

힘/모멘트/비전센서를 사용한 챔퍼가 없는 부품의 삽입작업에 관한 연구

백승형, 임동진

한양대학교 제어계측공학과

A Study on the Peg-in-hole of chamferless parts using Force/Moment/Vision S

Seunghyop Back, Dongjin Lim

Dept. of Control & Instrumentation Engineering, Hanyang University

Abstract - This paper discusses the peg-in-hole task of chamferless parts using force/moment/vision sensors. The directional error occurring during the task are categorized into two cases according to the degree of initial errors. And different Mechanical analysis has been accomplished for each cases.

This paper proposes an algorithm which enables to reduce initial directional error using digital Images acquired from hand-eyed vision sensor, And to continue the task even with the large directional error by adjusting the error using digital image processing.

The effectiveness of the algorithm has been demonstrated through experimentation using 5-axis robot equipped with a developed controller, force/moment sensor and color digital camera on its hand.

1. 서 론

현대의 산업사회에서는 이미 인간의 많은 역할을 로봇이 대신하고 있다. 특히 로봇의 역할이 두드러지는 곳은 생산 공정의 자동화 부분인데 로봇을 이용한 삽입작업도 그 중 중요한 하나의 예가 될 수 있을 것이다. 로봇은 일반적으로 장시간 반복되는 작업을 많이 하기 때문에 아무리 정확하게 위치제어를 하더라도 로봇의 기구학적 인 특성에 따라서 작업 도중에 반복위치오차가 발생하게 되는데 이러한 삽입과정에서의 오차를 극복하기 위해 그동안 로봇의 삽입작업에 대한 많은 역학적 해석과 제어 알고리즘들이 제시되어 왔다.

Whitney는 chamfer가 있는 경우에 RCC를 사용한 시스템에서 역학적인 해석을 수행하였고, M. E. Caine은 2차원 및 3차원에서의 챔퍼가 없는 경우에 대하여 조립 작업에 관한 해석을 수행하였는데 경사모드에서의 해석을 방향오차가 작은 경우와 큰 경우의 2 가지로 나누어 각각에 대한 역학적인 해석을 하였고 허용위치를 제한하는 방법을 제안하였으나 실질적인 조립작업을 위한 제어 알고리즘은 제안하지 않았다. 또한, Tatsuo Goto는 3자유도를 지니는 주 로봇과 2자유도의 보조로봇을 사용한 'HI-T_HAND'라는 로봇 시스템을 제작하여 로봇의 손목에 유연성을 가지게 하고 X, Y, Z 3방향의 측정된 센 데이터를 기반으로 조립작업을 수행하였다. 이밖에 경사모드에 대해서 방향오차가 작은 경우와 큰 경우에 대해 역학적인 해석을 하였으나 시뮬레이션만을 통하여 연구를 수행하거나, 평상모드와 제한된 크기의 방향오차를 가진 경사모드에 대해서 6축의 힘 감지기만을 사용하여 실험을 행한 기존 연구결과도 발표되고 있다.

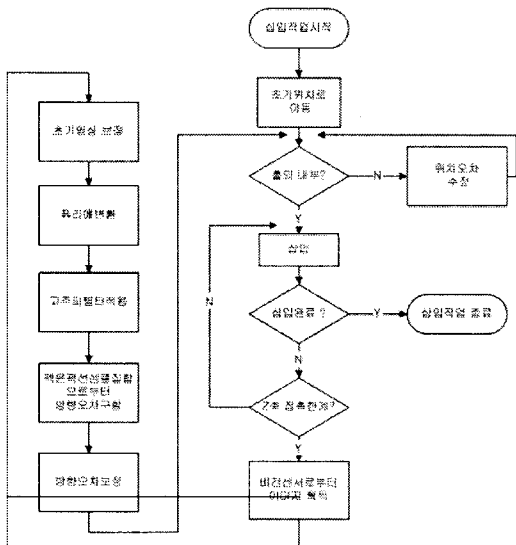
기존 연구에서는 대부분의 경우, 방향오차가 작은 경우에 대해서만 언급하였고 방향오차가 큰 경우에는 삽입이 잘못된 것으로 간주하여 다시 초기 상태로 복귀시켜

