

유연성이 있는 부품의 조립작업에 대한 연구

· 문 창 렬 조 형 석
한국과학기술원 정밀공학과

A Study on the Assembly of Flexible Parts

Chang Youl Moon Hyung Suck Cho
Dept. of Precision Engineering
KAIST

ABSTRACT

In the field of assembly processes, non-rigid parts such as wires, tubes, gaskets and O-rings cannot be assembled automatically. And although many researchs have been made for rigid part mating, there are not substantial studies in flexible parts assembly field. In this paper, assembly stages of flexible parts are classified and some analysis are made. FEM was used to estimate the relationship between deformation and reactive forces. An assembly algorithm adopting reciprocal twisting motion was proposed and the assembly tool design methodology was discussed.

I. 서 론

로봇을 이용한 부품의 조립작업에 있어서 Rigid한 물성이 있는 부품에 대한 조립작업과정과 관련 손목기구의 개발에 대한 연구는 이미 많은 결과가 알려져 있다.

조립과정은 흔히 Peg-in-Hole작업으로 공정을 단순화 시킨 것에 국한 되어왔고 부품들은 모두 강성이 있어서 공정중 변형이 발생되지 않는 것으로 가정하였다. [1,2] 조립작업에 대한 기본적인연구는 다음과 같이 크게 세가지로 나눌 수 있다. [1]

(a)면취가 있는 부품의 조립에 있어 RCC와 같은 수동적 컴플라이언스가 있는 손목기구를 이용한 방법에 대한 연구[2], (b)면취가 없는 부품의 결합을 위한 진동식 조립방법에 대한 연구와 손목기구 개발[3], (c)면취 유무에 관계없이 능동적 조립을 위해 힘정보 귀환을 이용한 알고리즘 연구등[4,5,6].

부품에 유연성이 있어서 조립공정중 반력에 의해 변형이 발생하거나 단순히 부품을 파지(Gripping)한 중에도 자중에 의해 처짐등이 발생하는 경우에 대한 연구로는 Whitney등[2]의 Peg-in-Hole작업 모델링을 적용하여 힘정보와 변형관계식을 유도한 경우[7]와 폭이좁고 길이가 긴 판형부품을 수평으로 잡고 자중에 의한 처짐곡선을 Vision정보로써 파악하여 직사각형 구멍에 밀어넣는 과정을 모델링한 경우[8]등을 들 수 있다. Merlet[7]의 연구에서는 조립알고리즘으로서 Hole벽에 닿은 Peg끝단의 위치를 두점 접촉상태 경우에만 힘센서에서 얻

어진 정보로부터 계산하여 추정하였는데 틈새율(Clearance Ratio)이 크고 초기에 두점접촉이 발생한것을 전제로 한다는 제약이 있고 유도된 힘-모우먼트와 접촉점 관계식의 과도한 비선형성으로 인해 조립작업적용에 현실성이 없다.

Zheng[8]은 힘센서 대신에 카메라를 이용하여 판형부품의 자중처짐곡선합수를 계산하여 로봇손목의 삽입경로(Inserting Trajectory)를 그 곡선에 일치시키는 알고리즘을 제시하였으나 이는 틈새율이 크고 자중에 의해 처짐이 발생하는 판형부품에 국한되는 제약이 있다. 본 논문에서는 강성이 있는 부품에 준하는, 틈새율이 작은 유연성 부품의 조립특성을 파악하기 위해 간단한 시뮬레이션 및 해석을 시도하고 이로부터 조립을 위한 알고리즘과 조립손목기구의 설계방안을 제시하고자 한다.

