

F/T Sensor를 이용한 산업용 로봇에 의한 물체 선단추적에 관한 연구

최성락*, 정광조*

A Study on the Edge Following of Task Object by Industrial Robot Using F/T Sensor

CHOI Sung Lark*, CHUNG Gwang Jo*

ABSTRACT

In this paper, a force control algorithm for edge following task is suggested. Through the contact state modeling between rigid part and end-effector of robot, contact force and contact angle that are essential parameters to build the control strategies for following movement of end-effector are derived. From these two parameters, we discriminate the every contact state into 8 cases and calculate the new moving position and direction simply. For the experiment, RX90 robot from **Stäubli** with robot language V⁺ is applied and F/T sensor is attached to the wrist of robot with RCC. Finally, 3 edge following experiments including the following of corner point are executed with successful results.

Key Words : Force control(힘제어), Edge following(선단추적), Robot(로봇),
Contact state and direction(접촉상태 및 방향)

1 서론

산업용 로봇의 end effector는 유체의 분사나 비접촉 검사와 같은 특수한 경우를 제외하고는 필연적으로 대상 물체 또는 주변설비와 어떤 크기의 접촉력으로 만나게 된다. 이 접촉은 제어기의 고장이나 또는 잘못된 작업위치 및 경로의 지령에 의하여 발생하는 충돌, 또는 비정상적인 접촉 등 원활한 작업을 위하여 피해야할 경우와 접촉식 probe를 이용한 위치측정, 부품의 조립작업, 대상물

체의 파지 등 접촉의 상태와 특성을 능동적으로 측정하고 해석함으로써 지능적인 제어전략(control strategy)을 수립하는 경우가 있다. 전자의 경우는 접촉이 이루어지기 전의 상태를 미리 파악하여야 하므로, 영상신호나 초음파 센서 등 비접촉식의 센서를 이용한 로봇의 충돌회피(collision avoidance)방법이 주요 목표가 되므로 실제적인 접촉의 상태에 대한 해석은 별개의 문제로 취급될 수 있다. 반면에, 후자와 같이 접촉상태 발생 이후의 문제를 다루는 능동적 컴플라이언스 제어(Active Compliance

* 한국기계연구원 자동화연구부

(Control)⁽¹⁾에 있어서는 힘/토크 센서 (Force/Torque Sensor), strain gauge, tactile sensor와 같은 접촉식 센서를 사용하여 물체간의 접촉상태를 정성적 및 정량적으로 추출할 필요가 있으며 이 중 strain gauge의 원리를 응용하여 3차원의 force와 torque정보를 정량적으로 감지할 수 있는 F/T센서가 로봇의 지능접촉작업에 가장 보편적으로 사용되고 있다. 조립작업에서의 접촉상태 해석은 1960년대 Laktionev와 Andreev⁽²⁾에 의하여 처음 연구되었으나 본격적으로 산업용로봇 또는 자동조립기계를 전제로 하는 부품결합 및 접촉상태에 관한연구는 Simunovic⁽³⁾, Goto⁽⁴⁾, Ohwovoriole 와 Roth⁽⁵⁾에 의하여 jamming과 wedging접촉의 개념이 수립되었고, Whitney⁽⁶⁾는 실제적인 응용 차원에서 접촉력(force)과 토크(torque)신호를 이용하여 요철형부품의 삽입작업(peg-in-hole)에서의 두 부품간의 접촉상태를 파악할수 있는 해석모델을 완성하였다. 또한 Paul⁽⁷⁾과 Craig⁽⁸⁾는 로봇의 end-effector에 걸리는 접촉력과 위치, 속도의 궤환지령을 동시에 제어하는 hybrid 방식을 제안하여 실제 로봇의 kinematics와의 결합을 가능하게 하였다. 본 논문에서 다루고자 하는 물체의 선단추적(edge following)은 위에서 언급한 대상물체 즉, 대상부품과 end effector 간의 접촉력을 일정한 크기로 유지하면서 대상물체의 형상을 따라 추적하는 능동적 컴플라이언스(active compliance)의 한 유형으로서 측정이나 조절등 지능작업의 예비 정보를 추출하기 위한 기능이다. 이 중중인 end-effector의 연속적인 접촉상태는 대상부품과 end-effector간의 마찰력⁽⁹⁾, 미끄럼(sliding)⁽¹⁰⁾등의 동적인 특성에 크게 좌우되므로 RCC (Remote Center Compliance)⁽¹¹⁾를 사용하여 이를 완화시키는 한편, 단위이동후의 정지점에서 감지한 접촉력으로부터 접촉의 상대 및 일정 접촉력의 유지를 위한 보정위치 data를 단위 이동량과 이동방향의 형태로 추출하여 로봇의 다음 이송 좌표값으로 유도한다. 본 논문에서는 이러한 조건에서 지능 로봇의 선단추적기능을 위하여 F/T 센서를 이용, 능동적인 힘 제어 알고리즘을 개발하고 이를 이용하여 실제 로봇에서 선단추적기능을 실현하기 위한 방안을 제시한다.