삽입작업을 시작하거나 혹은 서로 다른 별개의 역학적인 해석을 수행하는 비효율적인 알고리즘을 제안하였으나, 본 논문에서는 위에서 제안된 알고리즘을 바탕으로 6축의 힘/모멘트/비전 센서를 사용하여 챔퍼가 없는 부품의 삽입작업에서 방향오차가 큰 경우에는 방향오차가 작은 경우로 상태를 전이시켜 단일 역학적 해석을 통해 계속적으로 삽입작업을 수행할 수 있는 새로운 알고리즘을 제시한다. 이 과정에서 방향오차를 수정하기 위해 비전 센서를 통해 입력받은 디지털이미지를 이용하여 삽입을 위해 힘/모멘트 센서를 이용하게 될 것이다. 또한 실제의 로봇 시스템 적용함으로써 제안된 알고리즘의 효용성을 보이고자 한다.

2. 본 론

2.1 전체적인 삽입수행과정

삽입 작업 중 오차를 수정하여 삽입에 성공하기 위하여 다음과 같은 과정을 따른다.



[그림1] 삽입과정의 순서도

먼저 로봇이 초기위치로 이동하여 삽입을 시작한 후에 홀을 포함한 평면과 접촉하게 되면 내부접촉인지 외부접촉인지를 판단한다. 외부접촉인 경우는 방향오차의 존재 여부를 알 수 없으므로 위치오차만을 수정한 후 다시 삽입을 계속한다. 내부접촉이라고 판단된 경우는 계속해서 삽입을 하면 평상모드인 경우는 작업이 완료되고 경사모드인 경우는 록이 홀에 꼭 끼인 상태(jamming)가 된다.

Jamming이 된 경우에는 Z방향의 힘이 일정값 이상이 되므로 이를 이용하여 방향오차의 크기를 판별한다. 방향오차가 큰 경우에는 비전센서를 이용하여 디지털 이미지를 입력받아 영상보정과 퓨리에변환과 고주파필터를 이용하여 펙의 윤곽선을 추출하여 방향오차를 결정한 후 오차를 보정한 후 로봇의 이동방향을 결정하여 방향오차를 수정한 후에 다시 삽입을 계속한다.

2.2 정상모드와 경사모드

로봇의 삽입 작업 시에 오차로 인하여 발생할 수 있는 상황은 크게 2가지로 구분된다. 첫 번째로 정상모드(Normal mode)는 삽입되는 구멍(hole)의 윗면을 포함하고 있는 평면과 삽입하려는 부품(peg)이 수직을 이루고 있는 상태이며 이때에는 펙과 홀 사이에 위치오차만이 존재하게 된다. 두 번째는 홀을 포함하는 평면과 펙이 수직을 이루지 않은 상태이며 이때에는 펙과 홀 사이에 위치오차 뿐만 아니라 방향오차가 동시에 존재하게 되는데 이를 경사모드(Tilted mode)라 한다. 경사모드는 방향오차의 크기에 따라서 오차가 작은 경우와 큰 경우의 두 가지로 다시 구분할 수 있는데 실제로 로봇을 부품의 삽입작업에 이용하는 경우에는 방향오차가 큰 경우에서 로봇의 오동작이 발생할 가능성이 높다.

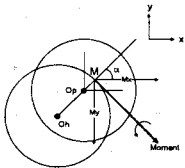
2.2.1 정상모드에서의 삽입과정

정상모드는 삽입되는 펙과 홀이 서로 수직을 이루고 있는 상태를 말하며 이 경우에는 펙과 홀 사이에 방향오차는 존재하지 않고 위치오차만이 존재하게 된다. 정상모드에서 펙과 홀이 접촉을 한 경우의 접촉위치에 따른 힘과 모멘트의 관계가 [그림 1]에 나타나 있다. 이때, 힘/모멘트 센서의 원점은 펙의 윗면을 중심으로 정하였다.