II. 유연성 부품 조립 특성

유연성이 있는 부품의 조립현상도 rigid한 부품의 경우와 마찬가지로 다음의 세 단계로 나누어 생각할 수 있다. (a)접근단계(approach stage) (b)접촉탐색단계(contact search stage) (c)삽입단계(insertion stage) (그림 1)

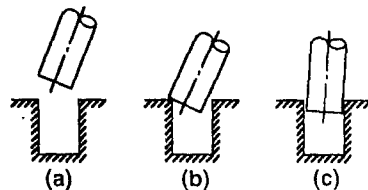


그림 1. 조립작업 단계
Fig.1 Assembly Stages

Rigid 부품의 경우 삽입 알고리즘은 접촉단계에서 hole의 중심을 찾기위한 탐색작업에 대한 연구가 집중적으로 이루어져 있다. 본 논문에서 논의되는 유연성 부품의 조립 단계별 형상을 분류하면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서는 peg끝단이 hole중심에 대해서 -X축 방향으로 위치오차를 가지고 접근한 경우에 대해서만 나타낸 것이므로 전체 경우의 수는 XZ 평면상에서만 고려할 경우에 한하여 대칭으로 두배가 된다.

초기의 접촉단계에서는 rigid peg과 동일한 패턴을 가지나 (A)-(G) 이후 삽입력이 계속 작용하게 되면 반력에 의해 peg이 변형을 일으키게 된다. (H)-(J) 적절한 조립압고리짐이나 조립 공구에 의해 peg의 끝단이 hole에 안착된 경우에도 peg이 직 선상태에 있지않고 (K)-(M)과 같이 변형되어 있는 경우가 발생 한다. (rigid 부품인 경우는 탐색 단계 이후에는 (K)-(M)과 같은 현상은 일어나지 않는다.)

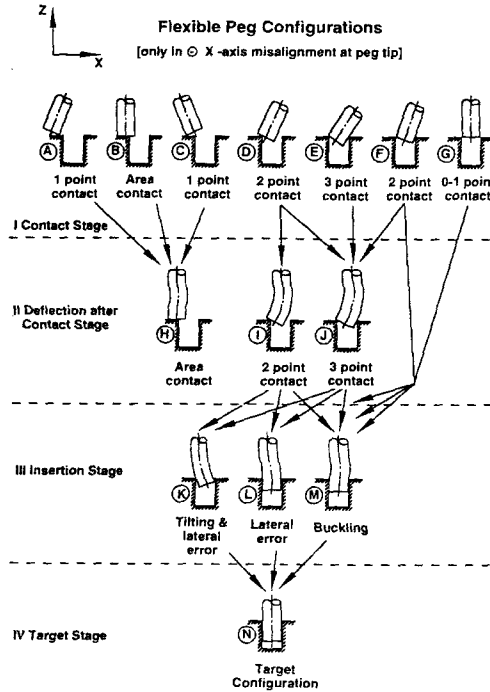
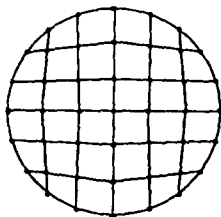


그림 2. 유연성 Peg 형상분류도
Fig.2 Patterns of flexible peg configuration

III. FEM을 통한 조립반력-위치오차 관계 해석

로봇 손목이 peg를 잡고 hole중심을 향해 수직 삽입운동을 하는 실제 경우를 생각하면 초기의 peg의 변형이 매우 작다고 가정할 경우 그림 2의 ①와 ②의 경우가 대부분 발생하게 된다. 위치오차량과 삽입반력에 의해 peg이 변형되는 관계를 파악하는 방법으로는 탄성학적인 관계식을 유도하는 것을 생각할 수 있으나 유연성 부품의 경우 대개가 점탄성이 있으므로



20 Layer in axial direction
Total : 945 nodes
720 elements
E : 18 MPa
V : 0.33
Length : 60mm
Diameter : 5.80mm
Insertion force : 50N

그림 3. FEM 모델
Fig. 3 FEM Model

본 연구에서는 상용화된 FEM 소프트웨어(ANSYS)를 이용하여 ①, ②의 경우에 대한 시뮬레이션을 하였다. 원형단면 peg의 FEM 모델은 그림 3과 같다. (45x21 = 945 node, 720 element)

접촉단계후 변형이 일어나는 경우와 삽입중의 변형에 대한 FEM 경계조건은 그림 4와 같이 부여하였다.

