



으로써 조립작업을 성공적으로 달성하기 위한 알고리즘이 필요하다.

조립알고리즘과 관련하여 서론에서도 전술하였듯이, 많은 방법이 있으나 본 논문에서는 힘/모멘트 정보를 이용하여 오차를 극복하는 조립알고리즘을 제시한다.

조립알고리즘을 제시하기전에 조립공정을 살펴봄으로써, 실제 조립작업에서 발생할 수 있는 문제점에 대하여 살펴본다.

력이 홀과 접촉할 때, 위치 및 각도 오차에 따라 가능한 접촉상태는 그림.1 에서 보여주듯이 한 점 접촉, 두 점 접촉, 면 접촉등이다. 일반적으로, 초기에 위치 및 각도오차가 주어졌을경우 이에 상응한 힘/모멘트 정보를 얻는 것은 몇가지의 가정하에서 가능하다 [10, 11]. 그러나 실제 조립작업의 목적은 힘/모멘트 정보로부터 홀에 상대적인 력의 위치오차를 찾아내고 이를 보상하는 작업이다. 그런데, 힘/모멘트 정보와 위치오차의 관계를 수학적 모델로부터 구하는 작업은 다음과 같은 문제점을 가진다. a)기본적상태에서조차 힘/모멘트 정보와 위치오차와의 관계는 해석적으로 구하지 못하고, b)또한 수학적 모델링은 단순히 준정적상태 (quasi-static state) 하에서 이루어지므로 실제조립 상태를 묘사하는데 제한을 가진다. 따라서 부품의 위치정보가 불확실한 경우 미리정해진 크리프(crisp)한 알고리즘에 의하여 조립작업을 하는것은 어렵다[14]. 이러한 상황에도 인간은 성공적인 조립작업을 수행한다.

따라서, 조립작업을 행하는 인간의 추론(reasoning)과 동작(action)을 묘사함으로써, 성공적인 작업을 수행하려는 시도가 있다. 그와 같은 한 방법으로서 퍼지집합이론을 이용한 방법이다.

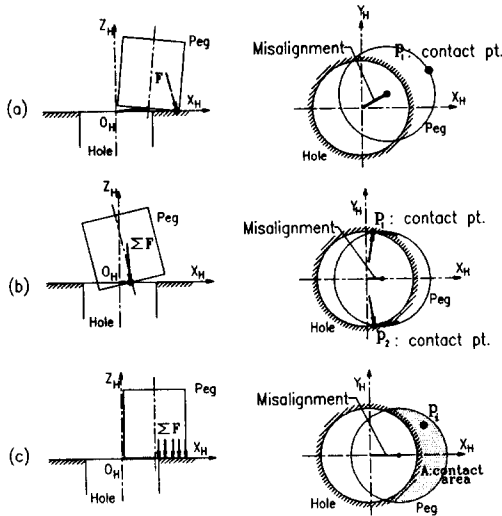


Fig.1 Contact configurations in the peg-in-hole task.

- (a) one-point contact (b) two-point contact  
(c) area contact

### 3. 퍼지규칙 베이스 조립알고리즘

조립알고리즘의 문제는 힘/모멘트 정보벡터,  $F$ ,로부터 조립작업이 성공적으로 이루어지기위한 올바른 위치오차를 추정보상하는 제어문제이다. 이러한 목적을 위하여 제시된 조립 알고리즘은 (a)퍼지화(fuzzification), (b)규칙베이스(rule base), (c)추론 기구(inference mechanism), (d)비퍼지화(defuzzification)등으로 이루어져 있다.

### 3.1. 퍼지화

퍼지화는 관측된 입력공간으로부터 어떤 일정대역의 퍼지 집합으로 대응(mapping)시키는 것을 의미하며, 퍼지화를 수행하기 위하여 조립작업과 관련된 입력/출력 변수를 먼저 설정해야한다. 우선 입력 변수로서 다음과 같이 4개의 힘/모멘트 정보를 선택한다. 즉,

- $x_1 = f_x$  : x방향의 힘
- $x_2 = f_y$  : y방향의 힘
- $x_3 = m_x$  : x방향의 모멘트
- $x_4 = m_y$  : y방향의 모멘트

또한, 출력변수로서 부품간의 x,y방향의 위치오차를 각각  $u_x, u_y$ 로 선택한다. 퍼지분할(fuzzy partition)을 위한 기본적인 퍼지집합으로서,  $x_1$ 과  $x_2$ 에 대해서는 3,  $x_3$ 과  $x_4$ 에 대해서는 5, 그리고 출력  $u_x$  과  $u_y$ 에 대하여 각각 13개를 선택하였다. 기본적 퍼지집합의 언어적 의미는 다음과 같다.

