

Fuzzy 推論法에 의한 部品 挿入 工程의 接觸狀態 判別

정 광 조*, 류 상 옥**, 이 현 우***, 정 원 용***, 이 수 흠***

Identification of Contact State between Parts during Peg-In-Hole Process by Fuzzy Inference Method

Gwang-Jo Chung*, Sang-Uk Ryu**, Hyon-Woo Lee***, Won-Yong Chong***, Soo-Heum Lee***

ABSTRACT

In the automation of rigid parts mating process with the intelligent robots, Peg-In-Hole is the most available assembly task since inserting is some analytic and needs suitable range of forces that can be controlled by industrial manipulators. In this Peg-In-Hole process, it is very important to identify the contact state between two parts, peg and hole, to build the strategies for robot motion that leads to avoid the jamming condition occurs during insertion process. In this paper, we adopted 3 parameters for identification, $|Fz|$, $|Fxy/Fz|$, and $|Mxy/Fxy|$, derived from axes value of Whitney's jamming diagram. Also, we defined the fuzzy membership functions for these parameters and developed the identification algorithm based on fuzzy inference method of max-product. As an experimental result, we obtained about 96% of identification ratio that could be raised up to industrial requirements by further research.

Key Words : Peg, Hole, Insertion, Parts Mating, Fuzzy Inference, Contact State, Identification (or Recognition)

1. 서 론

산업용 로봇의 응용도가 가장 높은 조립작업은 대략 부품의 공급방법과 조립공정, 그리고 완성품의 추출 단계로 분류할 수 있는데 그중 자동화의 난이도가 가장 높고 고도의 기술을 요하는 분야가 바로 조립작업중의 부품 결합공정이다. 이 부품의 결합공정은 대상 부품간의 결합력의 크기에 따라 정합(mounting), 삽입(inserting), 강제결합(tight fitting) 등으로 분류(1)

되는데 이중 정합은 조립용 치구(jig)를 이용하는 편이 더욱 효율적이고 강제결합은 용접이나 볼팅(bolting), 리벳팅(rivetting), 본딩(bonding) 등의 2차적 결합방법의 비중이 더욱 커져 지능화가 쉽지 않다. 산업용 로봇의 지능화로 해결의 가능성이 가장 높은 분야는 두번째의 삽입(inserting)과정으로 제어 및 계측이 가능한 비교적 작은 결합력의 범주에서 요철(凹凸)부품을 대상으로 결합이 이루어진다. 물론 대상 부품의 정밀도에 따라 자동화의 난이도와 비용이 급증하게 되므로 생

* 한국기계연구원 자동제어실(정회원)

** 영남전문대학 전자과

*** 경남대학교 전기공학과

산현장에서의 실용성은 아직은 다소 미약하지만 컴퓨터 기술의 고도화와 fuzzy 제어등의 각종 인공지능 기술개발에 힘입어 이 기술분야의 향후 성장속도는 매우 빨라질 것으로 보인다.

이 분야 연구는 주류를 이루고 있는 기존의 force feedback 기법이나 stiffness 제어, damping 제어등의 고전적인 방법에 비해 fuzzy 제어 기법은 조립을 진행하는 전략(strategy)보다는 주어진 task를 이해하는 실질적인 정보를 더 많이 필요로 하고(2), 이에 충실함으로써 정확한 상황설정이 어렵고 모델의 불확실성이 큰 제어대상에 잘 적용되어 최근에 부품조립의 지능화에도 점차 응용의 빈도가 높아지고 있다. Fuzzy 관련기술의 발전속도가 가장 빠르고 여러분야에서 이를 응용하여 상당한 실적을 올리고 있는 일본에서도 이러한 fuzzy 방식에 의한 peg-in-hole 연구가 상당히 활발하게 이루어지고 있는데 原 敬, 横川隆一 등의 연구(6)가 그 대표적인 예이다.

본 논문에서는 이러한 부품 결합작업의 모델로 가장 전형적인 원형 peg과 hole을 대상으로 진행되는 자동조립공정 즉 Peg-In-Hole 과정중의 peg과 hole간의 접촉상태를 판별하기 위한 파라미터로서 위의 原 敬등이 제시한 내용보다 더 효율적이고 정적인 접촉상태를 판별하는데 특히 효과적인 파라미터를 제시하고 이의 효율성을 실험적으로 입증하고 최종적으로 fuzzy 추론방법에 의한 판별알고리즘을 구현하여 실제 산업현장에서의 적용가능성을 보여주는데 초점을 맞추었다.

