

6축 힘 감지기를 사용한 챔퍼(chamfer)가 없는 부품의 조립 작업

성영휘 정명진

한국과학기술원 전기및 전자공학과

Chamferless Part-mating Using 6-Axis Force Sensor

Young-Whee Sung Myung-Jin Chung

Dept. of Electrical Engineering, KAIST

Abstract

Active part mating algorithm using 6-axis force sensor data for the assembly automation and/or teletobotics is presented and experimented. Parts to be mated are cylindrical and have no chamfers. There are basically two modes. One is the normal mode with only a positional error, the other is the tilted mode with an orientational error in addition to a positional error. The used algorithm distinguishes a contact external to the hole from that of internal to the hole in order to perform part-mating in spite of the relative tilt between the hole and the peg.

1. 서론

생산 자동화 분야는 물론 인간의 접근이 어렵거나 불가능한 경우에도 로봇이 적절하게 환경에 대처해 나가면서 주어진 작업을 수행하기 위해서는 로봇에게 감각기능과 지능을 부여해 주어야 하며 이를 위해서는 센서 시스템의 사용이 필요하다. 여러센서중에서 힘-모우멘트 센서는 가격이 저렴하고 처리 시간이 적게 걸리며 특히 정밀한 작업에 더욱 적합하다. 또한 로봇과 작업 대상물간의 접촉이 있는 작업의 경우에는 로봇과 작업대상물 사이에 과도한 힘이 가해져 작업대상물 또는 로봇 자체가 손상을 입을 수 있으므로 이를 피하기 위해서는 힘-모우멘트 센서의 사용이 필수적이다.

본 논문에서는 6축 힘 감지기를 로봇에 장착하여 로봇과 작업 대상물간의 접촉이 있는 작업을 수행시키는 힘 제어의 한 응용으로서 챔퍼(chamfer)가 없는 원기둥 형태의 썩(peg)과 홀(hole)을 조립하는 작업을 수행하였다.

조립 (Part-mating)방법은 크게 나누어 보면 수동적인 방법 (passive method)과 능동적인 방법 (active method)이 있다. 수동적인 방법은 기계적 구조 자체가 로봇에게 유연성 (compliance)을 제공하도록 되어 있다. 이 방법의 예로는 RCC (Remote Center Compliance)등이 있으며 오래전 부터 D.E.Whitney [1] 를 비롯한 많은 사람들이 연구를 해왔다. ([2], [3], [4]) 능동적인 방법은 수동적인 방법에 비하여 프로그램가능성이 있고, 정밀성과 보다 넓은 오차범위에서의 적합성등의 장점을 가지며 또한 텔리오퍼레이션 (teleoperation)등과 같은 분야에서 힘 제어를 할 때에는 능동적인 방법이 필수적이다.

M.E.Caine [4]은 챔퍼가 없는 경우에 대한 연구를 수행했는데 Whitney의 해석을 이용하였고 허용 위치(configurations)를 제한하는 방안을 제안하였다. 한편 가능한 위치의 각각에 대해서 힘-모우멘트 패턴을 통계학적으로 해석을 하여 로봇에게 학습시키고 힘-모우멘트의 패턴을 인식하여 조립작업을 하려는 시도가 C.S.G.Lee에 의해 진행되었으나 그는 컴퓨터 시뮬레이션만을 수행하였다. [5]

또한 Tatsuo Goto 는 3자유도를 갖는 주 로봇과 2자유도를 갖는 보조 로봇을 사용한 "HI-T-HAND"라는 로봇 시스템을 제작하여 로봇 손목자체에 수동적인 유연성 (passive compliance)을 부여하고 또한 x, y, z 3방향의 힘 데이터를 사용하여 조립작업을 수행하였다. [6]

2. 전체 시스템의 구성

조립작업을 하기 위한 전체 시스템의 구성을 그림 1에 나타내었다.