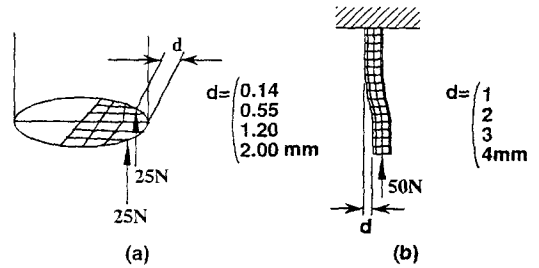


그림 4. FEM 경계조건 (a)Type ① (b)Type ②
Fig.4 FEM Boundary Condition

위치오차변화에 따른 힘 센서에서 감지되는 힘-모우먼트의 FEM 계산 결과는 그림 5와 같다.

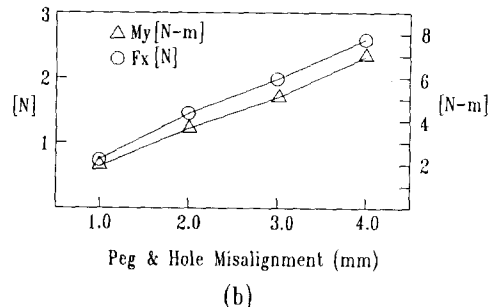
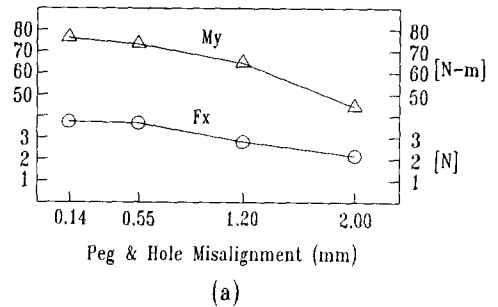


그림 5. FEM에서의 위치오차-힘, 모우먼트관계
(a)Type ① (b)Type ②
Fig.5 Misalignment-Force, Moment Relation

위치오차가 증가하면 힘-모우먼트의 변화관계가 두 경우에 서로 반대 경향을 보임을 알 수 있다.

IV. 농동조립을 위한 센서 선정의 문제

FEM 해석에서는 이상적인 경계조건에 따른 위치오차량에 대한 변형량과 반력으로 작용되는 힘-모우먼트 관계가 정량적으로 예측되나 실제의 경우에 있어서는 중감의 정성적인 관계만을 파악할 수 밖에 없으므로 현상적으로 얻어지는 힘 정보나 변형량을 정밀하게 측정하여도 정확한 hole의 중심을 구하지 못하는 문제점이 있다. 따라서, 조립알고리즘을 구현하기 위해서는 단순한 힘 정보 또는 변형량 정보외에 추가의 정보나 방법론이 필요하게 된다. 힘-모우먼트와 변형량은 상호 인과관계를 형성하고 있으므로 센싱이 정밀, 효율적이고 장치구성이 용이한 것을 채택하여야 한다.

V. 탐색 및 조립작업에서의 왕복회전동작

(1). 접촉탐색단계

유연성 peg이 접촉탐색단계에 이르게 되면 반력으로 인해 그림 2의 ㉔-㉕와 같은 형상으로 변형이 발생하게 된다. ㉔의 경우에는 peg중심이 hole외곽에 얹혀 있는 상태로 계속되는 수직 삽입력으로 인해 좌굴이 발생한다. ㉕와 ㉖의 경우에는 peg중심이 hole영역내에 존재하므로 수직삽입력에 의해 hole 중심쪽을 향해 변형이 발생된다. 농동적 조립 관점에서 살펴보면 ㉔의 경우는 hole중심쪽으로 peg을 이동시켜도 접촉면에서의 마찰력으로 인해 peg끝단이 조립기구의 위치변동을 추종하지 못하므로 peg을 다시금 들어올려서 ㉕, ㉖의 상태로 변형시켜야 한다. 로봇의 초기 설정위치가 peg끝단의 중심이 hole 영역내에 존재하는 것으로 가정하면 ㉕의 경우가 가장 대표적인 peg형상이 된다. ㉖는 ㉕에서 계속되는 수직삽입으로 인해 진전된 형상이므로 ㉕경우에 대한 탐색작업을 고려하기로 한다. 그림 6과 같은 2점 접촉후 변형이 발생한 상태에서 조립 손목기구에서 수직삽입력 F와 회전력 M을 가한 경우를 생각한다. [9]

