우에 비해 보다 유연한 곡선을 그리는 것을 볼 수 있다.

퍼지 제어기에 의한 삽입 작업의 경우 보다 우수한 특성을 보이는 것은 다음의 이유이다. 즉, 그림 8의 영역 1과 영역 3에서는 각각 비전 정보와 힘/토오크 정보가 주요한 역할을 하므로 비전이나 힘/토오크 센서를 단일하게 사용하는 경우에 비해 효율성이 증가하지 않는다. 효율성이 차이를 나타내는 것은 영역 2에 의한 것으로, 비전 센서에 의한 정보와 힘/토오크 센서에 의한 정보가 모두 정확도가 낮을 때 이 영역에서 두 가지 정보를 모두 활용함으로써 보다 정확도가 높은 정보를 얻게 되므로 오차의 영향을 감소시킬 수 있다.

동일한 조건에서 최대 속도 $v_d = 30$ [mm/sec]로 증가시킨 후 시뮬레이션을 실시한 결과 표 5의 결과를 얻었다. 순차 제어 2의 경우 삽입까지의 시간이 빠르지만 이로 인해 다른 두 경우에 비해 삽입 성공률이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 퍼지 제어기를 이용한 경우 v_d 의 증가에도 불구하고 100%의 삽입 성공률을 보였다.

표 5. $v_d=30\text{mm/sec}$ 일 경우의 효율 비교

	순차 제어 1	순차 제어 2	퍼지 제어기
#MAX	8	8	6
#MEAN	6.05	5.24	5.64
%SS	88%	82%	100%

여러 속도에서 시뮬레이션을 실시한 결과 퍼지 제어기에 의한 삽입 작업은 기존의 방식에 비해 유연한 곡선으로 삽입이 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 퍼지 제어기에 의한 방식을 이용했을 경우 보다 편차가 적은 결과를 얻을 수 있었으며 이 때문에 삽입 성공률에서 타 방식보다 우수한 특성을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

6. 결론

삽입 작업의 경우 오차의 영향을 비교적 많이 받는 힘/토오크 센서에 비교적 오차의 영향을 적게 받는 비전 센서를 부가적으로 사용하게 되면 로봇의 작업 능력을 크게 향상시킬 수 있을 것이다.

이 논문에서 제시한 삽입 알고리즘은 계산량이 적은 퍼지 추론을 사용하므로 컴퓨터에서의 계산이 비교적 간단하며, 비전 정보를 이용하나 2차원 정보를 그대로 이용하므로 계산량을 줄일 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서 제안한 방법은 펙이나 홀의 지름, 비전 정보를 얻는 데 사용되는 조명 등의 외부 환경에 따라 멤버십 함수를 바꾸어야 하므로 사용에 한계가 있다. 이러한 문제는 자기 구성 퍼지 제어기 (self-organizing fuzzy logic controller)를 이용하면 해결할 수 있으므로 여기에 대한 연구가 앞으로의 과제라 하겠다.

7. 참고 문헌

[1] D.E. Whitney, "Assembly of compliantly supported rigid parts", Trans. ASME Dynamic Systems Measurement Control, 104, pp.65-77, 1992.

[2] K. Takeyasu, T. Goto and T. Inoyama, "Precision insertion control robot and its application", Trans. ASME, VOL 98, no.4. pp.1313-1318, Nov.1976.

[3] T. Goto, K. Takeyasu and T. Inoyama, "Control algorithm for precision insert operation robots", IEEE Trans. Systems Man and Cybernet. 10, pp.19-25, 1980.

[4] Kei Hara and Ryuichi Yokogawa, "Application of fuzzy reasoning to precision inserting operation", IEEE Intl. Conf. Fuzzy Sets and Systems 39, pp.205-214, 1991.

[5] 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.

[6] S.N. Gottochlich and A.C.Kak, "A dynamic approach to high precision parts mating", IEEE Proceed. Robotics and Automation, pp.1246-1253, 1988.

[7] 송 황준, "퍼지 이론에 의한 일반적인 입출력 함수의 추정", 서울대학교 공학 석사 학위 논문, 1992.

[8] H.J.Zimmermann, "Fuzzy Set Theory and its Application", Kluwer-Nijhoff.

[9] Jiun Xiao, A.Volz, "Design and motion constraints of part mating planning in the presence of uncertainties", IEEE proceed. Robotics and Automation, pp.1260-1268, 1988.

[10] 박 시영, "힘/토오크 정보를 이용한 로봇의 잡음 자세 추정", 1992, 서울대학교 공학 석사 학위 논문.

[11] 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.

[12] Erik Vaaler Warren P Seering, "A machine learning algorithm for automated assembly", Proceedings of the 1991 IEEE international Conference on Robotics and Automation, Sacramento, California, pp. 2231-2237, April 1991.

[13] 구 관모, "로봇 3차원 충돌 회피 운동을 위한 퍼지 제어 응용", 서울대학교 공학 석사 학위 논문, 1990.