2. Peg-In-Hole 과정의 모델링

Peg-In-Hole 과정중 결합 부품간에 발생할 수 있는 접촉상태는 일반적으로 그림 1과 같은 4가지 형태로 표현된다. (3) 이중 접근상태(approach)와 챔퍼면 접촉(chamfer crossing) 상태는 조립에 필요한 정상적인 과도상태(transient state)이고 일단 peg이 hole에 삽입되기 시작되면 잘못된 삽입력의 인가나 peg의 진행속과 hole 중심축간의 편심(deflection)에 의해 더이상 삽입이 진행될 수 없는 jamming 상태가 그림 1의 c), d)와 같은 1점(One Point Contact) 또는 2점 접촉(Two Point Contact) 형태로 발생한다. 조립작업의 지능화는 바로 이러한 접촉상태를 정확히 판별하여 이에 따른 적절한 관절 구동신호를 로봇으로 출력하는 것이

그 핵심이라고 할 수 있다. Whitney는 이러한 jamming 상태를 그림 2와 같이 도시적인 형태로 모델링 하였다. (4) 그림에서 횡축은 삽입력에 대한 측면작용력(lateral force)의 비율을, 그리고 종축은 삽입력에 대한 수평축(x, y축) 발생 회전력의 비율을 나타낸다. jamming은 그림의 사각 실선상을 따라 이루어지며 실선의 내부에서 정상적인 삽입이 이루어진다.

여기서 $\lambda = \frac{l}{2\pi\mu}$ 로서 l (삽입깊이)과 r (peg의 반경), 그리고 μ (마찰계수)의 변환값이다. 정상적인 삽입은 그림의 평행 사변형의 내부에서 일어나며 반경 r 크거나 l 이 작은 경우(삽입깊이가 작은 경우) 사변형의 모양이 납작하게 되면서 jamming 상태를 피하기가 어려워진다.

또한 그림에서 알 수 있는 바와 같이 jamming을 피할 수 있는 조건은

$$-\frac{1}{\mu} < \frac{F_{xy}}{F_z} < \frac{1}{\mu}$$

가 되는데 이를 만족하기 위해서는 F_z 의 값이 적당히 커야한다. (5) 즉 적절한 크기 이상의 삽입력이 보장되는

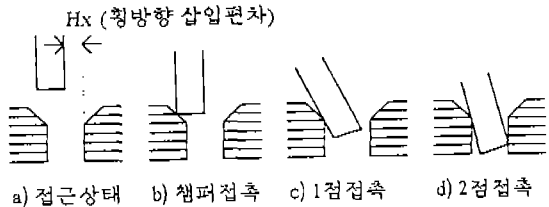


Fig. 1 4 contact state during Peg-In-Hole process

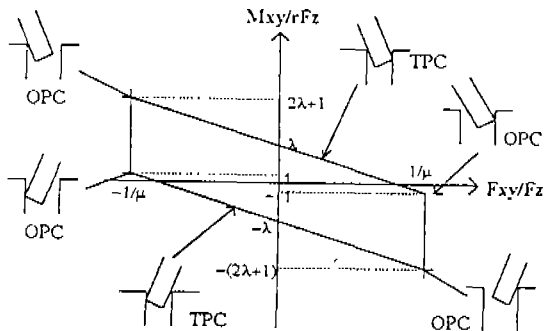


Fig. 2 Whitney's jamming diagram

상태에서만 peg-in-hole 과정의 상태해석이 가능하게 된다.

3. Jamming Diagram의 재구성 및 상태판별 파라미터 설정

앞에서 언급한 jamming diagram에서 모든 좌표값의 절대값을 취하고 종축을 r 을 곱한 값으로 재설정하면 그림 3의 a), b)와 같이 모든 결과치가 1상한에만 존재하여 해석이 간편한 형태로 된다.

여기서 그림 3의 a)는 $\lambda > 1$ 인 경우 즉, $l > 2r\mu$ or $r < r\lambda$ 로서 jamming 선도와 종축과의 교점이 peg 반경 r 값보다 높은 위치에 존재한다. 이 경우는 대상 peg 및 hole의 구경에 비해 삽입이 어느 정도 깊이 진행된 상태로서 일단 no-jamming 영역에 들어서게 되면 작은 삽입력으로도 쉽게 삽입이 진행된다.

그림 3의 b)의 경우는 반대로 $\lambda < 1$ 인 경우 즉, $l < 2r\mu$ or $r > r\lambda$ 로서 jamming 선도와 종축의 교점이 r 값이 아래쪽에 존재하며 이 경우는 peg과 hole의 구경에 비해 삽입깊이가 짧은 초기상태로서 삽입이 진행됨에 따라 1점 접촉의 위쪽점(Po)의 종축을 따라 증가하면서 결국 그림 3의 a) 상태로 진입하게 된다.

Peg-In-Hole 과정에서 적절한 챔퍼(chamfer) 구조를 사용하면 위의 a)의 경우는 쉽게 해결될 수 있다. 따라서 문제는 그림 3의 b)와 같은 삽입 초기상태에서의 접촉상태를 판별하는데 초점이 모아진다. 그림 3의 b)에서 Po 점은 삽입상태에 따라 등적으로 변화하지만 아래쪽의 1점 접촉점 Pr은 부품의 물리적 재질과 특성에 관계하는 마찰계수(friction coefficient)와 peg의 반경 r 로 정해지는 고정점으로 된다. 본 논문에서는 이 점을 jamming 기준점(Ref. Point of Jamming)으로 정의한다. 그림으로부터 우리는 peg과 hole간의 접촉상태를 유추할 수 있는 다음의 몇가지 parameter를 정할 수 있다.