2 접촉력의 모델링

F/T sensor를 RCC(Remote Center Compliance)와 조합하여 end-effector를 구성하고, 이를 대상물체에 변형방향과 동일방향으로 접촉시켰을 경우, 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

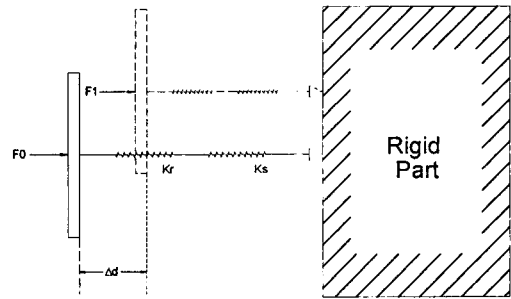


Fig.1 Contact Force Modelling of F/T sensor & RCC

여기서 F_0 를 초기 접촉력으로 하고 접촉력을 증가시켜 변형을 가중시켰을 때의 접촉력을 F_1 이라고 한다면, 위치 변형값 Δd 로부터

$$(F_1 - F_0) = (K_r + K_s) \cdot \Delta d \quad (1)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서, K_r 은 RCC의 탄성계수이며, K_s 는 F/T sensor의 탄성계수이다.

초기 접촉력 F_0 의 초기값을 0, 즉 접촉력이 0인 최초의 접촉력을 기준으로 하면, 식(1)에서,

$$F_1 = (K_r + K_s) \cdot \Delta d \quad (2)$$

을 만족한다. 원하는 접촉력의 크기를 F_D 라고 한다면, 일정한 접촉력내로 유지시키기 위하여

$$|(K_r + K_s) \cdot \Delta d| \leq F_D \quad (3)$$

이 되도록 Δd 의 크기를 경로연산에 따른 end-effector의 위치지령으로 제어한다.

3 접촉력 제어 알고리즘

3.1 2차원 평면상의 접촉력 해석

로봇의 end-effector가 대상물체의 외형을 추적하려면, 대상물체와 접촉해서 그때마다의 힘을 측정하여 다음 경로를 계산해 내야 한다. 이와같이 end-effector가 대상물체에 접촉할 경우, 접촉하는 각도에 따라, 또는 대상물체의 외형에 따라 각 상태가 다르게 결정되어 진다. End-effector가 XY평면상의 선단을 추적할 때 각 축에 대한 힘의 분력, 즉 F_x , F_y 를 F/T sensor를 통해서 알 수 있으

며, 이 값으로써 현재 주어진 상태에서의 접촉력과 진행 방향을 판별해 내야 한다.

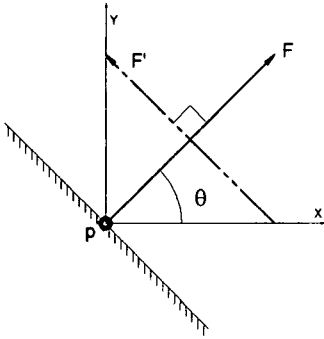


Fig. 2 Force F & It's Direction F'

그림 2와 같이 대상물체에 법선방향의 힘 F 로 접촉점 P 에서 접촉하였다면 F 의 각 축에 대한 분력 F_x, F_y 로부터 접촉력 F 와 XY 평면상의 접촉각 θ 를 구할 수 있다.

$$F_x = F \cos \theta(t) \quad (4)$$

$$F_y = F \sin \theta(t) \quad (5)$$

점 P 에서의 전체 접촉력 F 는,

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (6)$$

F_x, F_y 는 F/T sensor에서 측정된 값이므로, θ 는,

$$\tan \theta = \frac{F_y}{F_x} \quad (7)$$

$$\therefore \theta = \tan^{-1} \left(\frac{F_y}{F_x} \right) \quad (8)$$

으로 구해진다.

그 다음으로 선단추적에 필요한 진행방향은 그림 2의 접촉력 F 의 접선방향이 된다. 즉, 선단추적방향의 진행각 θ_p 는,

$$\theta_p = \theta \pm \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

의 2가지로 나타나고, 방향의 선택은 선단추적을 시작할 때에는 사용자가 지정해 주고, 선단 추적 진행중에는 코너

링에 의해 방향이 전환되는 경우를 제외하고는 바로 전 step에서의 방향을 고려하면 된다.

그림 3은 2차원의 선단추적에서는 나타나는 총 8가지의 경우를 도식화 한 그림이다. 각 경우는 접촉각의 사분면에 따라 접촉각 및 진행각의 부호를 결정해 주어야 한다.