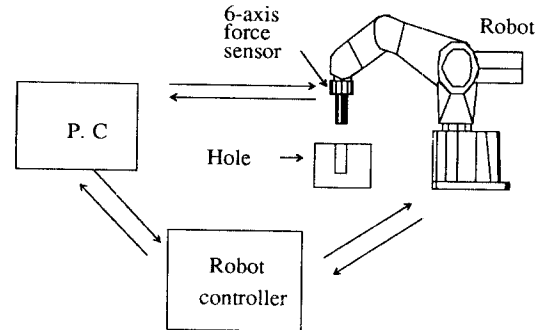


그림 1 전체 시스템의 구성
Fig 1 configurations of overall system

3. 조립작업

3.1 정의

홀의 윗면을 포함하는 평면과 썩의 축이 수직을 이루는 경우를 정상모드(normal mode), 수직이 아닌 경우를 경사모드

(tilted mode)라 정의 한다. 경사모드를 고려함으로써 홀이 수평면에 대해서 경사진 상태로 있는 조립작업시 또는 오차로 인하여 평상모드를 보장하지 못하는 경우에 대해서도 조립작업을 원활히 수행하게 된다.

3.2 제어 알고리즘

3.2.1 평상모드

먼저 펌과 홀의 상대적 접촉위치에 따른 힘과 모우멘트의 변화를 살펴보자. 이때 힘감지기의 원점은 펌의 밀면의 중심으로 잡고 로봇의 절대좌표계와 힘감지기의 좌표계의 상대적 위치관계는 그림 2의 (a)와 같도록 잡는다. 우선 첫번째 경우로 펌의 제 1 상한 에서 접촉이 일어나는 경우를 보면(그림 2의 (a)) 펌이 홀에 수직으로 접근하여 접촉함에 따라 모우멘트는 펌과 홀의 중심을 지나는 선에 수직으로 (시계방향) 작용하게 된다. 이때 각 성분이 이루는 각도 사이에는 (a)에서와 같은 관계를 가짐을 알 수 있다. 여기에서 α 로 표시된 각도들은 모두 같은 크기이며 $0 \sim \pi/2$ 사이의 양의 각이다. 초기 위치 오차의 크기를 l 이라 하면 펌의 중심에서 접촉점까지의 길이는 $r-l$ 이된다(r 은 펌의 반경). 모우멘트의 방향을 센서 좌표계에서보면 (b)에서와 같이 모우멘트의 X_1 방향 성분인 M_x 와 모우멘트의 Y_1 방향 성분인 M_y 는 모두 음이된다.

또한 펌의 중심, 홀의 중심 그리고 접촉점 M 은 모두 일직선 상에 있으므로 로봇이 이동해야할 방향과 크기는 (c)에서와 같이 R_x 방향으로 $-l * \sin\alpha$, R_y 방향으로 $-l * \cos\alpha$ 이 된다. 한편 M_x 와 M_y 의 atan2 function 값을 구해보면 ($\beta = \text{atan2}(M_y, M_x)$) $\beta = -\pi + \alpha$ 가 된다. 따라서 $\sin\beta = -\sin\alpha$, $\cos\beta = -\cos\alpha$ 가 된다. 따라서 M_x 와 M_y 의 atan2값을 이용하면 오차의 방향 판별과 수정동작의 결정이 모두 이루어 질 수 있다. 이상을 요약하면 표 1과 같다.

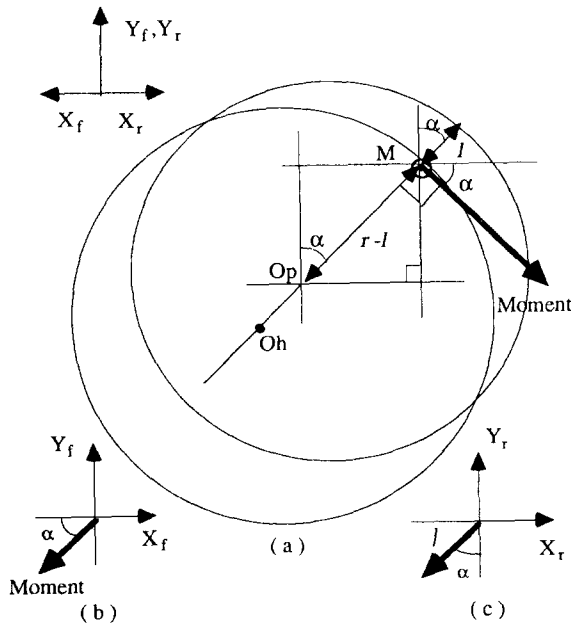


그림 2 제 1 상한에 접촉할 때

- (a) 힘-모우멘트의 관계
 - (b) 힘 감지기 좌표계에서의 모우멘트의 방향
 - (c) 로봇 절대 좌표계에서의 이동해야할 방향과 크기
- fig 2 Contacting at 1st quadrant of peg
- (a) Relationship between force and moment
 - (b) Direction of the moment at the coordinate of force sensor
 - (c) Direction and magnitude to move at the coordinate of robot