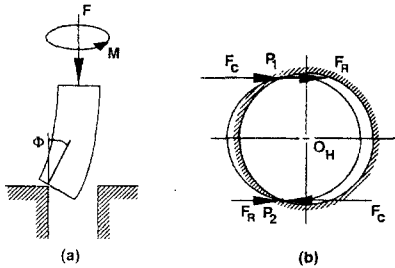


그림 6. Type ①에서의 회전력영향
Fig.6 Effect of Twisting on Type

F의 힘만으로 peg을 단순히 누르게 되는 경우에는 접촉점 P1, P2에서의 반력으로 인해 peg의 변형이 점차 크게되지만 회전력 M을 가하게 되면 그림 6-b에서와 같이 접촉점 P1, P2에 couple(Fc)이 작동하게 된다. 여기서 Fr은 삽입력 F에 의해 peg이 받는 반력이다. ϕ 는 힘변형 각도이다.

CCW 회전력인 경우에는 운동이 구속을 받는 P2점이 회전중심이 되어 P1점이 이동하게 되고 peg중심이 hole중심을 향하게 된다. Rigid peg의 경우[9]와 달리 유연성 peg의 경우에는

조립 손목기구 자체에는 컴플라이언스가 없고, peg의 변형자체가 킬링 컴플라이언스를 가지고 있으므로 한쪽방향만의 회전운동을 하게되면 최대 회전각을 구하기가 어렵고 그림 2의 ㉔와 같은 형상이 될 수가 있다. 따라서 왕복회전(reciprocal twisting)운동을 시키면 그림 6에서의 접촉점 P1, P2가 교대로 회전중심점이 되어 peg중심이 hole중심에 계속 접근하고 결국 peg의 휨 변형에 대한 복원력으로 인해 peg끝단이 hole에 안착하여 탐색작업이 완료하게 된다.

(2) 삽입단계

초기 삽입이 이루어진 상태에서도 그림 2의 ㉔-㉕와 같은 변형이 조립손목과 hole간의 위치오차로 인해 발생하게 된다. 이때의 준 정적(quasi-static)상태를 나타내면 그림7과 같다.

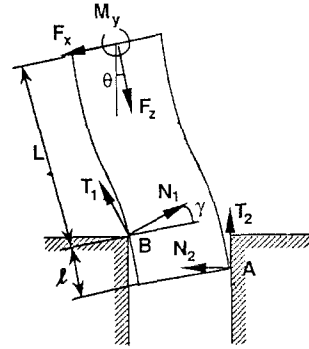


그림 7. 삽입단계에서의 힘평형
Fig.7 Force Equilibrium at Insertion Stage

회전력이 가해지지 않은 상태에서의 힘-모우먼트 평형관계식은

$$T_2 \cos \theta + N_2 \sin \theta + N_1 \sin \gamma + T_1 \cos \gamma = F_z \quad (3)$$

$$T_2 \sin \theta - N_2 \cos \theta + N_1 \cos \gamma - T_1 \sin \gamma = F_x \quad (4)$$

$$T_2 (Z_A \sin \theta - X_A \cos \theta) + N_2 (Z_A \cos \theta + X_A \sin \theta) + N_1 (Z_B \cos \gamma - X_B \sin \gamma) - T_1 (Z_B \sin \gamma + X_B \cos \gamma) = M_y \quad (5)$$