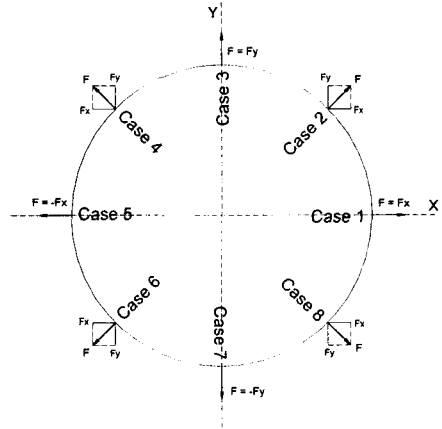


Fig. 3 Contact states with object

3.2 3차원에서의 접촉상태 모델링

3.1절에서는 로봇의 end-effector가 선단을 추적할 때 XY 평면에 대해서만 알아보았다. 추적할 선단이 평면일 경우에는 이것만으로도 충분히 선단을 추적할 수 있다. 그러나 추적할 선단이 3차원일 경우, 즉, XY 평면 뿐만 아니라 Z 축상의 선단도 추적해야 할 필요가 있다. 3.1절에서 고려한 2차원상의 선단추적을 3차원으로 확장하면, 그림 4와 같이 정육면체 구조로 해석할 수 있다. 이 경우,

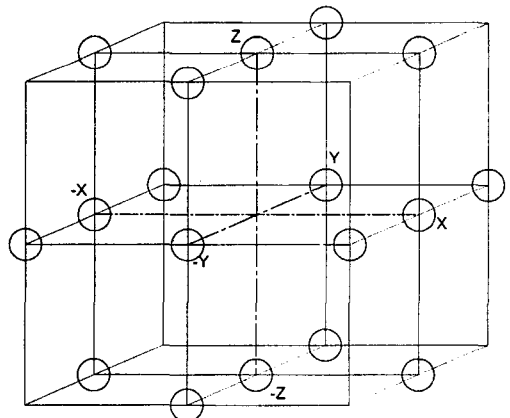


Fig. 4 Extended Contact States to 3 Dimension

2차원에서의 8가지 경우는 3차원에서는 18개의 경우로 나뉠 수 있다. 본 연구에서는 우선 2차원의 평면상의 선단추적을 목표로 하고 있으므로, 3차원 추적에 대한 상세한 언급은 생략한다.

3.3 진행방향 결정 알고리즘

End-effector가 선단에 접촉하고 있을때, 현재 접촉상태에서 그 다음 step으로의 진행방향은 그림 3으로부터 결정할 수 있다. 그림 3에서 case 2, 4, 6, 8은 현재 진행방향에서 사용자가 원하는 접촉력, F_D 를 유지하면서 계산된 진행각 θ_p 로 진행하면 되고, case 1, 3, 5, 7에서는 센서로부터의 접촉력 F_s 의 부호변환을 통하여 모서리에서의 방향전환을 도모한다. 즉, 식(2), (3)에서 센서로부터 검출된 접촉력을 F_s 라고 하면, 접촉력 일정제어의 조건은

$$|F_s| \leq F_D \quad (10)$$

가 되는데, F_D 의 값은 항상 양의 값으로 볼 수 있으므로, 측정된 접촉력 F_s 의 부호에 따라 음인 경우 부호를 변환시켜 그 절대값을 취한다. 여기서 F_s 는 식(6)과 같고 식(3)에서 K_r, K_s 는 상수이기 때문에, end-effector가 움직여야 할 거리 Δd 를 구할 수 있다. 즉,

$$F_s = (K_r + K_s) \cdot \Delta d \quad (11)$$

$$\therefore \Delta d = (K_r + K_s)^{-1} \cdot F_s \quad (12)$$

Case 2, 4, 6, 8에서, 접촉각 θ 는 식(8)로 구할 수 있는데, 식(8)로 구할 수 있는 θ 의 범위는 $-\pi \sim \pi$ 이므로, case 6과 8은 구별이 불가능하다. 따라서, 이들을 구별하려면, 각 축에 대한 접촉력의 분력의 부호를 고려하면 된다. 즉, 식(8)과 다음의 표 1을 참조하여, 현재 접촉각의 부호를 판별해 낼 수 있다.

표 1에서 DC는 Don't Care condition으로서, 이 값이 접촉각 θ 에 영향을 끼치지 않을 만큼의 작은값인 경우이다. 실제로 선단추적시, 이 값은 현재 접촉상태를 파악할 때 사용되는 것이므로, case 1, 3, 5, 7에서의 접촉각값은 중요치 않다.

4 F/T 센서 신호 해석

본 논문에서 사용된 F/T sensor는 미국 Assurance Tech.사의 6축 센서로서, 자체의 전용 제어기와 전용 명

Table 1. Torch Processing Direction with Contact States

Case	Sign of F_x	Sign of F_y	Contact Angle(θ)
case 1	Positive	DC ¹	0
case 2	Positive	Positive	$0 < \theta < \frac{\pi}{2}$
case 3	DC ¹	Positive	$\frac{\pi}{2}$
case 4	Negative	Positive	$\frac{\pi}{2} < \theta < \pi$
case 5	Negative	DC ¹	0
case 6	Negative	Negative	$-\pi < \theta < -\frac{\pi}{2}$
case 7	DC ¹	Negative	$-\frac{\pi}{2}$
case 8	Positive	Negative	$-\frac{\pi}{2} < \theta < 0$

령어를 가지고 있어 PC와 연계하여 다양한 기능을 구현할 수 있으며, 그 사양은 다음 표와 같다.