M_x, M_y 의 부호 $M_x \quad M_y$	$\beta = \text{atan2}(M_y, M_x)$	$\sin \beta$	$\cos \beta$	이동 방향 X, Y
- , -	$-\pi + \alpha$	$-\sin \alpha$	$-\cos \alpha$	좌와 같음

표 1 제 1 상한에서 접촉하는 경우

table 1 The case of contacting at 1st quadrant of peg

마찬가지로 생각하면 평상모드에서는 X, Y 방향의 모우멘트 (M_x, M_y) 데이터를 atan2 함수의 변수로 사용하여 위치오차의 방향을 구할 수 있다. 오차의 크기는 지면에 수직방향의 힘을 \vec{F} 라하면 모우멘트 $\vec{M} = (r-l) \times \vec{F}$ 이므로 $|r-l| = |M|/|F|$ 가 된다. 또한 실제에 있어서는 약간의 클리어런스(clearance)가 존재하게 되므로 로봇의 이동크기에 적절한 마진(margin)을 줄 수 있다. 즉 수정동작은 접촉위치에 상관없이 항상 R_x 방향으로 $(l + \text{margin}) * \sin\beta$ 만큼, R_y 방향으로 $(l + \text{margin}) * \cos\beta$ 만큼 이동하면 된다.

3.2.2 경사모드

위치오차의 크기가 크지않을 때 펌과홀의 상대적인 위치에 따라 가능한 위치는 그림 3과 같이 6가지 경우와 반대방향의 6가지 경우를 합하여 12가지의 경우가 있다. ([4], [5])

모든 경우에 대해서 로봇은 $-Z_1 (Z_1)$ 방향으로 힘을 가하고 실제 경사면에 대해서 펌은 약간의 기울어짐이 생기게 된다. 한편 (b)의 경우에는 로봇이 진행함에 따라 반발력이 감지되지 않으며 진행함에 따라 (d)의 경우로 된다. 마찬가지로 (f)의 경우에는 (e)의 경우와 힘-모우멘트 패턴이 같게된다. 따라서 이 두 가지 경우를 제외한 나머지 4가지 경우에 대하여 가해진 힘과 반발력 그리고 모우멘트의 관계를 보면 그림 4와 같다. 여기에서 Y_f, Z_f 는 각각 힘감지기 좌표계의 Y 방향 Z 방향을 나타내고 f_y, f_z 등은 로봇이 가해진 힘을, f_{y1}, f_{z1} 등은 힘감지기에서 감지하는 반발력을 나타낸다.

그림 4 (a) 에서 $-Y_1$ 방향으로의 힘은 펌과 홀의 접촉면이 기울어져있으므로 해서 생기는 펌의 $-Y_1$ 방향으로의 미세변위에 기인한다. 이 때

$$F_z = -(f_{z1} + \mu * F_n * \sin\theta),$$

$$F_y = -(f_{y1} - \mu * F_n * \cos\theta),$$

$$M_x = F_z * r \text{ 이다. 여기에서 } F_n = \sqrt{f_{y1}^2 + f_{z1}^2} \text{ 이다.}$$

(c)의 경우에도 마찬가지로 Y_1 방향으로의 힘이 감지된다.

$$F_z = -(f_{z1} + \mu * F_n * \cos\theta),$$

$$F_y = (f_{y1} - \mu * F_n * \sin\theta),$$

$$M_x = -F_z * r \text{ 이다. 여기에서 } F_n = \sqrt{f_{y1}^2 + f_{z1}^2} \text{ 이다.}$$

