

다중센서를 사용한 챔퍼가 없는 부품의 능동적인 삽입작업

친훈중* 김갑일* 김대원** 손유석*
명지 대학교 * 전기공학과, ** 제어계측공학과

Active Peg-in-hole of Chamferless Parts Using Multi-sensors

Hun-Jong Jeon* Kab-Il Kim* Dae-Won Kim** Yu-Seck Son*

* Dept. of Electrical Eng., Myong Ji University

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

Abstracts

Chamferless peg-in-hole process of the cylindrical type parts using force/torque sensor and vision sensor is analyzed and simulated in this paper. Peg-in-hole process is classified to the normal mode (only position error) and tilted mode (position and orientation error). The tilted mode is sub-classified to the small and the big tilted mode according to the relative orientation error.

Since the big tilted mode happened very rare, most papers dealt with only the normal or the small tilted mode. But the most errors of the peg-in-hole process happened in the big tilted mode. This problem is analyzed and simulated in this paper using the force/torque sensor and vision sensor.

In the normal mode, fuzzy logic is introduced to combine the data of the force/torque sensor and vision sensor. Also the whole processing algorithms and simulations are presented

다 정밀한 삽입작업에서 더 나은 결과를 보여 주었다[8]. Vaaler과 Seering[7]은 학습 알고리즘을 이용한 자동 조립 절차를 보여 주고 있다.

Caine등[8]은 2차원 및 3차원에서의 조립 작업에 관한 해석을 수행하였다. 2차원 해석에서는 경사모드에서의 해석을 방향오차가 크지 않은 경우와 방향오차가 큰 경우의 2 가지로 나누어서 수행하였다. 그러나 이러한 2 가지 경우에 대한 역학적 해석만 하고 실행을 위한 알고리즘은 제시하지 않았다. 이 논문의 의의는 경사모드에서 방향오차가 큰 경우와 그렇지 않은 경우를 구분한 점이다. 물론 방향오차가 큰 경우가 나타나면 인도는 적지만 대부분의 삽입작업의 오차는 방향오차가 큰 경우에 나타날 확률이 높다. 다시 말해서 실제의 그리퍼와 펌 사이에는 약간의 응력(compliance)이 존재하여 경사모드에서 방향오차가 크지 않을 때에는 거의 대부분이 응력(compliance)에 의해서 삽입작업이 성공적으로 수행되어 진다.

I. 서 론

로봇을 이용하여 삽입(peg-in-hole)작업을 수행하는 과제에 대해서는 역학적 해석과 많은 알고리즘이 제시되어 왔다. 그러나, 로봇을 이용하는 작업은 주로 반복되는 단순 작업이 대부분이기 때문에 아무리 정밀한 서보모터를 사용하고 정확하게 위치 제어를 하며 또 초기 보정(calibration)이 잘 되어 있다 하더라도 반복적인 작업을 수행하다 보면 오차(error)의 누적에 의한 오동작을 하게 된다. 더구나 상대적으로 그치지 정밀하지 못한 보통의 산업용 로봇을 사용할 경우에는 아무리 역학적 해석이 잘되어 있더라도 오차에 의한 오동작이 발생하게 된다. 이러한 경우에 오동작을 없애기 위해서는

RCC(Remote Center Compliance)나 부품에 챔퍼를 두어서 해결하는 수동적인 방법[1]과 여러 가지 형태의 센서를 사용하여 해결하는 능동적인 방법이 있다[2]. 그러나 수동적인 방법은 오차의 범위가 어느 정도 이상이 될 때에는 거의 효과가 없으며 과거의 능동적인 방법은 아주 한정된 작업에서의 결과만 제시되어 있다. 최근에 와서는 힘/토크 센서나 시각 센서 그리고 접촉 센서와 같은 여러 가지 센서가 상당히 발달하여 직접 로봇에 부착 혹은 설치하여 센서 데이터를 귀환(feedback)하여 로봇의 동작에 영향을 주는 지능 로봇 시스템(intelligent robot system - IRS)이 발달함에 따라 과거에는 생각하지 못한 능동적이고 지능적인 로봇 시스템을 가지고 삽입작업과 같은 조립(assembly)작업에 뿐만 아니라 전반적인 생산 시스템의 자동화에 큰 진전을 보고 있다.