- PVB : positive very big
- PB : positive big
- PNB : positive medium big
- PSM : positive small medium
- PS : positive small
- PVS : positive very small
- ZR : zero
- NVS : negative very small
- NS : negative small
- NSM : negative small medium
- NMB : negative medium big
- NB : negative big
- NVB : negative very big

그림2는 각각의 멤버십 함수를 보여준다.

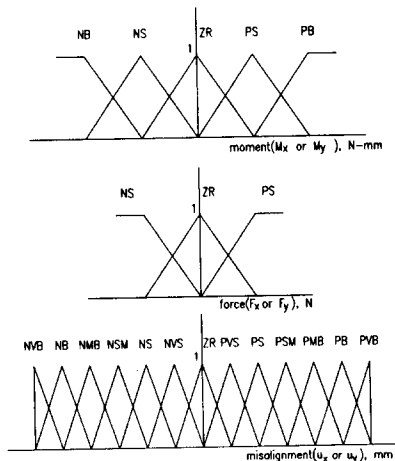


Fig.2 Fuzzy membership function for input/output variables

### 3.2. 규칙 베이스

퍼지알고리즘의 핵심부분으로써, 입력과 출력간의 다중결합(multiple mapping)을 표현하는 규칙의 구축은 그성능을 좌우한다. 그런데 이런 규칙을 구축하는 일반적 방법은 제시되지 않았으며, 대개 다음과 같은 4가지의 방법에 의하여 규칙을 얻는다[15]. (a)전문가의 경험이나 공학적 지식, (b)오퍼레이터의 제어특성(operator's actions), (c)공정의 퍼지 모델, (d)

자기 개선(self improvement)등이 있다.

따라서, 4개의 입력변수와 2개의 출력변수를 가지는 조립 알고리즘의 일반적 규칙의 형태는 다음과 같다.

$$R_k : \begin{aligned} & \text{IF } x_1 \text{ is } X_1(k), x_2 \text{ is } X_2(k), \\ & \quad x_3 \text{ is } X_3(k), \text{ and } x_4 \text{ is } X_4(k) \\ & \text{THEN } u_x \text{ is } U_x(k) \text{ and } u_y \text{ is } U_y(k) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $x_1$ 와  $u_x, u_y$ 는 입력과 출력 변수들이며,  $X_1$ 와  $U_x, U_y$ 는 퍼지집합이다.

따라서, 전체적인 규칙베이스는 4개의 입력과 2개의 출력을 가지는 MIMO 시스템형을 갖는다. 즉, 전체적인 규칙은

$$R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\} \quad (2)$$

여기서,  $R_1$ 는 식(1)로 표시되는 k번째규칙을 나타낸다.

그런데 4개의 입력에 대하여 2개의 출력을 독립적으로 발생시키기위하여 다음과 같은 연산을 한다. 즉, 방정식(1)는 다음과 같이 퍼지관계(fuzzy implication)로서 나타내면,

$$R_k : [X_1(k) \times \dots \times X_4(k)] \rightarrow (u_x + u_y) \quad (3)$$

따라서, 규칙 R은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} R &= \left\{ \bigcup_{k=1}^n R_k \right\} \\ &= \left\{ \bigcup_{k=1}^n [X_1(k) \times \dots \times X_4(k)] \rightarrow (u_x + u_y) \right\} \\ &= \left\{ \bigcup_{k=1}^n [X_1(k) \times \dots \times X_4(k)] \rightarrow (u_x) \right\}, \\ & \quad \bigcup_{k=1}^n [X_1(k) \times \dots \times X_4(k)] \rightarrow (u_y) \left\} \\ &= \{ RB_x, RB_y \} \end{aligned} \quad (4)$$

효과적으로, 규칙 R은 각각 4개의 입력에 대하여 하나의 출력 변수로 대응되는 2개의 부규칙베이스(sub-rule-bases),  $RB_x$ 와  $RB_y$ 로 나타내지며, 각각의 부규칙들은 n개의 규칙들의 군으로 이루어져 있다.