- 1) 대체로 횡축의 최대값은 $1/\mu$ 되는 지점 근처에 있고 여기에 1점 접촉의 상태가 존재한다. (나머지 상태는 그 이하)
- 2) 원점과 jamming 기준점(Pr)을 잇는 직선은 고정값에 가깝고 그보다 위쪽의 영역에서 1점 접촉이 일어나고 그아래 부분에서 2점 접촉의 일어날 가능성이 많다.

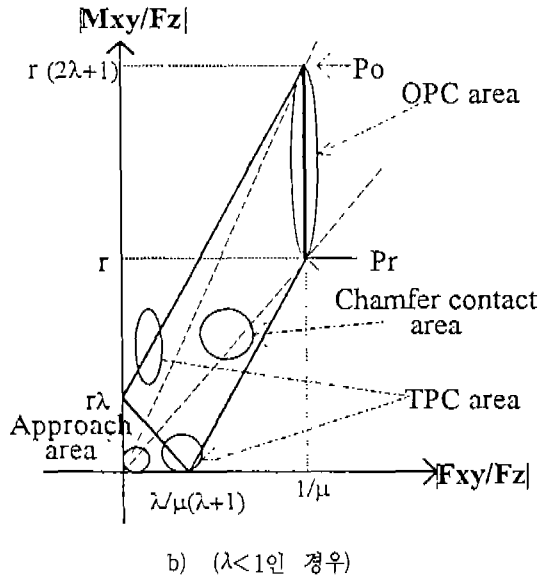
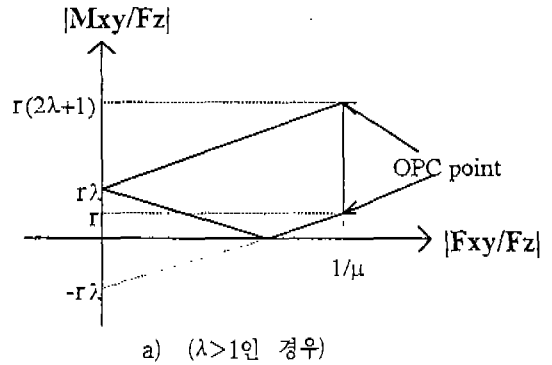


Fig. 3 Absolute jamming diagram

- 3) 접근상태는 종축, 횡축값이 모두 작아서 그림의 원점에 가까운 영역에 있다.
- 4) 챔퍼면 접촉상태는 삽입력 $|Fz|$ 이 지나치게 크거나 작지 않으면 no-jamming 영역의 내부에 존재한다. 이상의 판별기준 parameter를 대상으로 접촉상태 발생영역을 추정해 보면 그림 3 b)에서 원형으로 표기한 영역과 같이 구분된다.

4. Force/Torque 센서에 의한 Peg-In-Hole 실험장치

부품결합작업의 모델로 선정된 peg과 hole의 결합과

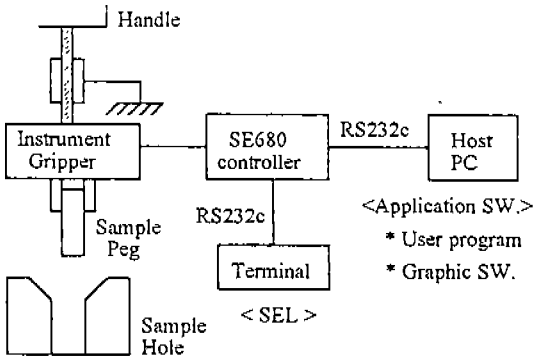


Fig. 4 Configuration of Peg-In-Hole experimental system

정에서 접촉상태를 Force/Torque 센서로 신호화 하기 위하여 그림 4와 같이 실험장치를 구성하였다.

주요 구성요소의 사양은 다음과 같다.

- 6축 Force/Torque Sensor : instrument gripper (미국 LORD사)
 - 감지 정밀도 : ± 0.02 [lbs] or [in-lbs]
 - 감지 범위 : force ± 10.0 [lbs], torque ± 20.0 [in-lbs]
- Sensor controller : SE680 (미국 LORD사)
- Sensor 구동장치 : handle식 이송기구 (자체제작)
- RCC : 스프링 interfacing (자체제작)
 - X축 방향 탄성 : 2.2N/mm
 - Y축 방향 탄성 : 2.6N/mm
- Peg & Hole : 원형 알루미늄 가공품 (자체제작)
 - Peg : 직경 19.8mm, 길이 120mm
 - Hole : 직경 20.0mm, 깊이 80mm, 챔퍼 45°
- Host PC & terminal : IBM 호환기종 (286급)

사용된 LORD사의 instrument gripper는 SEL (Sensor Effective Language)이라는 전용의 프로그램밍 언어를 사용하고 있다. 센서로부터 고속으로 data를 추출하여 gripper 제어장치를 통해 serial 9600 baud로 보내는 기능을 SEL로 실현할 수 있는 속도는 1축의 force 또는 torque 신호에 대해 약 5msec 정도이다. peg과 hole의 접촉상태 관별에 필요한 F_x , y , z 과 T_x , y 의 5가지 신호를 동시에 받게되면 대략 25msec의 샘플링 주기를 실현할 수 있다. 센서로부터 입력된 data는 샘플링 시간을 최소로 하기 위해서는 RAM 영역에 지정된 buffer에 일차적으로 무조건 저장하고 샘플링 종료후 spread sheet 형태로의 변환과정을 거쳐 된다.