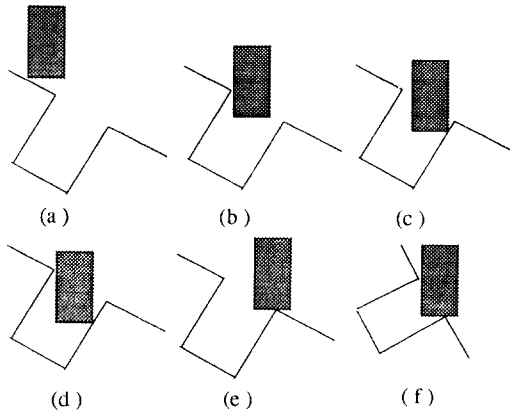


그림 3 가능한 위치
fig 3 possible configurations

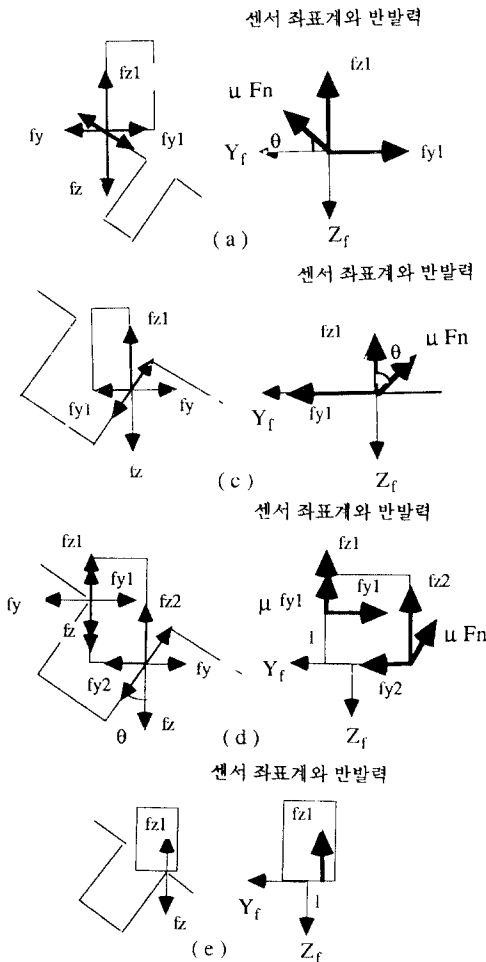


그림 4 힘-모우먼트 패턴
fig 4 patterns of forces-moments

(d)의 경우에는 홀의 내부와 입구에서 접촉이 일어나는 경우이다. 이러한 경우에는 홀내부의 접촉점에서 Ry방향으로의 미세변위가 생기게되면 홀입구에서의 접촉점에서도 꺾을 Yf방

향으로 힘을 주게되고 따라서 이 점에서의 반발력은 -Yf방향으로 생기게된다. 또한 Z1 방향으로의 힘도 작으나 작용하게되며 이상태가 진행되면 재킹(jamming)의 상태가 되어 홀내부 접촉점에서의 -Z1방향의 힘이 급격히 증가하게된다. 다른 경우와는 달리 이 경우에는 Fy나 Mx의 부호는 어느점에서의 힘의크기가 더 커지느냐에 따라 바뀌게된다.

$$F_z = -(f_{z1} + f_{z2} + \mu * F_n * \cos\theta + \mu * f_{y1}),$$

$$F_y = (f_{y2} - f_{y1} - \mu * F_n * \sin\theta),$$

$M_x = (f_{z2} + \mu * F_n * \cos\theta) * r - (f_{z1} + \mu * f_{y1}) * r - f_{y1} * l$ 이 된다. 여기서

$$F_n = \sqrt{f_{y1}^2 + f_{z1}^2} \text{ 이다.}$$

한편 (c)의 경우에는 이러한 미끄러짐에 의한 힘이 생기지 않으므로 -Z1방향으로의 힘이 작용하게된다.