### 3.3. 퍼지 추론

퍼지추론은 앞절에서 구축한 퍼지규칙에 의하여 제어값을 발생하는데 중요한 역할을 한다. 방정식(4)에 의하여 x축과 y축의 값은 각각 독립적으로 발생되며, 이때의 퍼지추론은 일반적으로 많이 사용하는 만다니(Mandani)의 최소-최대(MIN-MAX)합성에 의하여 이루어진다.

여기서 x축에 대하여 추론 과정을 기술한다. 만일  $\mu_k(u_x)$ 를 출력  $u_x$ 의 집합에 대한 멤버십함수의 정도를 나타낸다면, k번째 규칙으로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\mu_k(u_x) = \text{MIN}[\mu_k(x_1), \mu_k(x_2), \mu_k(x_3), \mu_k(x_4)] \quad (5)$$

여기서  $x_i$ 는 측정된 입력값을 말한다. 따라서 n개의 규칙에

의하여 얻어지는 최종적 멤버십 정도값(membership graded function)은 최대합성에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$\mu(u_x) = \text{MAX}[\mu_1(u_x), \mu_2(u_x), \dots, \mu_n(u_x)] \quad (6)$$

y축에 대해서도 같은 과정을 거쳐 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\mu(u_y) = \text{MAX}[\mu_1(u_y), \mu_2(u_y), \dots, \mu_n(u_y)] \quad (7)$$

### 3.4. 비퍼지화

비퍼지화는 출력공간에 대하여 정의된 퍼지추론값으로부터 실제 출력공간상으로 크리스프한 값을 구하는 과정이다. 이 연구에서 사용된 중심법(center of area method)은 제어값의 확률적 분포를 무게중심법으로 구하는 것으로 다음과 같은 형을 갖는다.

$$u_x = \frac{\int \mu(u_x) u_x du_x}{\int \mu(u_x) du_x} \quad (8)$$

$$u_y = \frac{\int \mu(u_y) u_y du_y}{\int \mu(u_y) du_y}$$

## 4. 실험

본 연구에서 제시된 조립알고리즘의 성능을 다음과 같은 일련의 실험을 통하여 평가한다. 첫번째로, 조립작업에 대하여 구축한 규칙을 검증하기 위하여, 힘/모멘트 정보로부터 규칙에 근거한 보정운동의 궤적을 살펴보고, 여러가지의 초기오차에 대한 궤적을 살펴본 후, 마지막으로 몇가지 초기 오차에 대한 반복적 실험결과를 제시한다.

### 4.1. 조립시스템

제시된 조립알고리즘을 적용하기 위하여그림3에 보여주는바와 같이 실험장치를 구성하였다. 즉 이시스템은 힘/모멘트 센서, X-Y미세 조정 테이블, RCC, SCARA타입 로봇, IBM/AT 컴퓨터등으로 이루어져 있다.

X-Y미세조정 테이블은 2차원의 평면운동을 할 수 있게 구성되었으며, 2개의 D.C서보 모터에 의하여 구동되며, 서보제어기는 위치 PID제어기에 의하여 제어된다. 이것은 로봇의 손목부에 부착하였을 경우와 그 원리에 있어서는 동등하다. 이 테이블의 주요한 기능으로는 결합부품간의 오차를 퍼지 규칙베이스에 의하여 추론된 탕만큼 보상하는 역할을 한다. 이외에 X-Y테이블위에 힘/모멘트 센서를 가지고 있다.

한편, 효과적인 조립 작업을 수행하기 위하여, 즉 정밀 조립작업의 경우 조립가능 영역(tolerable area)는 컴플라이언스의 도입에 의하여 넓혀지고, 또 과도한 힘의 발생을 억제하기 위하여 수동컴플라이언스 기구가 필요하며[16], 본 연구에서는 RCC를 사용하였다. 그러나 앞절에서 구축한 퍼지규칙은 이러한 컴플라이언스에 관계없이 유도되었다.

IBM/AT는 구축한 퍼지룰을 이용하여 적절한 오차량을 생성하여 이 값을 X-Y테이블의 제어기에 병렬 I/O포트를 통하여 전달하는 역할과 힘/모멘트센서를 RS-232C포트를 통하여 얻는다.