최근에 와서 조립 작업에 다중-센서를 이용한 IRS에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 Abidi와 Gonzalez[3]은 우주에서의 액체 및 모듈의 교환 작업에 IRS를 이용한 예를 보이고 있다. 그러나 그들의 작업은 대부분 시각 센서를 이용한 데이터를 주로 사용하고 힘/토크 센서들은 보조적인 역할만 하고 있다[3]. Tao, Luh, 그리고 Zheng등[4]은 IRS 시스템을 두대의 로봇 시스템으로 확장시켜서 나사 조립 작업을 수행한 예를 보여 준다. 이 시스템은 단지 힘/토크 센서만을 사용해서 나사 조립의 가능성을 보여 주고 있다.

한편, 퍼지논리(fuzzy logic)를 이용하거나 학습 알고리즘을 이용한 IRS에서의 조립 작업에 관한 연구도 활발하다. Hara등[5]은 SCARA형 로봇을 사용한 평상모드(편과 홀 사이의 기울어짐이 없는 경우-normal mode)에서의 삽입작업을 다루고 있다. 그러나 실제로 SCARA형 로봇으로 작업을 행하면 위에서 언급한 바와 같은 이유로 경사모드(편과 홀 사이의 기울어짐이 있는 경우-tilted mode)가 나타나게 된다. Gurocak등[6]은 퍼지논리를 사용하여 방향오차를 확인하고 수정하였다. 또한, 실험 결과 퍼지논리를 사용하였을 때 그렇지 않은 경우 보

대부분의 경우에 [8]에서 분류된 경사모드의 방향오차가 큰 경우에 대한 실행은 잘못된 삽입으로 간주하여 다시 처음으로 돌아가서 삽입작업을 수행하는 비효율적인 알고리즘을 제시하고 있다[9]. 따라서, 본 논문에서는 방향오차가 큰 경우에도 방향오차가 작은 경우와 마찬가지로 위치 및 방향을 수정하여 계속 작업하여 삽입할 수 있는 알고리즘을 제시하고 시뮬레이션을 통해 그 효용성을 입증해 보이고자 한다. 또한, 펌이 홀 근처까지 접근하는 경우 즉, 접촉이 이루어지기 전까지는 시각 및 힘/토크 센서를 이용하여 퍼지추론에 의한 작업을 제시하여 [10] 삽입작업을 위한 하나의 전체적인 알고리즘을 제시하고자 한다.

II. 삽입작업

1. 시스템 설정

일반적으로 삽입작업에 이용되는 센서로는 시각 센서와 힘/토크 센서를 들 수 있다. 시각 센서는 주로 로봇의 거친 운동 제어에 적합한 반면, 힘/토크 센서는 미세운동 제어에 적합한 특징을 지니고 있다. 이 경우 두가지 센서의 특징을 고려하여 적당한 방식을 통해 결합시켜 준다면 단일센서를 사용하는 경우 보다 효율적인 작업을 수행할 수 있다. 본 논문에서는 평상모드에서 펌을 홀의 위치로 옮길 때 힘/토크 센서 및 시각 센서를 동시에 사용하여 최적의 이동 및 오류의 최소화를 위한 퍼지 추론을 적용한다. 그리고 홀의 수평면에 대해서 경사진 상태가 있는 삽입작업시 또는 오차로 인하여 펌과 홀이 수직을 이루지 못하는 경우에 대해 경사진 상태를 고려함으로써 삽입작업을 원활히 수행할 수 있도록 힘/토크 센서만을 이용하여 역학적 분석 결과와 이용한 알고리즘을 제안한다.

그러된 작업 시스템 중 시각 센서는 로봇의 마지막 링크에 부착하여 펌의 가려진 홀의 상을 CCD 카메라로 부터 입력으로 받아서 제어에 이용한다. 힘/토크 센서는 손목에 부착하여 힘과 모멘트 정보를 얻는다. 삽입작업에 이용된 펌과 홀은 각각 반지름 R_p, R_h 인 등근원뿔 모양을 한 챔퍼가 없는 강체이다.

2. 평상모드인 경우

시각 센서나 힘/토크 센서를 단일하게 사용하는 경우에 각 센서의 정보 특성은 다음과 같다.