펙이 홀에 접촉하여 접근함에 따라 접촉점 M에 힘이 작용하게 되며 모멘트는 펙과 홀을 지나는 선에 직각(시계방향)으로 작용하게 된다. 이때 각각의 성분이 이루는 값들 사이의 관계는 [그림 1]에서와 같다. α 로 표시된 각도는 $0-\pi/2$ 사이의 양의 각이다. 펙의 반지름을 r 이라 하고 초기 위치 오차의 크기를 l 이라 하면 펙의 중심에서 접촉점까지의 길이는 $r-l$ 이 된다. 모멘트의 방향은 M_x, M_y 로 나타냈으며, 그 크기는 각도 α 에 따라 달라진다. 위치오차의 수정은 센서에서 감지되는 모멘트의 크기와 방향을 측정하여 펙이 진행해야 할 방향을 찾아내어 로봇을 이동한다. 홀을 포함하는 평면에 수직인 방향의 힘을 F 라고 할 경우 모멘트 $M=(r-l)*F$ 가 되고, 누르는 힘 F 가 일정할 때 모멘트는 거리 r 에 비례하게 되므로 펙이 홀에 근접해 감에 따라 모멘트는 증가하게 된다. 모멘트 $M(M_x, M_y)$ 에 의한 로봇의 이동 방향 단위 벡터 $m(m_x, m_y)$ 은 다음과 같이 식 (1)을 통해서 구할 수 있다.

$$m_x = \frac{M_y}{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}} \quad m_y = \frac{-M_x}{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}} \quad (1)$$

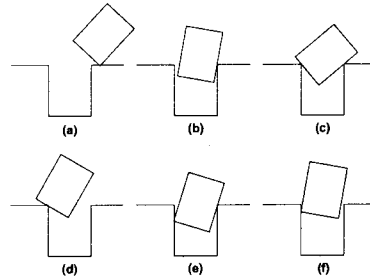
또한 [그림 1]과 같은 1사분면에서 뿐만 아니라 다른 사분면에서의 접촉도 위와 같은 방법으로 해석할 수 있으며 역시 같은 결과를 얻게 되고 실제로는 펙과 홀 사이에 약간의 클리어런스가 존재하게 되므로 정상모드에서의 삽입작업은 접촉방향에 관계없이 구해진 이동방향 벡터를 이용한 위치오차의 수정을 통해 성공적으로 이루어질 수 있다.



[그림2] 정상모드에서의 접촉

2.2.2 경사모드

경사모드는 삽입되는 펙과 홀이 서로 수직을 이루지 않은 상태를 말하며 이 경우에는 펙과 홀 사이에 방향오차와 위치오차 두 가지가 존재하게 된다.



[그림3] 경사모드에서의 접촉

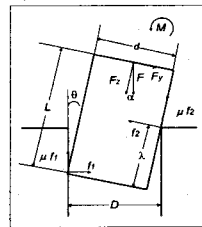
펙과 홀의 상대적인 위치에 따라 경사모드가 발생하는 경우는 [그림 2]에서와 같은 6가지의 경우와 펙이 반대 방향으로 기울어진 6가지의 경우를 합하여서 모두 12가지 경우가 있으며 점 접촉을 고려하면 [그림 2]에서의 6가지 경우로 고려할 수 있다. 이상의 6가지 경우를 접촉 상태에 따라 구분하면 다음과 같다.

- (a) (d) - 홀 외부에서의 한점 접촉
- (b) (f) - 홀 내부에서의 한점 접촉
- (e) - 홀 내부에서의 두 점 접촉
- (c) - 홀 외부에서의 두 점 접촉

모든 경우에 대해서 로봇은 항상 -Z방향으로 일정한 크기의 힘을 가하고 홀에 대해서 펙은 약간의 기울어짐이 생기게 된다. (b), (f)와 같이 홀 내부에서의 한점 접촉인 경우에는 펙이 홀에 삽입된 깊이를 측정하고 -Z방향의 일정한 힘을 가하면 두 점 접촉이 발생하여 (e)의 경우가 되고, (a), (d)와 같이 홀 외부에서의 한점 접촉인 경우에는 위치오차의 수정에 의해서 홀 외부에서의 두 점 접촉인 (c)혹은 (b), (f)의 경우로 전이가 가능하므로 방향오차가 작고 홀 내부에서의 두 점 접촉인 (e)와 방향오차가 크고 홀 외부에서의 두 점 접촉인 (c)에 대해서는 비전센서를 이용하여 방향오차를 결정하여 수정함으로써 (c)혹은 (b), (f)의 경우로 전이가 가능하다.

2.3 준정적(Quasi-static) 평형상태에서의 역학적 분석

앞에서 언급한 경사모드의 두 가지 경우 즉, 방향오차가 작은 경우인 (e)와 큰 경우인 (c)의 상태를 준 정적(quasi-static) 평형상태에 있다고 가정하고 아래와 같이 역학적인 분석을 수행하였다.