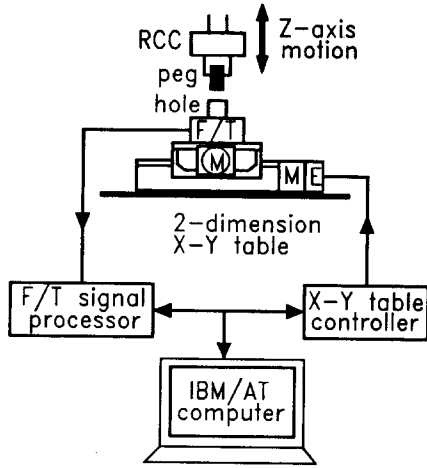


Fig. 3 Experimental set-up

#### 4.2. 실험 순서

그림4는 제시된 알고리즘의 적용 순서도이다. 먼저 력을 일정한 힘이 작용하는 위치까지 Z축을 따라 접근시킨다. 이때 력과 홀간의 접촉력,  $F_z$ , 이 정해진 구간( $F_{z1} \leq F_z \leq F_{z2}$ )의 값을 나타낼때 탐색작업을 시작한다. 력이 홀을 찾아 움직이는 방향과 크기는 테이블1에 주어진 49개의 퍼지룰에 의하여 이루어진다. 추론된 값은 X-Y미세조정 테이블의 제어기에 보내어지고, 이것은 결국 부품간의 오차를 조정하는 운동을 일으키게 된다. 그리고 탐색작업의 성공여부의 판별은 Z축방향의 급작스런 힘의 변화에 의한다. 만약, 탐색이 완전히 이루어지지 않았으면 탐색작업을 반복한다. 결국 탐색작업이 완료된 후, 삽입 동작이 이루어진다. 왜냐하면, 위치보정이 불완전한 상황에서 삽입이 이루어지면 재밍(jamming)등이 발생하여 조립작업은 불가능할 수 있다.

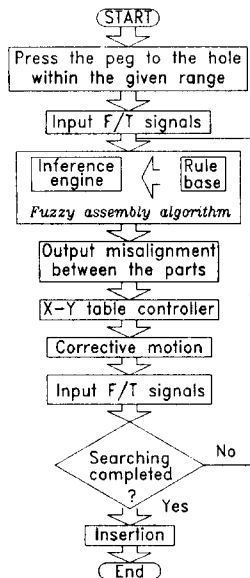


Fig. 4 Flowchart of experiment

#### 4.3. 실험 결과 및 토의

그림5-(a)는 출력표계에서 본 력의 탐색궤적을 보여준다. 또한, 그림5-(b)에서는 이때 측정된 조립반력을 보여준다. 탐색의 순서를 살펴보면, 먼저 그림5-(b)에서 보여주는  $F_x, F_y, M_x, M_y$ 의 힘정보를 퍼지룰의 입력변수로 퍼지규칙에 입력한다.  $F_x$ 와  $F_y$ 는 영의 상태이고,  $M_x$ 는 양,  $M_y$ 는 음이고 크기의 비가 비슷하므로 3사분면에 위치하게 된다. 따라서, 력의 이동방향은 그림에서 거의 45°방향으로 홀에 접근함을 알 수 있다. 두번째 신호를 살펴보면  $F_x$  및  $F_y$  모두 양이고  $M_x$ 는 양,  $M_y$ 도 양(positive)로서, 탐색 궤적을 보면 부품간의 오차가 홀의 관점에서 보았을 때 4사분면에서 발생한 경우처럼 나타난다. 이것은 비록 홀중심좌표에 대하여 력이 3사분면에 존재할 지라도, 접촉점은 4사분면에 위치할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 입력과 보상과정의 반복에 의하여 결국 8스텝으로 탐색작업은 성공적으로 이루어졌으며, 그후 삽입공정이 계속되어도 반력이 거의 나타나지 않으므로 탐색작업은 거의 완전하게 X-Y평면에 대하여 고정운동이 이루어졌음을 알 수 있다. 앞서 설명하였듯이 탐색작업의 완료는 스텝제 7에서  $F_z$ 의 힘이 급작스럽게 변함을 알 수 있다. 또한,  $F_z$ 가 비록 일정한 영역내에 존재할지라도 다소의 변화가 있는것은 접촉표면의 변화에 기인한다.

그림6은 크기는 같고 방향이 다른 초기오차가 3mm인 경우의 탐색궤적을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 비록 같은 크기의 초기오차를 가질지라도 오차의 방향에 따라 탐색성공 스텝의 수가 달라지는데, 이것은 조립공정에서 표면거칠기, 가공오차등의 불확실한 변수(parameters)에 기인한다.