2-1. 시각 센서 정보의 특성

로봇이 지능 가지고 작업을 수행하기 위해서는 외부 환경을 이해하고 정보를 제어에 이용되는 대표적인 센서로서의 시각 센서는 물체의 인식, 특성추출등에 많이 이용되고 있으며, 삽입작업 과정에서 시각 센서로 얻어지는 영상은 펌에 가려진

홀의 영상 정보이며 시각 센서로 얻어지는 영상 입력은 문턱 값을 이용함에 의해 2진 영상으로 변환된다. 영상의 화소는 배경의 값을 0, 화상의 값을 1로 가지게 되며, 2차원 물체의 위치 정보를 표현하는 데는 물체에 면적의 중심을 이용하는 것이다. 면적의 중심좌표 (x, y)라 할 때 삼입작업에서 펙이 이동해야 할 방향을 결정할 수가 있다. 이때 단위 벡터 v (vx, vy) 를 이동 방향으로 정의한다.

$$v_x = \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \quad (1) \quad v_y = \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \quad (2)$$

이동 속도와 방향을 결정하기 위해서는 홀 영상의 면적 A에 따라 이 값이 크면 이동 속도를 크게하고, 이 값이 작으면 이동 속도를 작게 한다.

2.2. 힘/토크 센서 정보의 특성

모멘트 방향은 <그림1>과 같이 Mx, My로 나타냈으며, 크기는 각도 α에 따라 달라진다. 또한, 모멘트를 측정하여 펙이 진행해야 할 방향을 찾아내며, 초기 오차 크기 l이 지면에 수직인 방향의 힘을 F라고 할 경우 모멘트 M = (r - l) * F로 되고, 누르는 힘 F가 일정할 때 모멘트는 거리 r에 비례하게 되므로 펙이 홀의 근접해 감에 따라 모멘트는 증가하게 된다. 모멘트 M(Mx, My)에 의한 로봇의 이동 방향 단위 벡터 m (mx, my)는 다음과 같다.

$$m_x = \frac{M_y}{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}} \quad (3) \quad m_y = \frac{-M_x}{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}} \quad (4)$$

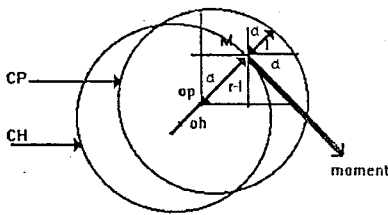


그림 1. 평상모드의 접촉 그림

3. 경사모드인 경우

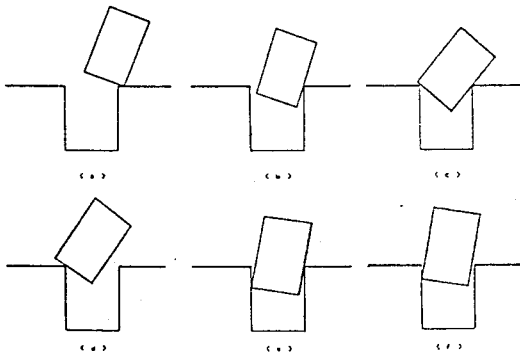


그림 2. 경사모드의 가능한 위치

펙과 홀의 상대적인 위치에 따라 가능한 위치는 <그림2>와 같은 6가지 경우와 펙이 반대 방향으로 기울어진 6가지 경우를 합하여 12가지 경우가 있으며 점 접촉(point contact)을 고려한다면 <그림2>에서의 6가지 경우로 고려할 수 있다.

모든 경우에 대해서 로봇은 Z 방향으로 힘을 가하고 홀에 대해서 펙은 기울어진다. 한편 <그림2>의 (b)와 (f)의 경우에는 삼입의 깊이를 측정하고 Z방향의 일정한 힘(Fcosa)만큼 가하면 두점 접촉이 발생하고, <그림2>의 (d)의 경우에는 미끄러짐에 의한 힘이 생기지 않으므로 fz 방향으로의 힘만이 작용한다. 한편 <그림2>의 (a)의 경우에는 -fy 방향으로의 미끄러지는 힘에 의해서 두점 접촉이 발생하므로 <그림2>의 (c)와 (e)의 경우에 대해 가해진 힘과 반발력 그리고 모멘트의 관계를 알아보면 된다.

3.1. 정적평형 상태에서의 역학적 분석

3.1.1 방향오차가 작은 경우

적용된 힘은 펙의 축에 관하여 각 α에서 펙의 선단(top)에 적용된 벡터 F로서 표현되며, 적용된 모멘트 M은 <그림3>에서 보여준다.