방향오차가 작은 경우에 대한 제어 알고리즘은 다음과 같다. 우선 홀의 외부에서의 접촉이 일어나는 경우와 내부에서 접촉이 일어나는 경우를 구별한다. 즉 그림4의 (a), (e)의 경우와 같이 홀의 외부에서 접촉이 일어나는 경우에는 평상모드에서의 알고리즘을 사용하여 해석하여 위치오차만 있다고 생각하고 수정동작을 한다. 수정동작의 결과 홀내부에서 접촉이 생기는 경우로 천이하게 된다. 한편 홀의 내부에서 접촉이 일어나는 순간에는 (c)의 상태가 되고 꺾을 계속 접근 시킴에 따라 (d)의 상태가 된다. (c)의 상태에서는 다시 힘 데이터와 모우먼트 데이터로 접촉 방향을 판단할 수 있고 또한 홀내부의 경우이므로 접촉방향의 반대방향 (π 의 각도차)이 방향오차가 생긴 방향이다. 따라서 그 판단에 따라 각도를 수정한 후 Z축 방향의 힘이 감지될 때까지 진입을 시키고 규정량 이상의 힘을 감지하게되면 다시 각도를 수정한 후 진입을 시킨다. 이 과정을 작업이 완료될 때 까지 반복한다. 따라서 문제는 홀의 외부접촉과 내부접촉을 판별하는 것과 수정동작을 어떻게 하느냐 하는 것이다.

첫번째로 홀의 내부접촉인가 외부접촉인가의 판별하기 위해서 $|F_{y1}|$ 와 $|F_{z1}|$ 의 크기를 비교한다. 우선 그림 4의 (c)와 같은 경우에는 F_y 성분이 없으므로 F_z 성분이 크게된다. 그림 4의 (c)와 같이 홀의 내부에서 접촉이 일어난 경우에는 $|F_{y1}|$ 가 $|F_{z1}|$ 보다 크기 위한 조건을 구해보면 다음과 같다.

$$|F_{z1}| = f_{z1} + \mu * F_n * \cos\theta = F_n * (\sin\theta + \mu * \cos\theta),$$

$$|F_{y1}| = f_{y1} - \mu * F_n * \sin\theta = F_n * (\cos\theta - \mu * \sin\theta) \text{ 이므로}$$

$$|F_{y1}| - |F_{z1}| > 0 \text{ 으로부터}$$

$$\tan\theta < (1 - \mu) / (1 + \mu) \dots\dots\dots (1)$$

이 관계식을 만족시키는 μ 와 θ 의 영역을 그래프로 나타내면 그림 5와 같다.

따라서 마찰계수와 방향오차의 크기가 (1)식을 만족시키는 경우에 대하여 홀의 내부에서 접촉이 일어날 때에는 항상 $|F_{y1}|$ 가 $|F_{z1}|$ 보다 크다고 할 수 있다. 같은 방식으로 해석하면 그림 4의 (a)와 같이 홀의 외부에서 접촉이 일어나는 경우에도 식 (1)을 만족하는 μ 와 θ 에 대해서 $|F_{z1}|$ 는 $|F_{y1}|$ 보다 크게 된다. 그림 5에서 볼 수 있는 것과같이 방향오차가 크지않은 경우에는 대부분의 재료의 마찰계수에 대해서 이 조건이 만족됨을 알 수 있다. 이상의 해석에서 일반적인 경우에 대해

서는 힘의 수직방향 성분 ($|F_z|$)과 수평방향 성분 ($\sqrt{F_x^2 + F_y^2}$)을 비교하면 된다.

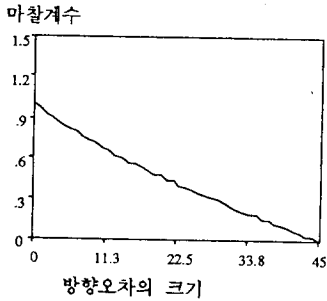


그림 5 Hole의 내부접촉과 외부접촉의 판별을 위한 알고리즘을 만족하기 위한 방향오차의 크기와 마찰계수의 관계

fig 5 a relationship between the magnitude of an orientational error and friction coefficient to distinguish a contact internal to the hole from that of external to the hole

두번째는 그림 4의 (c)에서와 같이 홀내부에서 접촉이 일어나도록 천이된 경우에 수정동작을 어떻게 하느냐하는 문제이다. 이 경우에는 평상모드에서 보았듯이 X_1 방향의 모우멘트 M_x 와 Y_1 방향의 모우멘트 M_y 의 atan2값을 구함으로써 접촉 방향을 판별할 수 있다. 접촉방향을 판별한 후에는 그 방향으로 기울여주면 된다. (즉 방향오차의 수정) 예를들어 그림 4의 (c)의 경우와 같이 $-Y_1$ 축 상에서 접촉이 일어나는 경우에는 X_1 방향으로의 이동은 필요없고 $-Y_1$ 방향으로 $r \cdot r \cdot \cos\theta$ 만큼, $+Rz$ 방향으로 $r \cdot \sin\theta$ 만큼 그리고 pitch는 θ 만큼 이동해주면 된다. (그림 6)