한편, 그림7은 초기오차의 방향에 관계없이 초기오차의 크기에 따라 각각 30번 반복 실험하였을 경우의 성공적인 탐색 스텝수를 나타내었다. 자연스럽게도 초기오차의 크기가 클수록 탐색 스텝수는 많아지며, 오차가 클수록 평균스텝수에 대한 분산의 값역시 커지는데 이것은 오차가 커질수록 불확실한 요인이 누적되기 때문이다.

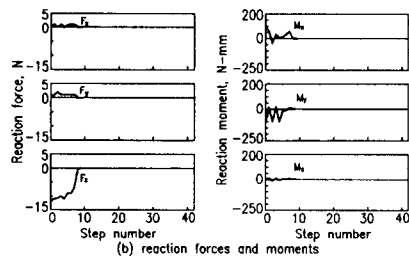
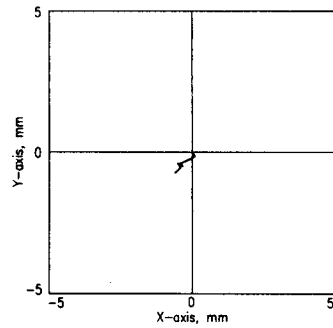


Fig. 5 Experimental results for searching trajectories reaction forces and moments: Initial error = 1mm

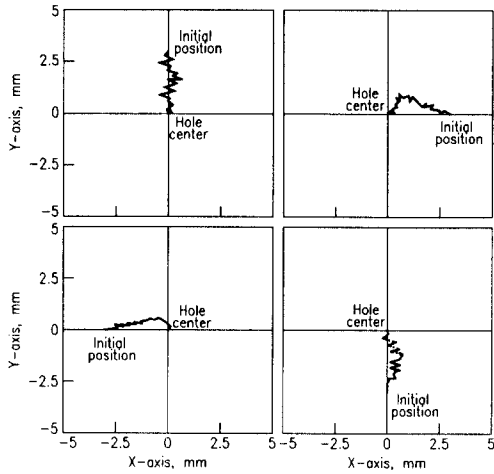


Fig.6 Searching trajectories for different initial positions

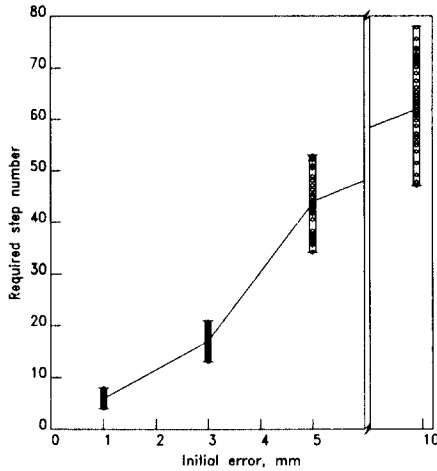


Fig.7 Required step number for various initial error magnitudes

## 5. 결론

본 논문에서는 조립작업과 관련한 비선형관계와 불확실성을 극복하기 위하여 퍼지 규칙베이스 조립알고리즘을 제시하였다. 조립작업에서의 불확실성은 퍼지 멤버십함수에 의하여 표현된다. 또한, 힘/모멘트 정보와 고정운동간의 비선형성 및 다중관계는 규칙에 의하여 묘사되었다.

제시된 알고리즘의 성능은 여러가지 관점에서 실험을 통하여 검증되었다. 실험 결과로부터, 제시된 조립방법은 먼치가 없는 정밀 부품의 조립에 효율적으로 사용될 수 있음을 보여준다.