Table 2. Specification of the F/T Sensor

Specification	Values
Sensing Ranges	
Force range, ($\pm N$)	130
Torque range, ($\pm Nm$)	10
Resolution	
$F_x, F_y, (N)$	0.10
$F_z, (N)$	0.20
$T_x, T_y, T_z, (Nm)$	0.005
Stiffness	
$K_x, K_y, (N/m)$	8.8×10^6
$K_z, (N/m)$	17×10^6
$K_{t_x}, K_{t_y}, (Nm/rad)$	10×10^3
$K_{t_z}, (Nm/rad)$	16×10^3

F/T sensor에서는 각각 3축에 대한 force와 torque값이 출력되는데, 이 중에서 식(8)에 필요한 F_x, F_y 값을 이용한다. 2차원에서는 그림 3에서 설명한 바와 같이 총 8개의 경우가 나올 수 있다. 이 중 case 1, 3, 5, 7은 모서리 끝에 있는 경우를 설명하며, case 2, 4, 6, 8은 선단 중간을 추적할 때의 경우를 말한다.

각 경우에 대한 접촉각 계산에 필요한 F_x, F_y 의 부호는 표 1과 같이 정리된다. 각 상태에 대해서 설명하면 다음과 같다.

Case 1) 모서리에 접촉하고 있는 상태이다. $F_s = F_x$ 이며, F_y 는 0이거나 0에 매우 가까운 값을 갖는다. $\theta = 0$ 이므로 쉽게 상태를 판별할 수 있으나, case 5와 같은 값을 갖는다. 따라서, 이때에는 F_x 의 부호로 구별을 하여, 양의 값이면

case 1)이고, 음의 값이면 case 5)이다. F/T sensor에서 느껴지는 힘 F_s 는 거의 X축 방향만 있으므로, 사용자가 지정한 힘 F_D 로 유지시키려면 end-effector를 X축의 방향으로 값이 크면 (-)방향으로, 작으면 (+)방향으로 움직여 주면 된다. 진행방향에 대해서는, F_s 의 법선방향으로 두가지 방향이 존재하게 된다. 만일 선단추적을 처음 시작한 상태라면, 사용자가 지정을 해주어야 하고, 진행중이라면, 바로 전 step의 상태를 고려하여 방향을 판단한다.

Case 2) F_x, F_y 값 모두 양의 값을 갖는다. 이때의 접촉각 θ 는 $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ 의 범위를 갖으며, 접촉력의 부호나 접촉각은 모두 다른 경우와 다르므로 쉽게 판별해 낼 수 있다. 이때에는 원하는 접촉력 F_D 를 먼저 보상하기 위하여 end-effector를 움직여 주고, 이후에 진행방향으로 진행하게 된다. 진행방향은 X축으로는 감소하는 방향으로, Y축으로는 증가하는 방향으로 진행하게 된다.

Case 3) Case 1)과 마찬가지로 모서리에 있지만, 이번에는 $F_s = F_y$ 인 경우이다. F_D 값을 유지하기 위해서 Y축 방향의 움직임만이 있다. Case 1)과 마찬가지로 진행방향은 사용자가 지정을 하거나, 바로 전 step의 상태를 고려한다.

Case 4) F_x 는 음의 값(negative)이고, F_y 는 양의 값인 경우이다. 진행방향은 X축, Y축 모두 감소하는 방향으로 진행한다.

Case 5) $F_s = -F_x$ 인 경우이다. Case 1, 3)과 비슷하다.

Case 6) F_x, F_y 모두 음의 값을 가진 경우이다. 진행방향은 X축으로는 감소, Y축으로는 증가하는 방향으로 진행한다.

Case 7) $F_s = -F_y$ 인 경우이며, Case 1, 3, 5)와 비슷하다.

Case 8) F_x 는 양의 값, F_y 는 음의 값을 가진 경우이다. 진행방향은 X축으로는 증가, Y축으로는 감소하는 방향으로 진행한다.

위의 8가지 경우에서 Case 1, 3, 5, 7)은 특별한 경우로서, F_s 의 값이 F_x 이나 F_y 의 절대값과 같고, 다른 값은 0이거나 0에 매우 가까운 값을 갖는 경우이다. 이런 경우는 직선의 선단을 추적하는 경우, end-effector가 선단에 수직으로 접촉하고 있는 경우에 나타난다. 이때의 접촉각은 0이나 무한대이어서 선단을 추적하는데 의미가 없고, 단지 F_D 에 맞게 위치를 조정한 후, 진행방향을 결정한다. Case 2, 4, 6, 8)은 F_x, F_y 의 값과 그 부호를 참조해서 현재 어느방향으로 진행하고 있는지를 알아낸다.