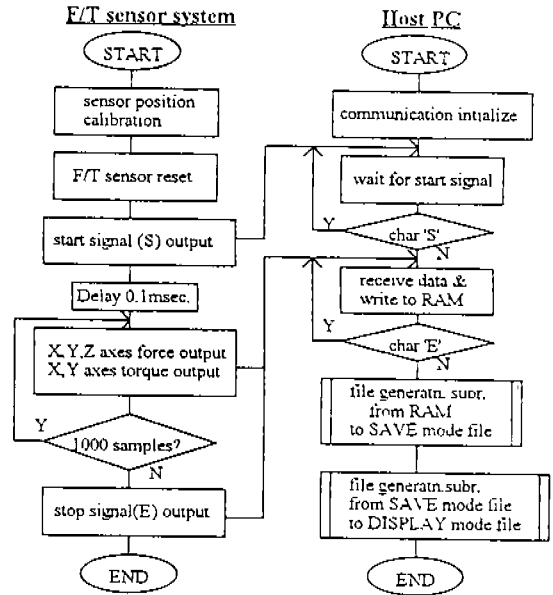


Fig. 5 Signal flow between F/T sensor system and host PC

플링 종료후 spread sheet 형태로의 변환과정을 거쳐 된다.

샘플 data의 추출 및 변환과정을 host PC와 F/T 센서간의 흐름도로 보면 그림 5와 같다.

5. Peg-In-Hole 신호 추출실험 및 고찰

그림 1의 4가지 삽입과정을 각각 다른 횡방향 편차

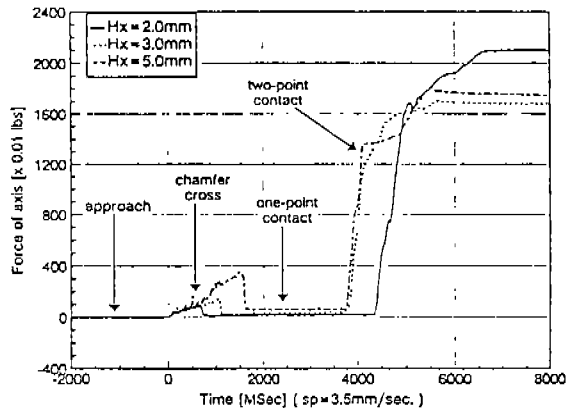


Fig. 6 Insertion force ($|F_z|$) during Peg-In-hole

($H_x=2\text{mm}, 3\text{mm}, 5\text{mm}$)에 대하여 실험하였다. 삽입 속도는 약 3.5mm/sec 로 하였고 편차의 크기에 따라 삽입 깊이는 유동적으로 된다. Peg과 hole의 접촉상태를 판정하는데 유용한 파라미터로서 jamming도에서 모든 축의 기준점이 되는 삽입력($|F_z|$) 값(그림 6)과 3절에서 정한 횡축($|F_{xy}/F_z|$) 값(그림 7)과 측정치가 원점과 jamming 기준점을 잇는 직선의 상, 하 어느편에 존재하는지를 판정할 수 있는 기울기($|M_{xy}/F_{xy}|$)의 값(그림 8) 등의 3가지 신호를 추출하였다. 여기서

$$F_{xy} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}, \quad M_{xy} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad 2)$$

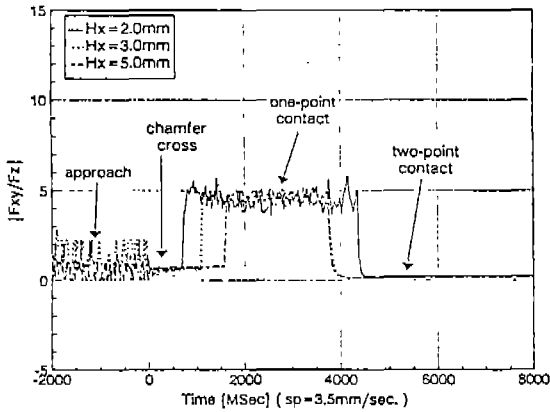


Fig. 7 Horizontal axis value ($|F_{xy}/F_z|$) of Fig. 3

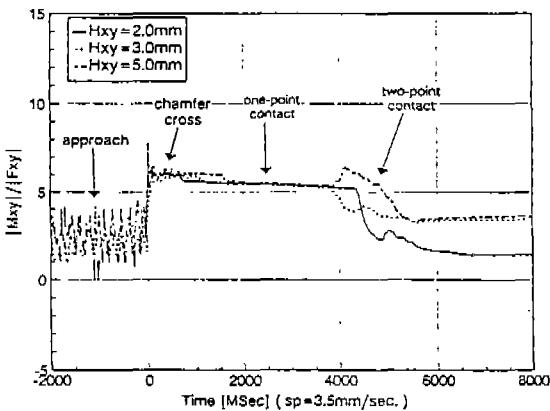


Fig. 8 Slope value ($|M_{xy}/F_{xy}|$) of Fig. 3

로 대상 입력을 x 및 y 축상에서 발생하는 force나 moment의 벡터합으로 하여 중심축의 미세한 이동으로 인한 오차를 줄였다. 또한 각 그래프의 종축(시간축)은 챔퍼면 접촉이 시작되는 점을 기준치(0)로 하였고 2점 접촉이 일어나 Peg이 더 이상 전진될 수 없을 때까지는 진행 속도로 삽입깊이를 추정할 수 있다.