## 6. 참고 문헌

1. H.S. Cho, H.J. Warnecke, D.G.Gweon, "Robotic assembly : a synthesizing overview," *Robotica*, No.5, pp.153-165, 1987.

Table. 1 Fuzzy rules for assembly task

Rule No	INPUT					OUTPUT Misalignment ( $u_x, u_y$ )
	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	M <sub>z</sub>	
1	ZR	ZR	ZR	ZR	-	(ZR, ZR)
2	PS	ZR	ZR	PS	-	(PVS, ZR)
3	ZR	ZR	ZR	PS	-	(PS, ZR)
4	NS	ZR	ZR	PS	-	(PSM, ZR)
5	PS	ZR	ZR	PB	-	(PMB, ZR)
6	ZR	ZR	ZR	PB	-	(PB, ZR)
7	NS	ZR	ZR	PB	-	(PVB, ZR)
8	PS	PS	NS	PS	-	(PVS, PVS)
9	ZR	ZR	NS	PS	-	(PS, PS)
10	NS	NS	NS	PS	-	(PSM, PSM)
11	PS	PS	NB	PB	-	(PMB, PMB)
12	ZR	ZR	NB	PB	-	(PB, PB)
13	NS	NS	NB	PB	-	(PVB, PVB)
14	ZR	PS	NS	ZR	-	(ZR, PVS)
15	ZR	ZR	NS	ZR	-	(ZR, PS)
16	ZR	NS	NS	ZR	-	(ZR, PSM)
17	ZR	PS	NB	ZR	-	(ZR, PMB)
18	ZR	ZR	NB	ZR	-	(ZR, PB)
19	ZR	NS	NB	ZR	-	(ZR, PVB)
20	NS	PS	NS	NS	-	(NVS, PVS)
21	ZR	ZR	NS	NS	-	(NS, PS)
22	PS	NS	NS	NS	-	(NSM, PSM)
23	NS	PS	NB	NB	-	(NMB, PMB)
24	ZR	ZR	NB	NB	-	(NB, PB)
25	PS	NS	NB	NB	-	(NVB, PVB)
26	NS	ZR	ZR	NS	-	(NVS, ZR)
27	ZR	ZR	ZR	NS	-	(NS, ZR)
28	PS	ZR	ZR	NS	-	(NSM, ZR)
29	NS	ZR	ZR	NB	-	(NMB, ZR)
30	ZR	ZR	ZR	NB	-	(NB, ZR)
31	PS	ZR	ZR	NB	-	(NVB, ZR)
32	NS	PS	PS	NS	-	(NVS, NVS)
33	ZR	ZR	PS	NS	-	(NS, NS)
34	PS	NS	PS	NS	-	(NSM, NSM)
35	NS	PS	PB	NB	-	(NMB, NMB)
36	ZR	ZR	PB	NB	-	(NB, NB)
37	PS	NS	PB	NB	-	(NVB, NVB)
38	ZR	PS	PS	ZR	-	(ZR, NVS)
39	ZR	ZR	PS	ZR	-	(ZR, NS)
40	ZR	NS	PS	ZR	-	(ZR, NSM)
41	ZR	PS	PB	ZR	-	(ZR, NMB)
42	ZR	ZR	PB	ZR	-	(ZR, NB)
43	ZR	NS	PB	ZR	-	(ZR, NVB)
44	PS	PS	PS	PS	-	(PVS, NVS)
45	ZR	ZR	PS	PS	-	(PS, NS)
46	NS	NS	PS	PS	-	(PSM, NSM)
47	PS	PS	PB	PB	-	(PMB, NMB)
48	ZR	ZR	PB	PB	-	(PB, NB)
49	NS	NS	PB	PB	-	(PVB, NVB)

6. N.A. Aspragathos, "Assembly strategies for parts with a plane of symmetry," *Robotica*, No.9, pp.189-195, 1991.
7. D.E. Whitney, "Historical perspective and state of art in robot force control," *Int. J. Robotics Research*, No.6, pp.3-14, 1987.
8. T.Goto, K.Takeyasu, and T. Inoyama, "Control algorithm for precision insert operation robots," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, No.19, pp.797-810, 1981.
9. H.Asada and S.Hirai, "Towards a symbolic-level force feedback: recognition of assembly process states," *Proc. 5th Int. Symp. Robotics Research*, pp.341-346, 1989.
10. S.N. Gottschlich and A.C. Kak, "A dynamic approach to high-precision parts mating," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, No.19, pp.797-810, 1989.
11. C.S.G. Lee and R.H. Smith, "Force feedback control in insertion process using pattern analysis techniques," *Proc. Amer. Cont. Conf.*, pp.39-44, 1984.
12. M.Brady, *Robotics science*, MIT press, 1989.
13. X.Jing and R.A. Volz, "Design and motion constraints of parts mating planning in the presence of uncertainties," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automation*, pp.1260-1268, 1988.
14. K.Hara and R. Yokogawa, "Precision insertion by heuristic search with fuzzy pattern matching," *JSME(C)*, No.56, pp.134-139, 1990.
15. C.C. Lee, "Fuzzy logic in control systems : fuzzy logic controller -Part I, Part II," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, No.20, pp.404-435, 1990.
16. K.Takeyasu, T.Goto, and T.Inoyama, "Precision insertion control robot and its application," *J. Eng. for Industry*, pp.1313-1318, 1976.