5. V^+ 를 이용한 경로 생성

V^+ 란 *Stäubli*사에서 제작한 로봇 제어기에 내장된 로봇 전용 언어이다. 이 언어는 VAL II란 *UNIMATION*사의 제품을 향상시킨 언어로써, 본 연구에서 필요로 하는 실시간으로 경로를 변경하는 ALTER기능이 있는데, 이를 이용하면 쉽게 경로를 변경할 수 있다. 즉, 일정한 접촉력으로 이동중에 변화하는 접촉력을 이용하여 그에 상응하는 거리로 변환하여 ALTER routine에 대입하면 된다. ALTER기능은 다음과같은 형식의 인자를 받아들인다.

$$ALTER \quad D_x, D_y \quad (13)$$

위에서 D_x, D_y 는 원하는 이동거리의 offset양이다. 이들 인자에 값을 넣어주면 위의 ALTER명령은 현재 제어기에서 시간이 많이 걸리는 연산을 하던지 실제 로봇이 움직이고 있는중이라도 즉시 위의 명령을 실행하여 실시간으로 로봇의 경로를 변경한다. 따라서, 위의 명령을 이용하여, 인자에 필요한 값을 대입하기 위하여, end-effector에서 느껴진 힘을 이동량 정보로 환산할 필요가 있다.

따라서, 본 논문에서는, 위의 ALTER기능을 사용하기 위해 식(12)를 사용하여 end-effector가 움직일 거리를 계산하였다.

6. 지능접촉의 기능 실험

6.1 H/W 구성

선단추적 실험에 사용한 H/W는 *Stäubli*사의 RX-90 로봇과 그 제어기, Assurance Tech.사의 F/T sensor와 그 제어기, 그리고 Master/Slave tool changer등이 있

다(그림 5). 전체 시스템 구성은 그림 6의 블록도와 같다.

PC는 host computer로, F/T sensor의 데이터를 F/T제어기에서 받아 로봇 제어기로 보내는 역할을 한다. PC는 이때 자체에 내장된 RS-232C port 2개를 모두 이용하여 통신을 한다. PC에서는 data 송수신역할 이외에 F/T sensor data를 file로 저장하는 역할도 한다. 로봇과 로봇 제어기, F/T sensor와 F/T 제어기는 각각 전용 line으로 연결되어 있다. 로봇의 end-effector에는 F/T sensor와 RCC(Remote Center Compliance), 그리고 Master tool changer가 연결되어 있다. Tool changer

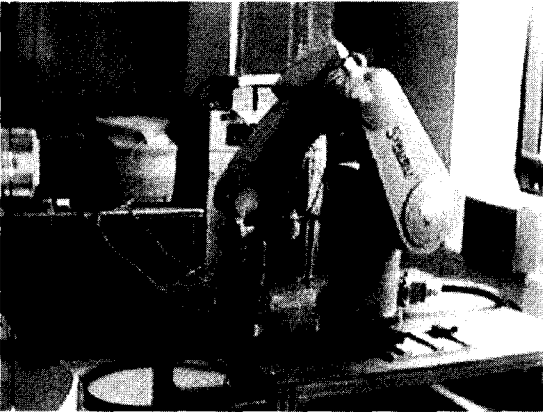


Fig. 5 Picture of the Hardware

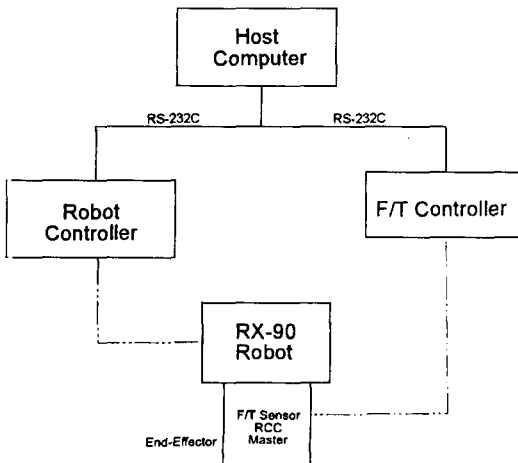


Fig. 6 Constitution of Hardware

는 master/slave구조로서, master는 end-effector에, 그리고 slave는 tool에 연결해서 서로 공압으로 작동하는 구조로 되어있다. RCC는 F/T sensor를 충격으로 부터 보호하는 역할과 더불어 수동적인 compliance를 제공한다.