<그림2>의 (e)의 정적평형(static equilibrium)의 힘과 모멘트 균형 방정식은 다음과 같다.

$$\sum F_y = F \sin \alpha + f_1 \cos \theta - \mu f_1 \sin \theta - f_2 = 0 \quad (5)$$

$$\sum F_z = F \cos \alpha - f_1 \sin \theta - \mu f_1 \cos \theta - \mu f_2 = 0 \quad (6)$$

$$\sum M_0 = M + \mu f_2 d + f_2 l - F(d/2) \cos \alpha - FL \sin \alpha = 0 \quad (7)$$

그리고

$$l = (D - d \cos \theta) / \sin \theta \quad (8)$$

이므로

$$f_1 = F \frac{(\cos \alpha - \mu \sin \alpha)}{(1 - \mu^2) \sin \theta + 2\mu \cos \theta} \quad (9)$$

$$f_2 = F \frac{\sin \alpha (\sin \theta + \mu \cos \theta) + \cos \alpha (\cos \theta - \mu \sin \theta)}{1 + \mu} \quad (10)$$

운동이 항상 두점 접촉이 되어 있는 상황에서 f1과 f2가 0보다 크게 되므로 <그림3>의 경우에 α의 범위는 다음과 같다.

$$f_1 \geq 0 \quad \tan \alpha \leq l/\mu \quad \alpha \leq \tan^{-1}(l/\mu) \quad (11)$$

$$f_2 \geq 0 \quad \alpha \geq \tan^{-1} \frac{\mu \sin \theta - \cos \theta}{\mu \cos \theta + \sin \theta} \quad (12)$$

그러므로

$$\tan^{-1} \frac{\mu \sin \theta - \cos \theta}{\mu \cos \theta + \sin \theta} \leq \alpha \leq \tan^{-1}(l/\mu) \quad (13)$$

그리고 발생 할 수 있는 θ의 범위는 <그림4>의 경우와 같이

①번은 d = D cos θ

②번은 d < D cos θ 이므로

d/D ≤ cos θ 즉 θ ≥ cos⁻¹(d/D)의 조건을 만족해야 한다. 위의 방정식은 펙의 준정적(quasi-static) 평형의 조건을 가정한다.

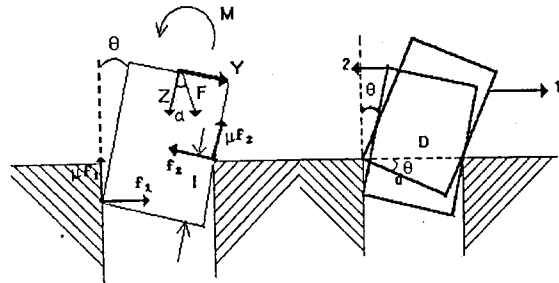


그림 3. 형태(e)의 힘과 모멘트 그림 4. 형태(e)의 θ의 범위

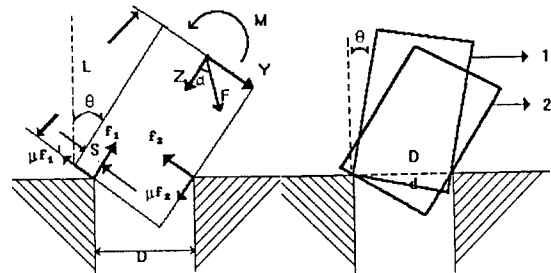


그림 5. 형태(c)의 힘과 모멘트 그림 6. 형태(c)의 θ의 범위

3.1.2. 방향오차가 큰 경우

<그림5>의 정적 평형의 힘과 모멘트 균형 방정식은 다음과 같다.

$$\sum F_y = F \sin \alpha - \mu f_1 - f_2 = 0 \quad (14)$$

$$\sum F_z = F \cos \alpha - f_1 + \mu f_2 = 0 \quad (15)$$

$$\sum M_0 = M - \mu f_1 L - f_1(d/2 - S) - \mu f_2(d/2) - f_2(L-1) = 0 \quad (16)$$

$$S = d - D \cos \theta \quad (17) \quad l = D \sin \theta \quad (18)$$

(14)식과 (15)식을 풀면

$$f_1 = F \frac{(\cos \alpha + \mu \sin \alpha)}{1 + \mu^2} \quad (19)$$

$$f_2 = F \frac{\sin \alpha - \mu \cos \alpha}{1 + \mu^2} \quad (20)$$

운동이 항상 두점 접촉이 되어 있는 상황에서 f1과 f2가 0보다 크게 되므로, <그림5>의 경우에 α의 범위는 다음과 같다.