[그림4] 방향오차가 적은 경우의 힘과 모멘트

[그림 4]의 준 정적평형 상태에서 힘과 모멘트의 균형 방정식은 다음과 같이 주어진다. 펙에 가해지는 수평방향의 힘과 수직방향의 힘, 그리고 모멘트의 합은 0이므로

$$\sum F_y = F \sin \alpha + f_1 \cos \theta - \mu f_1 \sin \theta - f_2 = 0 \quad (2)$$

$$\sum F_x = F \cos \alpha - f_1 \sin \theta - \mu f_1 \cos \theta - \mu f_2 = 0 \quad (3)$$

$$\sum M_0 = M + \mu f_2 d + f_2 l - F \left(\frac{d}{2} \right) \cos \alpha - FL \sin \alpha = 0 \quad (4)$$

그리고 팩의 삽입된 깊이는 [그림 9]로부터 식 (5)과 같이 구해지며

$$l = \frac{(D-d \cos \theta)}{\sin \theta} \quad (5)$$

팩에 인가되는 반력 f_1 과 f_2 는 식 (2)-(4)로부터 아래와 같이 구해진다.

$$f_1 = F \frac{(\cos \alpha - \mu \sin \alpha)}{(1 - \mu^2) \sin \theta + 2\mu \cos \theta} \quad (6)$$

$$f_2 = F \frac{\sin \alpha (\sin \theta - \mu \cos \theta) + \cos \alpha (\cos \theta - \mu \sin \alpha)}{(1 - \mu^2) \sin \theta + 2\mu \cos \theta} \quad (7)$$

그리고 팩이 홀의 내부에서 항상 두 점 접촉이 되어 있는 경우에는 f_1 과 f_2 가 0보다 큰 값을 가지므로 α 의 범위는 다음과 같다.

$$\tan \alpha \leq \frac{1}{\mu} \quad \alpha \leq \tan^{-1} \left(\frac{1}{\mu} \right), \quad \text{for } f_1 \geq 0 \quad (8)$$

$$\alpha \geq \tan^{-1} \frac{\mu \sin \theta - \cos \theta}{\mu \cos \theta + \sin \theta}, \quad \text{for } f_2 \geq 0 \quad (9)$$

따라서 α 의 범위는

$$\tan^{-1} \frac{\mu \sin \theta - \cos \theta}{\mu \cos \theta + \sin \theta} \leq \alpha \leq \tan^{-1} \left(\frac{1}{\mu} \right) \quad (10)$$

또한 발생할 수 있는 θ 의 범위는 $d \leq D \cos \theta$ 이므로

$$\theta \geq \cos^{-1} \left(\frac{d}{D} \right) \quad (11)$$

의 조건을 만족해야만 한다.

2.3 경사모드에서의 오차수정

위의 역학적 해석에서 $d > D \cos \theta$ 인 경우는 방향오차가 큰 경우이므로 위의 역학적 해석을 통해 삽입작업을 수행할 수 없다. 따라서 방향오차를 수정하여 평상모드로 전이를 시켜 삽입작업을 하기 위해 비전센서를 이용한다.

2.3.1 히스토그램 평활화(Histogram Equalization)

명암값의 분포가 고르지 못할 때 이미지처리응답을 개선시키기 위해서 히스토그램평활화를 적용한다. 그 결과로 명암값의 분포의 균일화가 이루어지기 때문에 영상이 향상된다. 히스토그램평활화의 목적은 궁극적으로 조명, 반사등으로 인한 원영상 (Raw Image)에서 일정한 분포를 가진 히스토그램을 생성하는 것이다.

히스토그램평활화는 다음과 같이 3단계를 거친다.

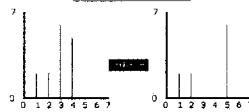
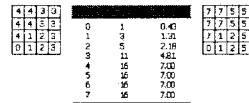
1. 히스토그램을 이용한 명도 값의 빈도수를 계산한다.
2. 구한 빈도 수를 이용하여 축적히스토그램 값을 구하고 정규화시킨다.
3. 정규화된 축적 히스토그램을 그레이 스케일 사상 함수로 이용하여 그레이 레벨값을 매핑한다.

축적히스토그램이란 1단계에서 구한 명도값의 빈도수를 계속 더해나가 축적한 값을 말한다. 예를 들어 명도 값 1에서의 축적 히스토그램은 명도 값 0의 빈도수와 명도 값1의 빈도수를 더한값이다. 특히 본 논문에서는 팩의 색을 중심으로 레벨값을 매핑하였다.