6.2 실험조건및 방법

선단추적 실험의 대상물체는 로봇의 작업테이블에 고정되어 있는 직사각형형태의 air-vice로 하였다.(그림 7)

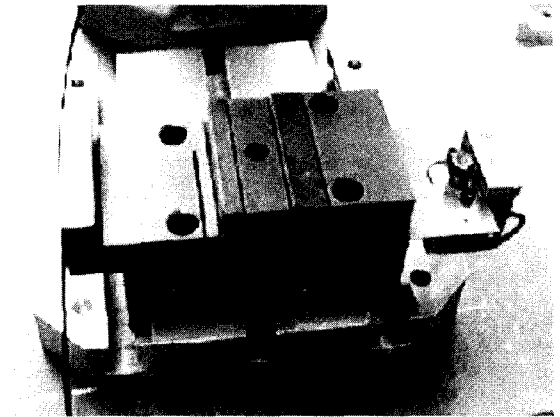


Fig. 7 Air-Vise, the object

전체실험의 진행은 로봇 주제어기에서 V 언어로 작성된 알고리즘(그림8)에 따라 이루어 지게 되고, 사용자는 초기위치와 원하는 접촉력 F_b 를 입력시킨다. 로봇은 이 data를 기초로 처음 위치로 이동하고, 그 다음부터는 스스로 F/T sensor의 data를 받아 움직이게 된다. 매 사

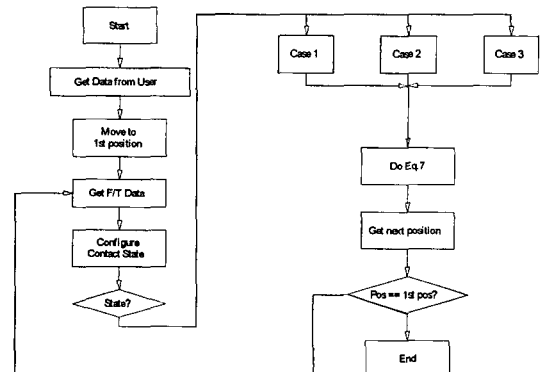


Fig. 8 Flowchart of the simulation algorithm

이클 마다 현재의 위치에서의 F/T data로 현재의 접촉 상태를 판별하고, 느껴진 힘과 기준힘의 차이만큼 식 (12)를 이용하여 이동한다.

6.3 실험결과 및 고찰

6.2절에서 설명한것을 토대로 X축, Y축에 대한 선단추적 실험을 각각 행하였다. 그림 9는 대상물체의 좌표계와 실험의 진행방향을 나타내고 있다.

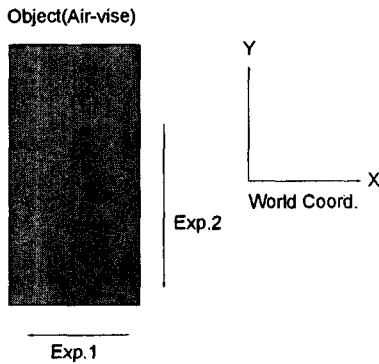


Fig. 9 Coordinate System & Direction of the simulation

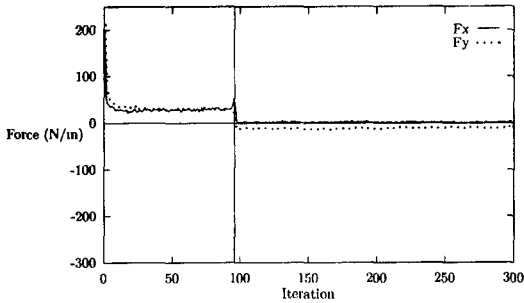


Fig. 10 Force values when the tip moves to -X axis

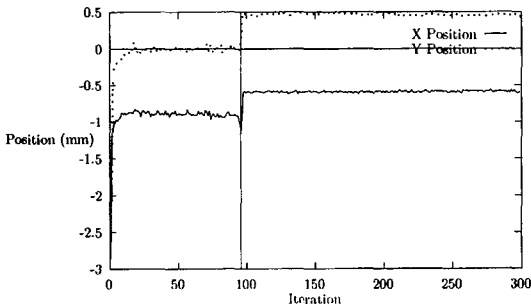


Fig. 11 Position value when the tip moves to -X axis

그림 10, 11은 -X축으로 이동시킬 때의 force값과 이동한 변위값을 나타내며, 그림 12, 13은 -Y축으로 이동시킬 때의 force값과 이동한 변위값을 나타낸다. 그림 10, 11은 $F_{Dx} = 30, F_{Dy} = 30$ 으로 일정한 값을 유지하도록 했고, 그림 12, 13은 $F_{Dx} = -50, F_{Dy} = 20$ 으로 유지시키도록 하였다. 이 후, 모서리를 추적하는 실험을 행하였다. 모서리를 추적하는 것은, X, 또는 Y축의 force값이 급격하게 변하므로 기준되는 값의 부호를 식 (10)에 따라 바꾸어야 한다. 그림 11에서는 X축으로는 일정한 값 -1정도로 계속해서 전진하다가 그림 10에서와 마찬가지로 contact을 잃는 모습을 볼 수 있다. Y축으로는 그림 10에서와 같이 일정한 force만 유지하고 이동변위는 0에 가깝게 움직이다 접촉을 잃는 순간부터는 원하는 방향으로 이동치 못하는 모습을 볼 수 있다.