우선 그림 6의 삽입력($|F_z|$)을 검토해 보면 H_x 가 클수록 챔퍼면에서 삽입력이 커지고 챔퍼면이 peg면의 측면에 닿게되는 1점 접촉에서는 급격히 작아졌다가 2점 접촉 구간에서 다시 급격히 증가한다. 물론 각 접촉 상태에서의 $|F_z|$ 의 크기는 RCC(Remote Center Compliance)의 특성에 따라 그 변화 비율이 달라지겠지만 그 추이는 유사하게 나타난다.

그림 7의 $|F_{xy}/F_z|$ 를 보면 앞에서 유추한 바와 같이 1점 접촉상태에서 최대값을 보이며 H_x 의 변화에 관계없는 거의 고정값으로 나타나고 있다. 이 값은 이론상 $1/\mu$ 에 해당하는 값으로 실험결과로부터

$$1/\mu \approx 4.5 \quad \mu \approx 0.22 \text{로서}$$

실제 알루미늄으로 제작된 peg과 hole간의 마찰계수를 추정할 수 있으며 이 최대값 부근에서 1점 접촉이 나타나고 그외의 접촉상태는 그 이하에서 나타나 이론과 일치함을 보이고 있다.

그림 8의 $|M_{xy}/F_{xy}|$ 에서는 챔퍼접촉과 1점 접촉에서의 값이 거의 일정하게 나타는 것을 볼 수 있다. 이것은 챔퍼접촉상태가 1점접촉상태를 의미하는 기울기 구간상의 no-jamming 구간에 존재한다는 3절에서의 추정을 반증하고 있다. 또한 2점 접촉구간의 값은 P_o 점이 동적으로 변화함에 따라 변화폭이 크게 나타나고 있고 그림 6의 $|F_z|$ 값의 크기에 관계없이 횡방향편차(H_x)가 커짐에 따라 계산된 Pr점의 기울기값(≈ 2)을 중심으로 기울기가 상승하는 경향을 보이고 있으나 안정된 추이를 보이고 있지는 않아서 그림 2의 모델에서와 같이 2점 접촉의 영역이 jamming 선도를 따라 전체 구간에서 동적으로 변화함을 입증하고 있다.

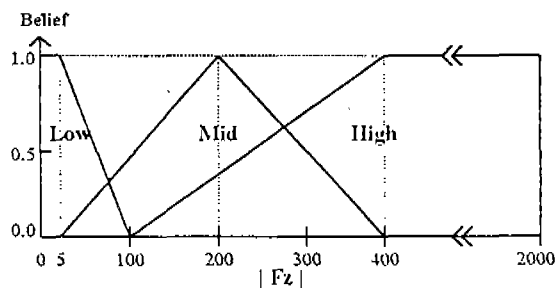
6. 접촉상태의 Fuzzy Membership함수 구성

1989년에 발표된 原 敬, 横川降一 등의 연구에서는 pge와 hole의 접촉상태를 fuzzy 집합을 이용하여 기술하였는데(6) 입력요소로는 Z축 방향의 힘과 그 변화량(F_z, dF_z), 그리고 Y축 방향의 회전력과 그 변화량

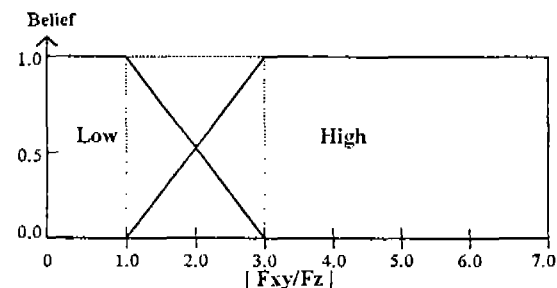
(My, dMy) 등 4가지 신호를 사용하였다. 그러나 변화량을 그 판별기준으로 하면 접촉상태의 천이(transition) 상태의 판별에는 유용하지만 peg과 hole의 정적인 접촉상태를 알아내기는 어렵다.