여기서 $(X_A, Z_A), (X_B, Z_B)$ 는 접촉점 A, B의 위치좌표이다. 마찰계수 μ 가 일정하다고 가정하고, θ 와 γ 의 크기가 작다고 볼 수 있는 상태를 고려한다면

$$\begin{aligned} T_1 &= \mu N_1, \quad T_2 = \mu N_2 \\ \cos \theta &= \cos \gamma = 1 \\ \sin \theta &= \theta, \quad \sin \gamma = \gamma \end{aligned}$$

(3), (4)식으로부터 N_1, N_2 를 구하면

$$N_1 = \frac{F_x(\mu + \theta) + F_z(1 - \mu\theta)}{(\theta + \mu)(1 - \mu\gamma) + (\mu + \gamma)(1 - \mu\theta)} \quad (6)$$

$$N_2 = \frac{F_x(\gamma + \mu) - F_z(1 - \mu\gamma)}{(\theta + \mu)(1 - \mu\gamma) + (\mu + \gamma)(1 - \mu\theta)} \quad (7)$$

(6), (7)식으로 부터 jamming이 일어나는 조건을 생각하면

$$(\theta + \mu)(1 - \mu\gamma) + (\mu + \gamma)(1 - \mu\theta) = 0 \quad (8)$$

여기서 $\theta \approx \gamma$ 라고 둔다면 (8)식에서

$$\theta = \gamma = \frac{\mu}{1 - \mu} \quad (9)$$

가 된다. 즉 jamming은 마찰계수와 힘 변형각간의 대략 (9)식의 관계를 가지고 발생하게 된다.

힘 변형에 의해 발생하는 각도 γ 는

$$\gamma = \frac{\frac{M_y}{F_z} K \sin K Z_B + \frac{F_x}{F_z} (1 - \cos K Z_B)}{1 + \frac{K M_y}{F_z} \cos K Z_B + \frac{F_x}{F_z} K \gamma \sin K Z_B} \quad (10)$$

여기서, $K = \frac{d\theta}{dL}, \quad \frac{d^2\theta}{dL^2} = \frac{F_z}{EI}$

- E : 영의 계수
- I : 단면 관성 모멘트
- r : peg의 반경
- L : peg의 노출면 길이

로 근사화 될 수 있는데, 능동적 조립을 위해 힘 정보만으로 γ 를 감소시키기 위해서는 삽입력과 변형곡선 및 접촉점의 위치를 구하여 위 관계식을 수치해석적으로 구하여야 하는 어려움이 있다. 이러한 비현실적 접근방식보다 jamming을 피하면서 peg의 삽입을 진전시키기 위한 방법으로 왕복 회전운동을 고려하면 다음과 같은 과정을 예측할 수 있다.

- (a) 일정한 삽입력만 존재하면 θ, γ 가 증가하고 결국 jamming이 발생한다. (A, B점)
- (b) 회전력 M을 가하면 A, 또는 B점이 회전중심이 되어 일시적으로 jamming이 해제된다.
- (c) 반력 모멘트가 감소하는 방향으로 peg을 이동시키면 A, B점중 하나 또는 모두에서 아래방향의 미끄럼이 발생한다.
- (d) (a)로 반복

VI 조립 알고리즘

그림 8은 본 논문에서 제안된 조립 알고리즘의 순서도이다. 먼저 peg을 일정한 힘이 작용하는 위치까지 Z축을 따라 수직으로 접근시킨다. 이때 peg와 hole 간의 접촉 반력(F_x, y, z, M_x, y, z)의 추이를 파악하여 그림 2의 peg 형상을 분류하고 (Pattern Classifier) 그에 따른 탐색 작업이나 고정작업을 수행한다. 접근 단계에서 접촉이 일어난 순간의 형상(㉔-㉖)는 모두 반력에 의한 변형상태(㉗-㉙)로 진전되므로 이때의 형상 분류가 중요하다.

본연구에서는 조립반력(F_x, y, z, M_x, y, z)과 삽입 깊이(d_z)를 센싱하여 표1 과 같은 분류를 하는 것을 제안한다.