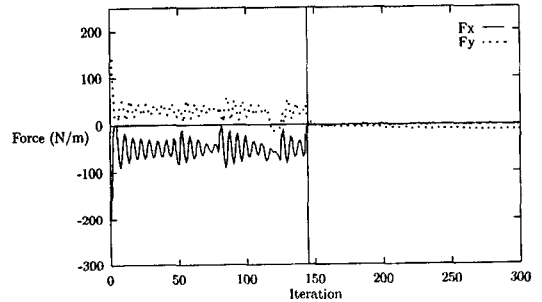


Fig. 12 Force value when the torch moves to -Y axis

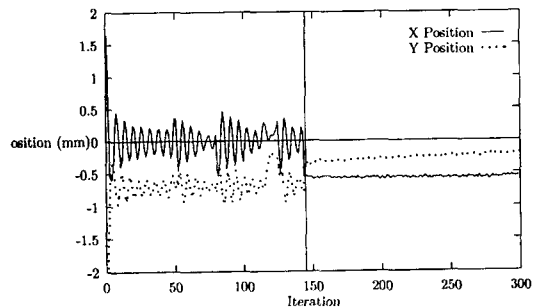


Fig. 13 Position value when the torch moves to -Y axis

두번째 실험에서는 -Y축으로 이동하는 모습을 보인다. 그림 12에서는 그림 10과는 다르게 force값이 진동하는 모습을 보인다. 이는 대상물인 air-vise가 Y축 방향에 일정한 평면이 아니고 여러개의 부품으로 이루어져 있어 요철이 있기때문으로 생각된다. 그러나, X축, Y축 방향의

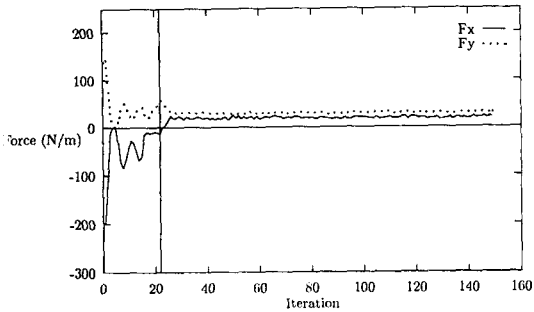


Fig. 14 Force values when the torch is around the corner

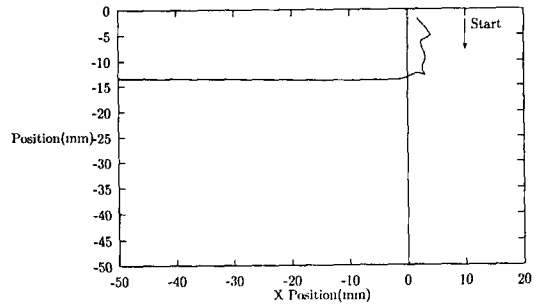


Fig. 16. Position values after tracing the corner

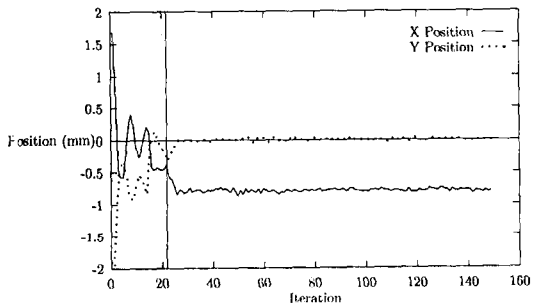


Fig. 15 Position values when the torch is around the corner

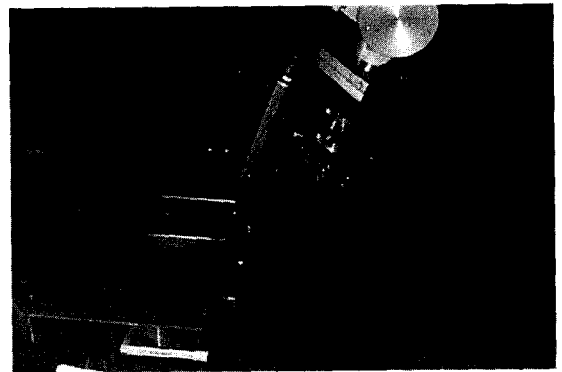


Fig. 17 Picture of edge following

일정한 force값을 유지하는 모습은 볼 수 있다.

다음은 모서리를 도는 실험을 해보았다. -Y축으로 진행하다 모서리를 돌고 -X축으로 도는 실험으로서, 실험 2와-1의 연결과정으로 볼 수 있다. 그림 14를 보면, 25번 제쯤에서 모서리를 도는 모습을 볼 수 있다. 초기에 지정 한 값은 실험 2에서와 마찬가지로 $F_{Dx} = -50$, $F_{Dy} = 20$ 으로 주어 -X축 방향으로 진행하게 했다. 그림 14를 보면, F_x 의 부호가 바뀌어 (+)로 값을 유지하는 모습을 볼 수 있다. 그림 15를 보면, 실험 2에서와 마찬가지로 -Y축 방향으로 모든 진동을 하나 모서리를 돈 후에는 -X축으로만 일정하게 이동을 하는 모습을 볼 수 있다. 다음 그림 16은 실험을 한 후, data로 모서리를 추적한 X, Y좌표를 토대로 추적한 모습을 그린것이다. 이 그림을 보면, X축으로는 큰 변화없이 모습을 그렸으나 Y축으로는 모양이 일정치 않고 울퉁불퉁하다. 이는 실험 2에서와 마찬가지로 추적대상인 air-vice의 표면이 일정치 않고 요철이 있어서 생긴것으로 생각된다.