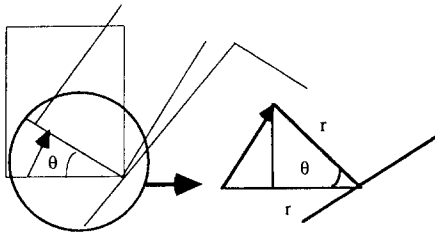


그림 6 Hole내부에서의 수정동작

fig 6 error correction in the hole

3.2.3 평상모드와 경사모드가 공존하는 경우

이 경우의 제어 알고리즘들은 평상모드와 경사모드의 통합이다. 이 작업은 평상모드에서 홀외부의 접촉과 내부의 접촉으로 구별하여 조립작업을 수행한다는 사실로 인하여 쉽게 될 수 있다. 즉 평상모드에서 초기오차가 있는 경우는 모두 홀의 외부에서 접촉이 일어나게 되고 경사모드에서는 외부접촉이 있는 경우는 위치오차만 있다고 생각하고 수정동작을 하므로 평상모드에서의 수정동작과 같게된다. 그러므로 두 모드의 제어 알고리즘들의 단순한 합이된다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 실험조건 및 방법

실험에 사용한 펌은 반경 16.5 mm의 아크릴이고 홀은 반경 17 mm의 두랄루민으로 클리어런스는 0.5 mm이다. 크기를 이와같이 정한 이유는 힘감지기의 감지부분의 크기에 맞추기 위해서이다. 힘감지기의 감지부분이 작은 감지기를 사용하면 펌과 홀의 반경을 줄일 수 있다. 또한 펌과 홀사이의 마찰계수는 실험결과 0.28정도이다. 실험방법은 위치오차와 방향오차의 크기와 방향을 임의로 주고 조립작업이 성공되는가를 보았다.

4.2 실험결과 및 분석

위치오차의 크기는 펌과 홀의 중심 사이의 거리로 나타낼 수 있으며 본 논문의 경우 클리어런스가 0.5 mm이므로 두 중심 사이의 거리가 0.5 mm보다 작거나 같으면 조립작업이 성공할 수 있다. 그림 7의 (a)에서의 선은 로봇이 힘을 감지한 후 수정동작에 따른 X좌표 (X_1)와 Y좌표 (Y_1)의 이동을 나타낸다. 그림의 중간의 원은 조립작업이 성공할 수 있는 X좌표와 Y좌표의 범위를 나타내며 홀의 중심은 (0, 390)이다. 그림7의 (b), (c), (d)에서 수정축은 시간을 나타내며 단위는 로봇이 이동하는 횟수이다.

(b)는 로봇의 Z좌표 (Z_1)를 나타낸다. 로봇의 초기 Z좌표는 52.5 이고 로봇이 접근하여 $-Z_1$ 방향으로의 반발력을 감지함에 따라 다시 초기 위치로 올라가서 수정동작을 한 후 접근을 다시 시도하게 된다.

(c)는 로봇이 홀에 접근함에 따라 감지하게 되는 F_z 방향의 힘을 나타낸다.

(d)는 로봇이 감지하는 모우멘트의 X방향 성분 (M_x)과 Y방향 성분 (M_y)을 나타낸다.

로봇이 홀을 향해 접근함에 따라 (c)에서와 같이 반발력을 감지하고 이때의 모우멘트 성분은 (d)에서와 같다. 이 모우멘트 성분에 따라 접촉방향의 판별을 한 후 (a)에서와 같이 수정동작을 한다. 그 결과 로봇의 위치오차가 0이 됨을 보이고 있다.