본 논문에서는 정적인 접촉상태에서도 유용한 판별 파라미터로서 앞에서 그 실효성을 입증한 $|Fz|$, $|Fxy/Fz|$, $|Mxy/Fxy|$ 등 3가지의 입력값을 대상으로 접촉상태를 판정할 수 있도록 그림 9와 같이 각각의 fuzzy

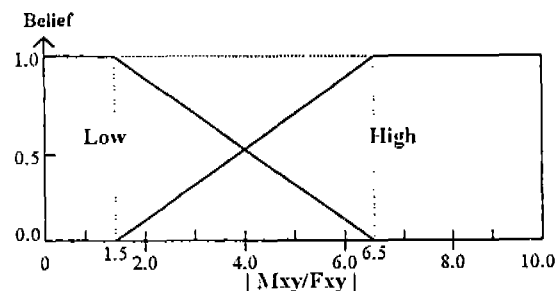
membership 함수를 구성하였다. 우선 그림 6의 $|Fz|$ 의 소속 함수를 Low, Mid, High의 3가지 fuzzy 집합으로 그림 9 a)와 같이 구성하였다. 접근상태와 1점 접촉상태는 공히 Low의 fuzzy 집합 소속으로 하고 그 범위를 0-100으로 잡았다. 다음 챔퍼 접촉상태는 Mid로 하고 실험대상인 3가지의 값을 모두 감안하여 5-400의 값으로 하고 그 중심값을 3가지 data의 평균에 가까운 200으로 하였다. 또한 2점 접촉상태에서 주로 형성되는 High의 집합은 200이상 400까지는 소속도가 직선적으로 증가하지만 그 이상의 값은 모두 High의 소속으로 정의하였다. 같은 요령으로 그림 7의 $|Fxy/Fz|$ 값은 1점 접촉상태를 High의 소속으로 하고 이를 제외한 나머지 상태는 모두 Low의 소속으로 하였다. (그림 9-b)) 또한 그림 8의 $|Mxy/Fxy|$ 값은 챔퍼 접촉, 1점 접촉상태는 High, 접근상태와 2점 접촉상태는 Low의 소속이 되도록 하였다. (그림 9-c))



a) Membership function of $|Fz|$



b) Membership function of $|Fxy/Fz|$



c) Membership function of $|Mxy/Fxy|$

Fig. 9 Membership functions of each inputs

7. Fuzzy 규칙에 의한 접촉상태의 표현 및 추론

6절에서 정의한 소속함수에 근거하여 peg과 hole간의 접촉상태를 판별하기 위한 판별 규칙을 다음과 같이 4개의 fuzzy relation⁽⁷⁾으로 정의할 수 있다.

$$R(1) : \text{IF}((|Fz| \text{ is Low}) \text{ and } (|Fxy/Fz| \text{ is Low}) \text{ and } (|Mxy/Fxy| \text{ is Low})) \text{ then } \text{PIH-status}=\text{approach or}$$

$$R(2) : \text{IF}((|Fz| \text{ is Mid}) \text{ and } (|Fxy/Fz| \text{ is High}) \text{ and } (|Mxy/Fxy| \text{ is Low})) \text{ then } \text{PIH-status}=\text{chamfer-cross or}$$

$$R(3) : \text{IF}((|Fz| \text{ is Low}) \text{ and } (|Fxy/Fz| \text{ is High}) \text{ and } (|Mxy/Fxy| \text{ is High})) \text{ then } \text{PIH-status}=\text{one-point-contact or}$$

$$R(4) : \text{IF}((|Fz| \text{ is High}) \text{ and } (|Fxy/Fz| \text{ is Low}) \text{ and } (|Mxy/Fxy| \text{ is Low})) \text{ then } \text{PIH-status}=\text{two-point-contact} \quad 3)$$

위의 4개의 규칙을 일반형으로 표시하면 $i(1-4)$ 번째 fuzzy relation $R(i)$ 은

$$\text{IF}((S1 \text{ is } A1u) \text{ and } (S2 \text{ is } A2v) \text{ and } (S3 \text{ is } A3w)) \text{ then } \text{Out}=\text{Bi} \quad 4)$$

여기서 i 는 퍼지 규칙번호(1-4)이고 u (Low, Mid or High)와 v, w (Low or High)는 각 소속함수의 해당 fuzzy subset을 나타낸다.

본 논문에서는 모든 입력값에 대한 적합도의 값이 유연하게 대응되도록 알고리즘의 단순화를 위하여 모든 입력 data 값을 crisp 값으로 하였고 추론방법은 max-product법을 사용하였다. 즉 fuzzy 제어기의 crisp 입력값을

$$|Fz|=a, |Fxy/Fz|=b, |Mxy/Fxy|=c라 놓으면$$

$$Wi = A1u(a) * A2v(b) * A3w(c) \quad (5)$$

각 규칙에의 적합도⁽⁹⁾ (Weighting factor) Wi는 다음과 같이 구한다.

$$O_{out} = \sum_{i=1}^4 Wi * Bi = W1 * B1 + W2 * B2 + W3 * B3 + W4 * B4 \quad (6)$$

또한 Max-product 법에 따라 퍼지변수 Oout는 퍼지출력 Bi를 사용하여 다음의 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

여기서, + : 퍼지 합집합 연산자(fuzzy set union operator)

보통 비퍼지화(defuzzification) 방법으로 무게중심법⁽¹⁰⁾ (centroid method)을 이용하여 전체 추론결과(O)는 식(7)과 같이 구한다.

$$O^{\circ} = \frac{\sum_{i=1}^4 Wi * Bi}{\sum_{i=1}^4 Wi} = \frac{W1 * B1 + W2 * B2 + W3 * B3 + W4 * B4}{W1 + W2 + W3 + W4} \quad (7)$$

8. 판별실험 및 결과 고찰

본 연구에서는 추론결과를 가지적으로 확인하기 위하여 주어진 입력에 대하여 식(3)의 4가지 규칙에의 적합도 W1-W4를 식(5)에 따라 각각 구하고 비교하여 그 최대값이 나타나는 규칙에 각각 다른 대표값을 부여하였다.