$$f_1 \geq 0 \quad \tan \alpha \geq -1/\mu \quad \alpha \geq \tan^{-1}(-1/\mu) \quad (21)$$

$$f_2 \geq 0 \quad \tan \alpha \geq \mu \quad \alpha \geq \tan^{-1}(\mu) \quad (22)$$

그리고 발생 할 수 있는 0의 범위는 <그림6>의 경우와 같이

- ①반은 $d = D \cos \theta$
- ②반은 $d/D \geq \cos \theta$ 즉 $\theta \leq \cos^{-1}(d/D)$ 의 조건을 만족해야 한다.

위의 방정식은 펙의 준정적 평형의 조건을 가진다.

3.2. 방향오차 수정

시각 센서와 힘/토크 센서를 사용하여 결한한 퍼지추론에 의한 평상모드에서의 삼입이 이루어진 후에 로봇의 추적에 의한 오동작이나, 펙이 수직으로 이루어지지 못한 상황에서 삼입이 이루어질 때 <그림6>와 같은 상황이 발생한다. 이 경우에는 평상모드 동작과 같이 삼입이 이루어질 수 있도록 수정 동작을 어떻게 하느냐가 문제이다.

이 경우에는 전체 모멘트(M)값을 구함으로써 그 방향으로 기울여 주면 된다. 예를 들어 <그림7>의 경우

-fz 방향으로 $d \sin \theta$ 만큼,

-fy 방향으로 $d \cos \theta$

그리고 피치 (pitch)는 θ 만큼 이동해 주면 된다.

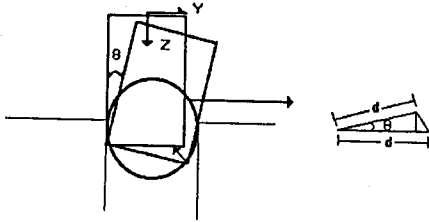


그림 7. 오차 수정

III. 삼입 알고리즘

1. 평상모드에서의 퍼지 추론에 의한 삼입작업

인간에 경험적 지식을 제어기 규칙으로한 퍼지 추론을 이용하여 시각 센서에서 힘/토크 센서로 전이시키는 방식을 생각해 하여 삼입을 시도한다. 삼입 작업에서 적용할 수 있는 인간의 경험적 사실로는 다음과 같은 것들 중 하나이다[10].

- (1) 초기에는 시각 정보에 주로 의존한다.
- (2) 작업이 진행됨에 따라 시각 정보의 효용성과 정확도가 점차 감소하고 힘/토크 센서의 영향이 증가한다.
- (3) 작업 후반기에는 주로 힘/토크 정보에 의존한다.
- (4) 초기에는 펙의 이동량을 크게 하고 작업이 진행됨에 따라 이동량을 감소시킨다.

위와 같은 경험적 제어 규칙을 이용하여 규칙 베이스를 구성한다.

Moment [M]

Vision area [A]	V0	V1	V2	V3	V4	V5	V6
V0						S1	S0
V1					S2	S1	S0
V2				S3	S2	S1	
V3			S4	S3	S2		
V4		S5	S4	S3			
V5	S6	S5	S4				
V6	S5	S5					

그림 8. 규칙 베이스의 구성

여기서 퍼지 제어기의 입력은 시각 정보를 이용하여 계산된 펙 영역의 면적을 A라 정의하며, 힘/토크 센서 정보를 이용하여 얻어진 모멘트의 크기를 M이라 정의한다. 또한, 퍼지 제어기의 출력 변수는 y로 정의한다. 그리고 규칙 베이스의 입력은 퍼지화된 센서의 측정값으로써 각각의 규칙은 다음과 같은 형태를 가지게 된다.

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. 그리고 각각의 입출력 변수에 대해 V0-V6의 7단계의 언어적 값을 정의한다. 이와 같은 언어적 값을 사용하여 삼입에 필요한 제어 규칙을 작성하는 것은 인간의 경험에 의존하게 되는데 이 제어 규칙을 <그림8>에 나타낸다. <그림8>에서 가로축은 힘/토크 정보(M)를 나타내며 세로축은 시각 정보(A)를 나타낸다. 그리고, 본 논문에서는 <그림9>와 같은 멤버십 함수를 사용한다. 입출력 변수는 n0-n32까지의 33개의

값으로 양자화 한 것이 <그림9>에 나타난다.