방향오차는 로봇의 pitch값이 + 쪽으로 이동해야할 때를 +로, - 쪽으로 이동해야할 때를 -로 잡는다. 그림 8은 초기 위치오차가 180° 방향에서 5 mm의 크기로 일어나며 홀의 방향이 +5° 인 경우를 나타낸다. 이때 (c)는 힘감지기가 감지한 힘을 나타낸다. 첫 5번의 접촉(시간축의 0 ~ 20 사이)에서 $|F_z|$ 가 $|F_y|$ 보다 크게 판별되어 홀의 외부접촉임을 판단하며 (d)에서와 같이 X, Y방향의 모우멘트 데이터로부터 접촉 방향도 판단하게 된다. (a)는 로봇의 Z좌표를 나타내며 (c)와 (d)에서의 판단에 따라 방향오차는 고려하지 않고 위치의 수정동작만을 행한다. 이는 (a)에서 시간축의 0 ~ 20 사이의 로봇의 Z좌표의 변화로 확인할 수 있다. 이 때 (b)에서와 같이 pitch값은 변화가 없다. (a)에서 로봇이 수정동작 후에 계속 홀을 향해 접근해 감에 따라 홀의 내부로 들어가게 된다. 계속 진입해 감에 따라 (c)에서와 같이 다시 반발력이 감지되며 이때에는 $|F_z|$ 가 $|F_y|$ 보다 작게되어 홀의

내부접촉임을 판단하게 되고 (d)에서의 모우먼트 데이터로부터 방향오차의 방향을 판단하게 된다. 방향을 판단한 후에 Z방향의 힘이 규정된 크기보다 크게될 때까지 로봇은 진입을 계속하게 되며 이러한 상태에 도달하면 방향오차를 수정하기 위해 알고리즘에 따라 Z방향의 이동과 pitch값의 변경을 수행한다. (a)에서의 로봇의 Z좌표의 약간의 상승과 (b)에서의 pitch값의 증가는 이러한 과정의 결과이다. 수정동작의 결과 (c)에서의 $|F_z|$ 와 (d)에서의 $|M_x|$ 가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이렇게 $|F_z|$ 와 $|M_x|$ 가 감소하면 로봇은 다시 현재의 pitch의 방향으로 Z방향의 힘이 규정값 이상이 될 때까지 진입을 하고 이후 앞에서와 과정이 반복된다. 로봇이 조립작업이 끝났다고 판단을 했을 때의 로봇의 pitch값은 실제의 방향오차가 $+5^\circ$ 이므로 -83.8° 가 되어야 하지만 (b)에서 볼 수 있듯이 -86.4° 이다. 이는 펌과 홀사이에 클리어런스가 존재하고 또한 로봇 자체에도 기계적인 유연성이 존재하므로 약간의 방향오차가 있을지라도 조립될 부품에 큰 무리가 없이 조립작업이 성공할 수 있음을 보여주고 있다.

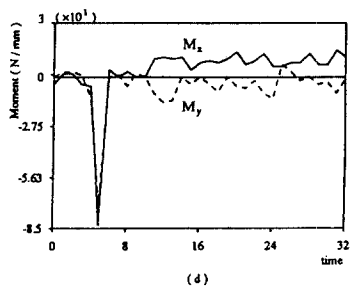
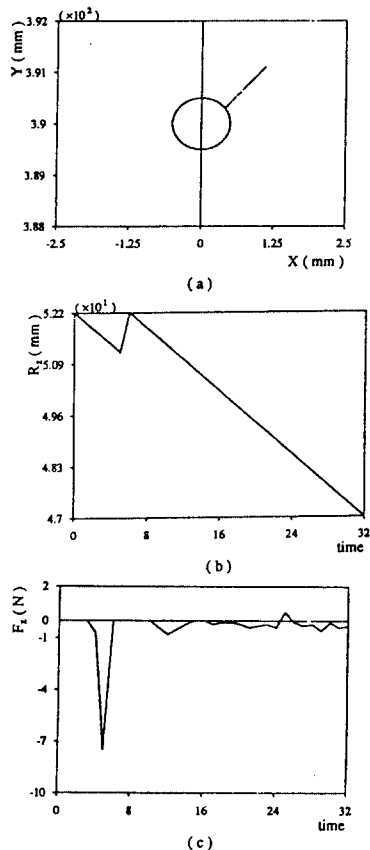