이렇게 구해진 축적히스토그램은 다음 식에 의해 정규화 된다.

$$k_i = \frac{g_{\max}}{n_i} H(i) \quad (12)$$

여기서 n_i 는 픽셀의 총개수이고 g_{\max} 는 명도의 최대값이고 $H(i)$ 는 축적히스토그램이다.



[그림5] 축적히스토그램

2.3.2 고속푸리에변환

명암분포가 조정된 이미지를 주파수영역에서 고주파성분을 이용하기 위하여 다음과 같은 푸리에변환을 고려한다.

$$F(k, l) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i, j) e^{-2\pi i \left(\frac{kx}{N} + \frac{ly}{N} \right)} \quad (13)$$

$F(k, l)$ 은 주파수영역이고 $f(i, j)$ 는 실공간이다. 또 N 은 $N \times N$ 이미지에서 이미지의 가로 혹은 세로의 픽셀수를 의미한다. 데이터 개수 N 에 대한 불연속 푸리에 변환의 계산은 N^2 의 계산회수를 필요로 한다. 따라서 $N \times N$ 의 크기에 대해서는 $(N^2)^2$ 의 복잡도를 요구하기 때문에 이로 인한 계산상의 불이익을 만회하기 위해서 푸리에 변환의 분해성질을 이용한다. 즉 2차원 연산식을 두개의 1차원 연산식으로 만들어 행에 대해서 푸리에 변환후 열의 푸리에 변환을 수행한다.

2.3.3 고주파필터처리 및 역푸리에 변환

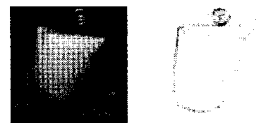
팩의 윤곽을 추출하기 위해 명도값의 갑작스러운 변화를 추출할 수 있는 고주파필터를 사용한다. 고주파 필터에는 많은 형태가 있는데 본 논문에서는 버터워스 (Butterworth) 필터를 사용한다.

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + \left[\frac{D_0}{D(u, v)} \right]^{2n}} \quad \text{where } D(u, v) = \sqrt{(u^2 + v^2)} \quad (14)$$

고주파 필터 처리후 다음의 푸리에 역변환을 통해 실 공간으로 전환한다.

$$f(i, j) = \frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} F(k, l) e^{2\pi i \left(\frac{kx}{N} + \frac{ly}{N} \right)} \quad (15)$$

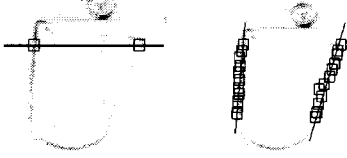
위 과정을 거치면 다음과 같은 팩의 원영상에서 윤곽정보를 추출할 수 있다.



[그림6] 원영상과 주파수영역에서 고주파통과처리된 영상

2.3.4 윤곽샘플링 및 방향오차결정

위 과정을 통해 추출된 영상은 펍의 윤곽정보를 포함하고 있다. 이로부터 펍의 왼쪽과 오른쪽의 경계점을 추출할 수 있다. 하나의 행으로부터 펍의 경계점에 해당하는 두 점을 추출한다. 위 과정을 비교적 노이즈성분이 적은 몇 개의 선택적인 행에 대해서 반복을 하면 펍윤곽에 해당하는 두개의 샘플집합을 얻을 수 있다.



[그림7] 펍윤곽 샘플링

이제 각각의 샘플집합으로부터 가장 근접한 직선의 기울기를 구하기 위해서 Least Squared Sum 방법을 이용한다. 다음 식을 이용하여 S_r 을 최소화하는 a_0 를 구하여 이를 방향오차로 정한다.

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2 \quad (16)$$

여기서 x_i, y_i 는 샘플링된 점이고 a_1 은 직편이고 n 은 샘플링된 점의 개수이다.

위식을 최소화하는 a_0 와 a_1 을 구하기 위해서 (16)식을 각 계수에 대해서 편미분을 취한다.