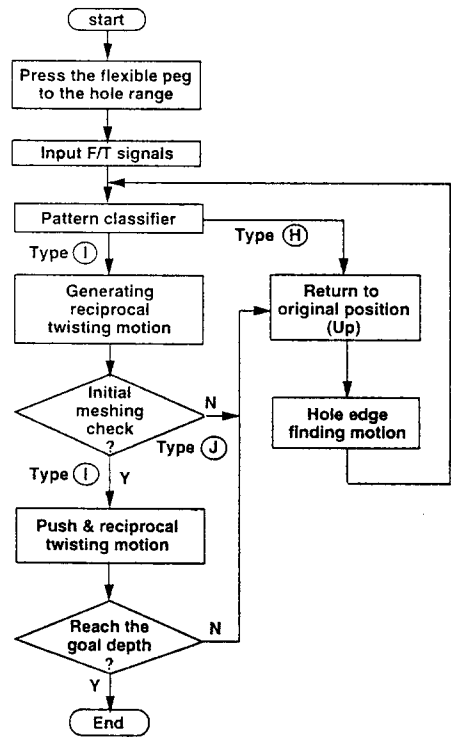


그림 8. 조립알고리즘 순서도

Fig.8 Flow Chart of Assembly Algorithm

$F_z > F_L, \dot{F}_z > \dot{d}_z$	Type ㉗
$F_L < F_z < F_U, \dot{M}_{x,y} > \dot{d}_z$	Type ㉙
$F_z < F_L$	Type ㉔

F_L : lower limit F_U : upper limit

$\dot{F}_z, \dot{M}_{x,y}, \dot{d}_z$: Variations of F/T & Inserting Depth

표 1

본 논문에서 제안된 조립알고리즘의 구현을 위한 조립 순목 기구는 힘 정보에 의한 형상분류를 위한 힘 센서를 가지고 있어야 하며 조립이 실패한 경우 hole영역을 재탐색하기 위한 추가의 센서를 보유할 필요가 있다.

VII 결론 및 추후 과제

본 논문에서는 강성이 있는 부품에 준하는 틈새율이 작은 유연성 부품의 조립특성을 파악하기 위해 조립 단계를 분류하였고 대표적인 단계에 대한 FEM 해석을 시도하고 유연성 부품의 조립에 유용하게 적용될 알고리즘을 제시하였다. 추후 연구 과제로는 실험을 통한 알고리즘의 유용성 확인과 보완 및 전용 조립순목기구를 개발하는 것을 고려하고 있다.

VIII 참고 문헌

- [1] H.S.Cho, H.J.Warnecke, D.G.Gweon, "Robotic assembly : a synthesizing overview", Robotica, Vol.5, pp.153-165

1987

- [2] D.E. Whitney, " Quasi-Static assembly of compliantly supported rigid parts", J. Dynam. Syst. Measur. Control, No.104, pp.65-77, 1982
- [3] K.W. Jeong, H.S. Cho, " Development of a pneumatic vibratory wrist for robotic assembly ", Robotica, pp.9-16, 1989
- [4] T.Goto, K. Takeyasu, T. Inoyama, "Control algorithm for precision insert operation robots", IEEE Trans. Syst. Man. Cybern., No.19, pp.797-810, 1981
- [5] H. Asada, S. Hirai, " Towards a Symbolic-level force feedback recognition of assembly process state", Proc. 5th Int. Symp. R.R., pp.341-346, 1989
- [6] Y. K. Park, H. S. Cho, " Fuzzy rule-based assembly algorithm for precision parts mating ", Int. J. of Mechatronics, to appear
- [7] J.P. Merlet, " A control law for the insertion of a flexible peg by using a robot ", Proc. of 3rd Int. Conf. of RoViSec., pp.453-460, 1983
- [8] Y.F. Zheng, R. Pei, C. Chen, " Strategies for automatic assembly of deformable objects ", Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.3, pp.1263-1269, 1991
- [9] D.S. Ahn, " A study on learning of assembly strategies in automated robotic assembly system ", Ph.D thesis, KAIST, 1992