추론방법은 여러 가지가 있으나 여기서는 Mamdani가 제안한 MAX-MIN 추론방법을 사용하기로 한다. 이는 사용이 간단하고 계산 량도 적어서 가장 많이 사용되는 추론방법의 하나이다. 이것도 여러 가지 방법이 있으나 여기서는 일반적으로 가장 많이 사용되는 방법인 무게중심법을 사용하게 된다.

퍼지제어를 통해 출력되는 값은 <그림9>을 통해 알 수 있는 바와 같이 0에서 1까지의 값을 전체집합으로 하는 퍼지집합이면 출력 y는 다음 2가지로 이용된다.

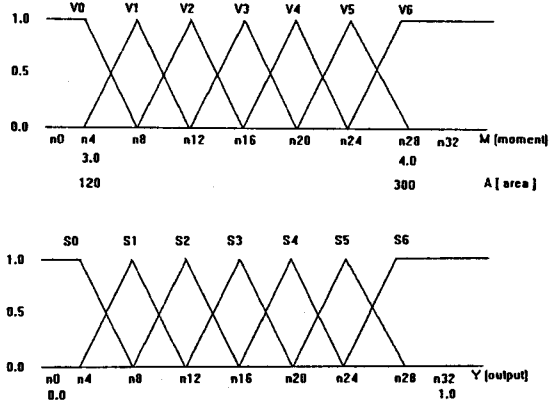


그림 9. 입출력 변수의 멤버십함수

로봇의 이동속력 V는 다음과 같이 결정된다. 여기서, VF는 비례상수임.

$$V = y * VF \quad (23)$$

또한, 로봇의 이동방향 d는 다음과 같다.

$$d = y * v + (1-y) * m \quad (24)$$

여기서, v, m은 각각 시각과 힘/토크 센서 정보에 의해 얻어진 방향벡터이다.

2. 경사모드에서의 삼입 알고리즘

우선 홀의 외부에서 접촉이 일어나는 경우와 내부에서 접촉이 일어나는 경우를 구별한다. 구별하는 방법은 시각 센서를 사용하여 펙에 가려진 홀의 영상 정보를 통하여 펙이 홀의 내부에 있는나 혹은 외부에 있는나를 평가하여 홀의 외부인 <그림2> (a)의 경우는 위치오차만 있다고 생각하고 수정 동작을 수행한다. 그 결과 홀 내부에서 접촉이 생기는 경우로 천이하게 된다.

<그림2> (b), (f)는 홀 내부에서 발생하는 경우로 규정량 이상의 센서의 Fz방향의 힘(Fcos α)이 감지될 때까지 계속적인 삼입을 통해서 두점 접촉, 즉 <그림2> (e)에 경우로 천이될 수 있다. 그리고 <그림2> (e)에 회전을 통해서 <그림2> (f)에 경우와 같은 한점 접촉이 발생, 이 과정을 반복함으로써 최종적인 삼입이 이루어지며, <그림2> (e)에 경우에 Fz방향의 힘은 다음과 같다.

식(6)으로부터

$$F_{cos \alpha} = f_1 \sin \theta + \mu f_1 \cos \theta + \mu f_2 \quad (25)$$

이다.

<그림2> (d)의 형태와 또다른 <그림2> (b)의 형태의 경우에는 규정량 이상의 센서의 Fz방향의 힘(Fcos α)이 감지될 때까지 계속적인 삼입을 통해 두점 접촉, 즉 <그림2> (c)의 경우가 발생한다. 여기서 <그림2> (c)의 경우에 Fz방향의 힘은 식(15)로부터

$$F_{cos \alpha} = f_1 - \mu f_2 \quad (26)$$

가 된다.

<그림2> (c)의 형태의 경우에는 방향과 위치 수정을 통해 삼입이 이루어지고 이 경우에는 <그림2> (e)의 경우와 같은 상황이 발생할 수 있다. 여기서 식(25), (26)는 각각 경사모드에서 센서로 감지되는 힘이다.

3. 전체적인 삼입 알고리즘

이상에서 설명한 알고리즘을 종합하면 <그림10>과 같다.