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i) \quad (17)$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i) x_i \quad (18)$$

S_r 을 최소화하는 a_0, a_1 에서 위식은 0일 것이므로 (17),

(18)식을 0으로 놓고 a_1 과 a_0 에 대해서 풀면,

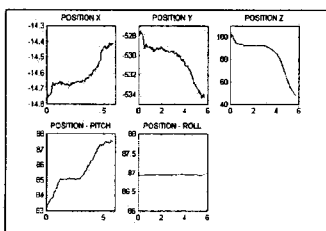
$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (19)$$

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x} \quad (20)$$

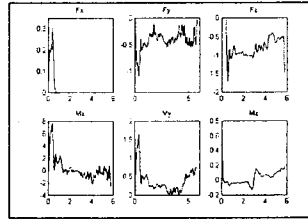
여기서 \bar{x}, \bar{y} 는 샘플집합내에서 x 와 y 의 평균이다.

2.4 실험 및 결과

실험에 적용된 시스템은 5자유도 로봇의 마지막 링크에 힘/모멘트 센서와 그리퍼(Gripper)가 펍을 잡은 이미지를 입력받을 수 있도록 리스트(Wrist) 측면에 디지털카메라를 부착하여 삽입 작업시 감지되는 힘과 모멘트를 측정하여 제어알고리즘에 이용한다. 그리고 힘/모멘트 센서의 좌표계는 로봇의 마지막 링크의 좌표계와 동일하다. 삽입되는 펍은 직경 29.5 mm의 철판이 없는 원통형의 플라스틱이 사용되었고 홀은 직경 30.0 mm의 두랄루민으로 클리어런스는 0.5mm이다. 실험방법은 초기의 방향오차를 작은 경우와 큰 경우의 두 가지로 나누어 설정하여 삽입작업의 성공여부를 알아보았다.

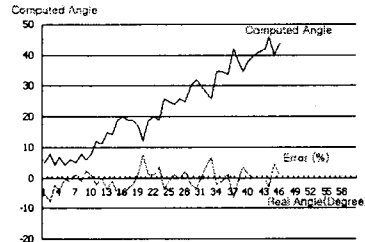


[그림8] 방향오차가 작은 경우의 각도변화



[그림9] 방향오차가 작은 경우의 힘/모멘트 센서의 변화

방향오차가 커서 Z축 접촉한계에 도달할 경우 비전센서가 동작하고 실제방향오차와 계산된 방향오차의 오차는 다음과 같다.



[그림10] 실제방향오차와 비전센서로 계산된 방향오차사이의 오차

3. 결 론

지금까지 본 논문에서는 6축의 힘/모멘트/비전 센서를 사용한 철판이 없는 원기둥 형태의 부품의 삽입작업에 대한 삽입 알고리즘을 제시하고 실제로 시스템을 구현하여 조립작업을 수행하였다. 삽입작업은 평상모드와 경사모드의 2가지로 크게 나누고 경사모드는 다시 방향오차가 작은 경우와 큰 경우로 나누어 각각에 방향오차가 큰 경우 비전 센서를 이용한 디지털 이미지해석을 통해 경사모드로 전이시켜 삽입작업을 수행하는 방법을 제시하였다. 제안된 알고리즘은 과거에는 수행되지 않았던 방향오차가 큰 경우의 경사모드에 대한 오차 수정방법을 제시하고 실험을 통해 그 효율성을 입증해 보임으로써 기존의 알고리즘 보다 더욱 더 효율적으로 삽입작업을 수행할 수 있음을 보이고 있다.

향후에 연구되어야 할 연구과제는 로봇의 그리퍼(gripper)와 펍 사이에 미끄러짐이 존재하는 경우에 어떻게 오차를 수정하느냐 하는 것과 초기상태부터 큰 방향오차가 존재하는 경우 방향오차를 수정하는 과정에서 발생하는 위치오차로 인해 초기삽입위치가 수정되어야 하는데, 이 초기삽입위치를 제어하는 보다 효율적인 알고리즘이 연구되어야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 임동진, 김인옥 "힘/모멘트센서를 사용한 철판이 없는 부품의 삽입작업에 관한 연구" 한양대학교대학원, pp 13-24, 1998
- [2] D. E. Whitney, "Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts", *Journal of Dynamic systems, Measurement, and Control*, Vol. 104, pp. 65-77 March 1982,
- [3] 전훈중, 김갑일, 김대원, 손유석, "다중센서를 사용한 철판이 없는 부품의 능동적인 삽입작업" 93 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, pp. 410-413, 1993
- [4] 성영휘, 김완주, 정명진, "6축 힘 감지기를 사용한 로봇의 철판이 없는 부품에 대한 능동적인 조립작업", *전자공학회의논문지*, 제29권, pp. 11-19, 1992.