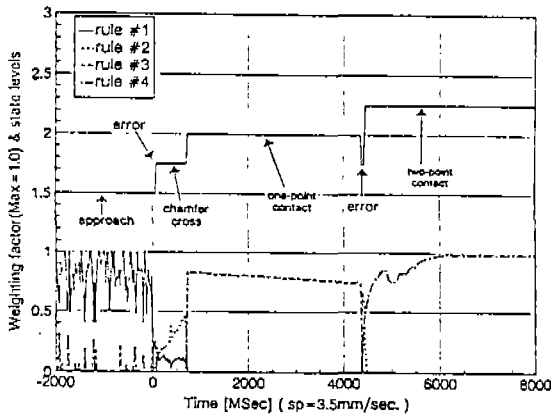
즉, 계산된 적합도 Wi와 식(3)의 후건부를 사용하여 peg과 hole의 접촉상태를 식(8)과 같이 상태 표시값으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \text{If}(\text{Max}[Wi]) &= W1 \text{ then} \\ \text{PIH_status} &= \text{approach}(=1.5) \\ \text{If}(\text{Max}[Wi]) &= W2 \text{ then} \\ \text{PIH_status} &= \text{chamfer_cross}(=1.75) \\ \text{If}(\text{Max}[Wi]) &= W3 \text{ then} \\ \text{PIH_status} &= \text{one_point_contact}(=2.0) \\ \text{If}(\text{Max}[Wi]) &= W4 \text{ then} \\ \text{PIH_status} &= \text{two_point_contact}(=2.25) \end{aligned} \quad (8)$$

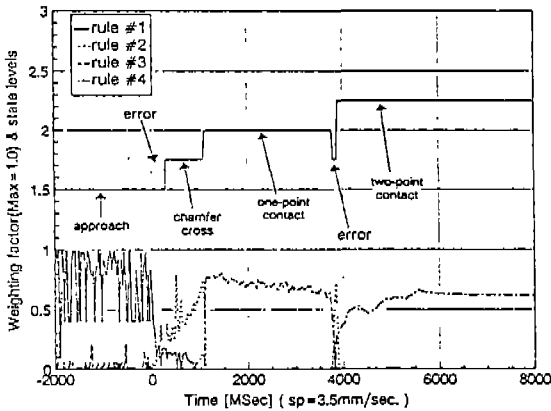
그림 10의 a)-c)는 퍼지 소속함수를 정할 때 기준을 삼았던 각 삽입 실험조건(횡방향 편차 Hx=2.0, 3.0, 5.0mm)에 대하여 계산된 Wi와 식(8)의 상태 표시값을 보여주고 있다. 표 1은 그림 9의 판별실험 결과를 정리한 것으로 샘플링주기 25msec로 약 400개의 입력신호를 기준으로한 판별의 결과를 정리한 것이다. 접근상태와 1점 접촉에서는 오차없이 완벽한 판별이 가능했으며 나머지의 경우도 횡방향 편차의 크기에 무관하게 96%

Table 1 Experimental result of identification

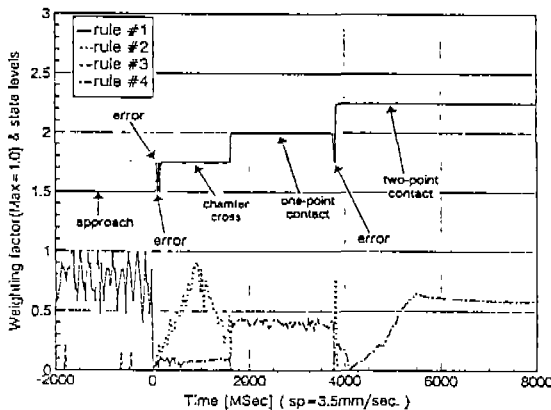
횡방향편차 접촉상태 실험결과	Hx=2.0mm				Hx=3.0mm				Hx=5.0mm			
	app	cmf	opc	tpc	app	cmf	opc	tpc	app	cmf	opc	tpc
sample수	80	27	182	111	80	43	108	169	80	64	85	171
error수	0	2	0	3	0	9	0	4	0	4	0	2
판별율(%)	100	92.6	100	97.3	0	79.1	100	97.6	100	93.8	100	97.9
총판별율(%)	395/400 (98.8%)				387/400 (96.8%)				394/400 (98.5%)			



a) Hx = 2.0mm



b) Hx = 3.0mm



c) Hx = 5.0mm

Fig.10 Results of identification experiment

이상의 높은 성공률을 보여 주었다.