IV. 시뮬레이션 및 결과 검토

1. 시뮬레이션 조건 및 방법

시뮬레이션에 사용한 홀의 직경은 55픽셀, 펙의 직경은 52픽셀이고 클리어런스는 3픽셀이다. 또한, 펙과 홀사이의 마찰 계수는 0.28 정도로 두었으며, 시뮬레이션 방법은 위치오차의 크기는 시각과 힘/토크 센서에 의한 퍼지추론에 의하여 방향과 속도를 결정하여 평상모드처럼 동작 하고, 또한 비전을 통해 펙에 가려진 홀의 영상을 알고리즘상에서 체크하므로 위치 오차는 거의 발생하지 않는다. 위치오차가 발생할 경우에도

홀 가까이에서 발생하므로 홀의 방향으로 미끄러짐에 의한 삽입으로 개선되어지며, 방향오차의 크기가 큰 경우와 작은 경우를 임의로 시뮬레이션상에서 주었고, 각 과정에 대하여 삽입작업의 성공되는지 여부를 보았다.

2. 시뮬레이션의 결과 및 분석

시각에 의한 면적 정보(A)와 힘/토크 센서에 의한 모멘트 정보(M)에 변화에 의한 순차적 이용 방식(시각 정보로 적당한

위치까지 이동후 힘/토크 정보에 의한 미세 제어를 하는 방식)을 위한 피지추론에 의하여 팩이 홀에 근접한 것으로 생각한다.

팩이 홀에 근접했을 때 방향오차가 큰 경우와 작은 경우를 구별하여 삽입 알고리즘에 의해 삽입한다. 그리고, 방향오차가 큰 경우와 작은 경우에 대해서 구별하는 방법은 <그림2>의 (c)와(e)의 경우에서 $S = d - D \cos \theta$ 로 알 수 있다. 즉

$$d - D \cos \theta > 0 \quad ; s > 0 \Rightarrow \text{형태 (C)} \quad (27)$$

$$d - D \cos \theta \leq 0 \quad ; s \leq 0 \Rightarrow \text{형태 (e)} \quad (28)$$

를 통해서 구별할 수 있다.

각 경우에 구별된 방법에 의하여 삽입 알고리즘에 의한 삽입하는 과정들을 <그림11,12>에서 보여주고 있다. 식(27), (28)에 의하여 방향오차의 크기를 구별하는 방법에 의해서 $\cos^{-1}(52/55) = 19.011$ 도이므로 방향오차가 작은 경우의 한계는 19도이다. 시뮬레이션의 결과는 <그림11>에서 볼 수 있다. <그림11>의 (a)에서는 초기 19도 일 경우 위치오차와 방향오차가 동시에 존재하는 경우이므로 (b)에서 처럼 진행 방향으로 미끄러짐에 의해 두점 접촉이 발생하게 된다. (c), (d), (e)에서는 방향오차 수정후 점 접촉과 두점 접촉을 반복하면서 계속 삽입을 시도한다. 마지막으로 (f)에서는 삽입이 이루어지는 것을 볼 수 있다. 그리고 방향오차가 큰 경우에 대하여서는 <그림12>에서 처럼 45도의 경우에 대해서 삽입 여부를 시뮬레이션 해 보았으며, 각각의 경우에 위치오차와 방향오차를 수정하며 삽입하는 것을 볼 수 있다.

V. 결론

지금까지 첩퍼가 없는 삽입작업의 전체적인 알고리즘을 제시하고 486PC에서 시뮬레이션 해 보았다. 삽입작업은 정상모드와 경사모드로 나누었으며 각각에 대한 역학적 분석과 센서를 사용한 보정작업을 제시하였다.

정상모드에서는 시각 및 힘/토크 센서를 사용한 피지추론에 의해서 최대한 오동작의 가능성을 줄였으며 경사모드에서는 주로 힘/토크 센서에 의한 방향오차의 수정에 역점을 두었다.

제시된 알고리즘을 과거에는 수행이 불가능했던 경사모드에서 방향오차가 큰 경우에 대한 해석을 하고 있다.

앞으로 연구 과제는 본 시뮬레이션에 대한 실험을 행하는 작업으로 본 연구실의 시스템을 구축하는 대로 수행하고자 한다.