그림 17은 선단추적 실험의 중간과정을 보이고 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 로봇에 F/T sensor를 부착하여, 물체의 선단을 추적하는 방법에 대해서 알아보았다. *Stäubli*사의 RX-90 로봇에 F/Tsensor를 부착하고, 여기서 data를 받아 현재 상태에서 다음 방향으로 진행하는데에 상태를 물체와 접촉하고 있는 각으로 판별하여 ALTER 명령을 사용하여 실시간으로 이동할 수 있도록 하였다. 로봇의 제어기와 F/T sensor제어기간에는 PC를 host로 하여 RS-232C를 통해 서로 data를 주고 받을 수 있도록 하였다. 6.3절에서 본것과 마찬가지로 본 논문에서 제시한 알고리즘으로 3가지 실험을 한 결과, X축으로는 별 무리없이 선단을 추적하는 모습을 보였고, Y축으로는 추적 대상물이 갖고있는 모양에 의해 소폭의 진동을 보였으나 추적은 가능하였다. 마지막 실험에서는 모서리를 추적하는 모습을 보였다. 실험에서 보면 일정한 평면을 가진 대상을 추적할 때는 거의 오차없이 정확한 모습으로 추적할 수 있었으나, 요철이 있으면 진동을 하는 모습을 보였다. 이는 선단 추적시 사용한 torch의 모양과 추적할 당시의

로봇의 진행속도, 그리고 sampling time에 의해서 변할 수 있는 현상으로, torch를 좀더 세밀한 것을, 그리고 sampling time을 빠르게 한다면 좀더 정확한 모습으로 선단을 추적할 수 있을것으로 기대된다. 따라서 본 논문의 실험결과는 실제 응용 작업— deburring작업이나 물체외형의 추출—등에 적용할 수 있을것으로 기대된다. 향후 연구과제로는 3차원에서 선단을 추적할 수 있도록 그림 4의 경우를 해석하는 문제와 torch의 orientation문제를 해결해야 하며, 시작시에 진동하는 문제를 해결하고, 다양한 물체를 대상으로 선단을 추적하면서, 물체의 외형의 추출, 크기의 추출등의 알고리즘을 개발해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. N. Onda, K. Asakawa, T. Kamada, "Precise Robotic Assembly using Active Compliance Control", *Proc. 16th. ISIR*, Brussels, Belgium, pp.445-453, 1986
2. N. M. Laktionev, G. Y. Andreev, "Automatic Assembly of Parts", *Russian Engineering J.*, Vol. 46, No. 8, pp 40-43, 1966.
3. S. N. Simunovic, "Parts Mating Theory for Robot Assembly", *Proc. of 9th ISIR*, U.S.A., pp183-193, 1979.
4. T. Goto, K. Takeyasu, T. Inoyama, "Control Algorithm of Precision Insertion Operation Robots", *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, Vol. 10, No. 1, 1980.
5. M. S. Ohwovorole, J. W. Hill, B. Roth, "On the Theory of Single and Multiple Insertion in Industrial Assembly", *Proc. of 10th ISIR*, Manila, Italy, pp545-558, 1980.
6. D. E. Whitney, "Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts", *J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 104, Mar, pp65-77, 1972.
7. R. Paul, "Problems and Research Issues Associated with the Hybrid Control of Force and Displacement", *IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, 1987.
8. Raibert M. H., Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators", *ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 102, 1981.
9. V. T. Rajan, R. Burrige and J. T. Schwartz, "Dynamics of Rigid Body in Friction contact with Rigid Walls", *Proc. of IEEE Int. Conf. of Robotics and Automation*, Vol. 2, pp671-677, 1987.
10. M. A. Peshkin and A. C. Sanderson, "Planning Robotic Manipulation Strategies for Sliding Objects", *Proc. IEEE Int. Conf. of Robotics and Automation*, Vol. 2, pp1047-1053, 1987.
11. R. S. Drake, P. C. Watson, S. N. Simunovic, "High Speed Robot Assembly of Precision Parts using Compliance Instead of Sensory Feedback", *Proc. of 9th. ISIR*, U.S.A., pp135-152, 1979.
12. 최성락, "F/T Sensor를 이용한 PUMA로봇의 제어", '95한국자동제어 학술회의 논문집, 1995.
13. Stäubli Co., "V+ Operating System Programmers Guide", 1994.
14. Stäubli Co., "RX-90 Installation Guide", 1994.
15. Assurance Technology, "F/T Sensor Users Guide", 1991.