그림 7 실험 결과

초기 위치오차의 크기 = 1mm, 초기 위치오차의 방향 = -135°

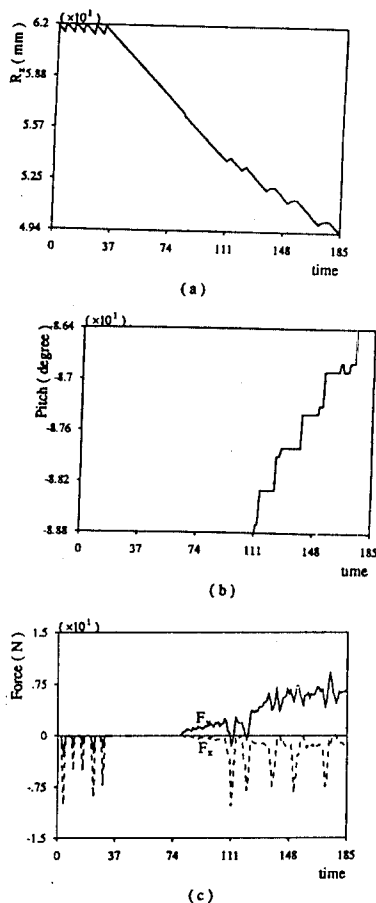
- (a) X, Y 좌표 (X_1, Y_1) (b) Z 좌표 (Z_1)
 (c) Z_1 방향의 힘 (d) X_1, Y_1 방향의 모우먼트

fig 7 experimental results

the magnitude of initial positional error = 1mm,

the direction of initial positional error = -135°

- (a) X, Y coordinate (X_1, Y_1) (b) Z coordinate (Z_1)
 (c) forces of Z_1 direction (d) moments of X_1, Y_1 directions



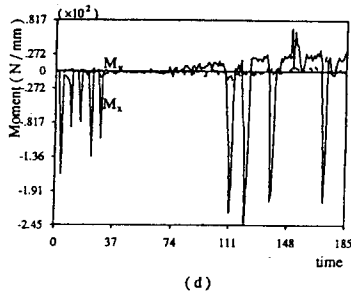


그림 8 실험 결과

초기 위치오차의 크기 = 5 mm, 초기 위치오차의 방향 = 180°

초기 방향오차의 방향 = + 5°

(a) Z 좌표 (Z_1) (b) Pitch 값

(c) Y_1, Z_1 방향의 힘 (d) X_1, Y_1 방향의 모우먼트

fig 8 experimental results

the magnitude of initial positional error = 5mm,

the direction of initial positional error = 180°

the direction of initial orientional error = + 5°

(a) Z coordinate (Z_1) (b) Pitch value

(c) forces of Y_1, Z_1 directions (d) moments of X_1, Y_1 directions

5. 결론

본 논문에서는 6축 힘감지기를 사용한 로봇의 힘 제어 (Force control)의 한 응용으로서 원기둥 형태의 꺾과 홀을 조립하는 작업을 수행하였다. 작업은 평상모드와 경사모드의 두 가지 모드가 동시에 존재하는 경우에 대하여 로봇이 스스로 평상모드인지 경사모드인지를 구별하여 각 상황에 따라 적절한 수정동작을 할 수 있도록 하는 알고리즘의 개발과 실험을 수행하였다. 본논문에에서 개발한 알고리즘은 경사모드의 경우 방향오차의 크기가 제한되는 한계가 있었는데 방향오차의 크기가 제한되지 않는 알고리즘을 개발하는 연구가 진행되어야 하겠으며 꺾과 홀이 원기둥 형태가 아닌 일반적인 형태의 경우에 대하여 조립작업을 할 수 있는 알고리즘의 개발이 필요 하겠다.

참고 문헌

- [1]D. E. Whitney, "Assembly Research", *Automatica*, Vol.16, 1980
- [2]R. Paul, B. Shimano, "Compliance and control", *Proc. of the Joint Automatic Control Conference*, 1976
- [3]M. T. Mason, "Compliance and force control for computer controlled manipulators", *IEEE transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-11, No.6, June 1981
- [4]M. E. Caine, "Assembly strategies for chamferless parts", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol.1, 1989
- [5]C. S. G. Lee, "Force feedback control in insertion process using pattern analysis techniques", *American Control Conference*, 1984
- [6]Tatsuo Goto, "Precise insert operation by tactile controlled robot : HI-T-HAND Expert-2", 4th *ISIR*