참고문헌

- [1] D.E. Whitney, "Quasi-static assembly of compliantly supported rigid parts", Trans. ASME Dynamic Systems Measurement Control, vol.104, pp.65-77, 1982.
- [2] T.Goto, K.Takeyasu and T.Inoyama, "Control algorithm for precision insert operation robots", IEEE Trans. System Man and Cybernet. 10, pp.19-25, 1980.
- [3] M.A.Abidi and R.C.Gonzalez, "The use of multi-sensor data for robotic applications", IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 6, No 2, pp.159-177, April 1990.
- [4] Tao, Jian M., J.Y.S.Luh and Y.F.Zheng, "Compliant Coordination Control of two Moving Industrial Robots", IEEE Trans. Robotics and Automation, vol 6, June 1990.
- [5] Kei hara and Ryuich yokogawa, "Application of fuzzy reasoning to precision inserting operation", IEEE Intl. conf. Fuzzy Sets and Systems 39, pp. 205-214, 1991.
- [6] 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, pp.915-922, 1992.
- [7] Erik G.Vaaler and 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.
- [8] Michael E.Caine, Tomas Lozano-Perez and Warren P.Seering, "Assembly strategies for chamferless parts", IEEE Int.conf. on Robotics and Automation, pp.472-477, 1989.
- [9] 정영위, 김완우, 정명진, "6축 힘 감지기를 사용한 로봇의 첩퍼가 없는 부품의 대한 능동적인 조립작업", 전자공학회 논문지, 제 29 권, pp.11-19, 1992.
- [10] 이승호, 이범희, 김대원, 고명삼, "삽입작업에서 피지추론에 의한 비전 및 힘/토크 센서의 퓨전", 한국자동제어학회회 논문지, pp.780-785, 1992.

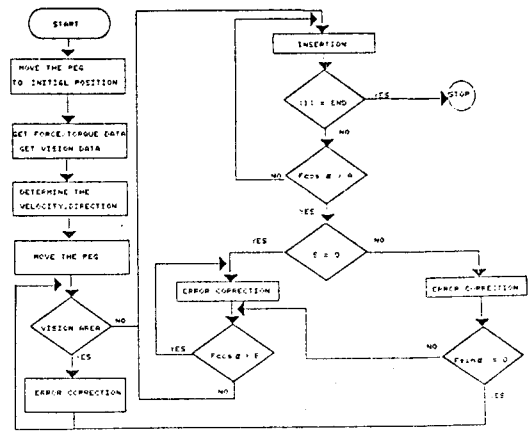


그림 10. 전체적 알고리즘 흐름도

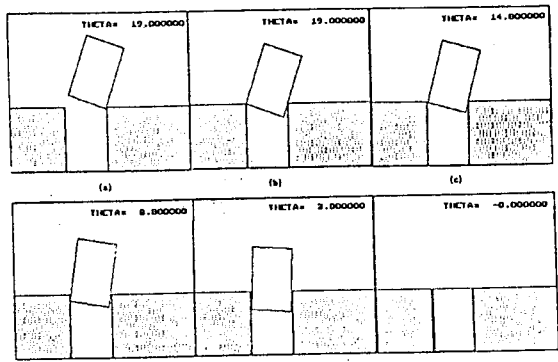


그림 11. 방향오차가 작은 경우(THETA = 19)

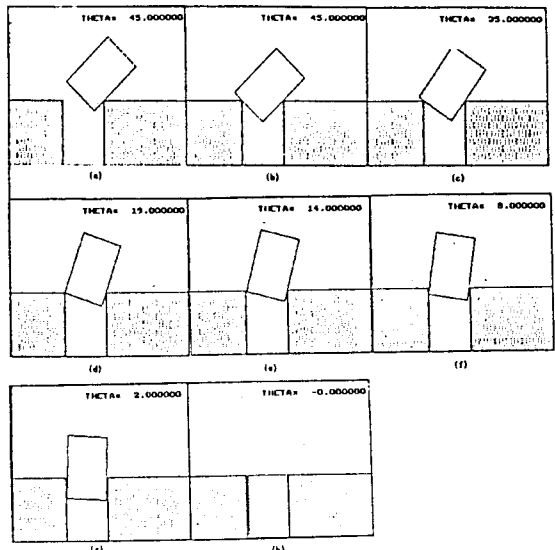


그림 12. 방향오차가 큰 경우(THETA = 45)