캠퍼접촉과 2점 접촉 판별상의 오차는 이들 두 상태의 입력값이 3가지 횡방향 편차량에 따라 변화하는 폭이 크기 때문에 이를 종합하여 하나의 퍼지 소속함수 (membership function)를 정의하는 데에는 약간의 무리가 있음을 의미하고 있다.

특히 캠퍼 접촉상태는 횡방향 편차의 크기나 RCC의 특성에 따라 신호 출력이 크게 변하게되므로 실험조건에 따라 퍼지 소속함수의 형태를 적절히 변경시킬 필요가 있다. 본 실험에서 나타난 캠퍼 접촉시의 판별 오차의 경우 최대 적합도가 매우 작게 나타나므로 출력값을 적당히 cut-off 함으로서 판별율을 높일 수 있고, 2점 접촉시의 판별오차는 그림 8의 입력 파라미터 $|Mxy/Fxy|$ 에 근거하여 설정한 퍼지 소속함수(그림 9-c)의 Low 집합의 정의가 2점 접촉을 포함하기에 부적절했기 때문으로 보여지므로 2점 접촉의 판별 규칙에서 이 파라미터를 제외할 필요가 있다. 그러나 전반적으로 상당히 높은 판별 성공율을 보여주었고 처음 예상했던대로 천이상태(transition state) 보다는 정적인 상태(static state)에서의 접촉상태 판별율이 안정되게 높게 나타남을 알 수 있었다.

9. 결 론

Peg과 hole간의 접촉상태를 판별하기 위해 jamming diagram상의 좌표값을 모두 절대값으로 변환하여 판별 기준을 단순화 하고 횡축값 $|Fxy/Fz|$ 과 기울기값 $|Mxy/Fxy|$, 그리고 삼입력 $|Fz|$ 을 판별 파라미터로 하여 여러 횡방향 편차에 대한 삼입실험을 행하여 이에 따른 퍼지 소속함수를 정의하고 퍼지 추론방법에 의하여 각 판별 규칙에의 적합도를 구함으로써 주어진 입력값으로부터 접촉상태를 판별하는 일련의 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 절대 jamming도의 $|Fxy/Fz|$ 값은 실험조건에 관계 없이 1점 접촉의 상태를 정확하게 판별할 수 있는 유용한 파라미터이다.
- 2) 기울기값 $|Mxy/Fxy|$ 은 동적인 파라미터로서 캠퍼 접촉상태에서는 안정된 결과를 보이나 2점 접촉상태의 판별에는 부적절할 수 있다.
- 3) 2점 접촉상태의 판별에는 삼입력 $|Fz|$ 만을 독립적으로 적용하는 편이 더 좋은 결과가 기대된다.

- 4) 실험결과 본 판별방법은 천이상태(transition state) 보다는 정적접촉상태(static contact state)에서 더욱 정확하고 안정된 성공율을 나타내었다.
- 5) 대체로 본 연구에서의 접촉상태 판별은 부분적인 퍼지 소속함수의 부적절한 정의에도 불구하고 모든 입력에 대해 접근상태와 1점 접촉상태에서는 100%의 성공율을 보였고 뾰뾰접촉과 2점 접촉상태에 대하여도 80% 이상의 판별이 가능했으며 전체적으로 96% 이상의 판별이 가능했다.

향후의 연구로서 뾰뾰의 특성을 고려한 판별 알고리즘과 대상작업 모델에 적합한 퍼지 소속함수를 구성하기 위한 입력신호의 충실한 해석등이 수반된다면 좀더 완벽한 접촉상태 판별이 가능할 것이다.

참고문헌

1. 과학기술처, "조립자동화 시스템(I), (II)", 특정 연구보고서, No. UCN305-1425, 1991.
2. Daniel E. Whitney, "Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control", Int. Jour. of Robotics Reserach, Vol. 6, No. 1, pp.3~14, 1987.
3. S. N. Gottschlich and A. C. Kak, "A Dynamic Approach to High Precision Parts Mating", IEEE Proceed. of Robotics and Automation, pp.1246~1253, 1988.
4. Daniel E. Whitney, "Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts", Trans. ASME J. of Dyn. Sys. Meas. Control, Vol. 104, No. 1, pp.65~77, 1982.
5. T. Goto, K. Takeyasu, T. Inoyama, "Control Algorithm for Precision Insert Operation Robots", IEEE Trans. Syst. Man. Cybern., No. 19, pp.797~810, 1981.
6. 原 敬, 横川降一, "言語的記述とファジイパターンマッチングを用いた接觸状態遷移の認識", 日本計測自動制御學會論文集, Vol. 26, No. 11, pp.1299~1304, 1990.
7. 甚木哲夫, 湖田壽夫, 高木友博, "ファジイ理論", 日本ロボット學會誌, Vol. 9, No. 2, pp.238~255, 1991.
8. 石川正俊, "センサフュージョンの課題", 日本ロボット學會誌, Vol. 8, No. 6, pp.735~742, 1990.
9. 菅野道夫, "ファジイ制御", 日刊工業新聞社, 1988.
10. 水本雅晴, "ファジイ理論とその應用", サイエンス社, 1989.