

## 힘 제어를 위한 로봇과 F/T 센서간의 인터페이스 소프트웨어 개발

### Development of Interface software between Robot and F/T Sensor system for Force Control

장 완 식(조선대), 김 호 윤\*, 이 성 민, 주 철(조선대 대학원)

W.S. Jang(Cho-sun Univ.), H.Y. Kim\*, S.M. LEE, C. Joo(Graduate School, Cho-sun Univ.)

#### Abstract

The objective of this paper is to present the development and application of interface software between robot and F/T sensor for force control. The interface software for among the robot controller, F/T sensor, and host PC is based on interrupt-driven method. To show the suitability of developed interface software, writing-task is performed in real time using F/T sensor that mounts on the wrist of the robot and Scara type 4-axis robot.

#### 1. 서 론

산업용 로봇이 1980년대에 보급된 이후로 전자, 컴퓨터 및 로봇기술의 발전과 제어이론 및 하드웨어 기술의 발전은 산업용 로봇의 보급을 가속화 시켜왔으며, 종래의 단순한 교시 개념으로부터 불확실한 작업환경의 변화 등에 능동적으로 대응할 수 있는 시스템이 요구되었다.

현재 대부분의 생산 자동화 시스템에 활용되는 일반 로봇시스템은 서보 위치 제어 등의 단순 제어방식에 의존하여 물체이동 등의 단순작업에 많이 활용되고 있다<sup>(1)-(2)</sup>. 그러나 최근 들어 조립 자동화에 대한 필요성은 조립 공정이 생산공정에서 매우 중요한 부분을 차지하므로 계속적으로 증대되고 있다. 실질적으로 정밀하지 않은 조립 작업에 있어서는 머신 비전만으로도 원하는 작업을 할 수 있으나 이를 이용하는 경우에는 정확도에 한계가 있으므로 정밀한 조립작업에 알맞은 F/T센서가 필요하다.

로봇과 F/T센서를 사용하여 조립 작업중 발생하는 부품파손과 작업시간 지연 등으로 인한

생산성 저하 등의 문제를 해결하기 위한 노력을 하고 있다. 그 일환으로 접촉이 일어나는 경우 접촉상태를 F/T 센서를 통하여 힘과 토크를 측정하여 조립하려는 물체들 사이의 위치관계를 알아내는 제어 알고리즘을 개발, 조립공정에서 사용되는 로봇 시스템과 로봇 손목 등의 콤플라이언스(Compliance)의 측정을 위한 모델 개발 및 이를 활용하는 제어 알고리즘 개발 등의 연구가 활발하게 이루어지고 있다<sup>(3),(4)</sup>.

이리하여 본 연구는 로봇시스템과 F/T센서간의 인터페이스 소프트웨어를 개발하여 불확실한 작업환경에서 조립작업이 정상적으로 이루어지게 하고자 한다. 개발된 인터페이스 소프트웨어의 적합성은 F/T 센서를 부착한 로봇을 사용하여 글쓰는 작업을 수행함으로써 보여준다.

#### 2. 로봇 시스템과 F/T 센서 해석

##### 2.1 로봇시스템의 정기구학 해석

Fig.1은 본 연구에서 사용된 삼성 스카라형 4축 로봇의 형상을 보여준다.

이 로봇에 대한 기저 좌표계에서 마지막 링크까지의 변환 행렬은

$${}^0_4T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T$$

$$= \begin{bmatrix} c_4 c_{12} - s_4 s_{12} & -s_4 c_{12} - c_4 s_{12} & 0 & a_2 c_{12} + a_1 c_1 \\ c_4 s_{12} + s_4 c_{12} & -s_4 s_{12} + c_4 c_{12} & 0 & a_2 s_{12} + a_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 - d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

이다. 여기서,  ${}^{i-1}_i T$ 은  $i-1$ 에서  $i$ 번째 관절까지의 변환행렬을 뜻한다. 마지막 링크 원점에서 말단 효과장치까지의 위치벡터는  ${}^4P = (x, y, z)^T$  라 한다. 이리하여 기저 좌표계에 대한 로봇 말단부

임의의 지점까지의 위치 벡터는 다음 식을 이용하여 쉽게 구할 수 있다.

$$F = {}^0_4T \cdot {}^4P \quad (2)$$

혹은,

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{124}x - s_{124}y + a_2c_{12} + a_1c_1 \\ s_{124}x + c_{124}y + a_2s_{12} + a_1s_1 \\ z + d_1 - d_3 \\ 1 \end{bmatrix}$$

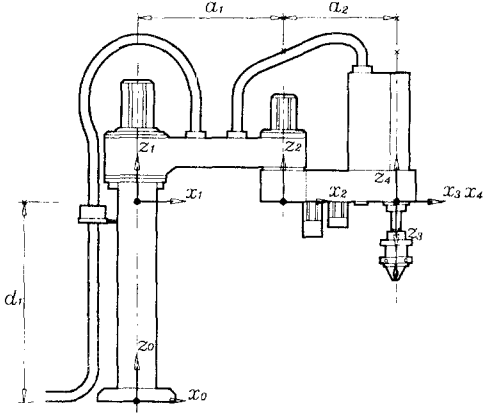


Fig.1 Configuration of Scara type 4-axis robot.

## 2.2 로봇시스템의 역기구학 해석

역기구학은 주어진 로봇의 원하는 지점의 위치  $F_d (X_d, Y_d, Z_d)$ 에 대한 로봇 각 관절의 회전각도를 구하는 것이다. 여기서 사용되는 비선형 방정식의 해를 구하기 위하여 Newton-Raphson법을 이용하였으며 그 절차는 다음과 같다.

단계 1) 적절한 초기 예측치  $(\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4)$ 를 선택한다.

단계 2) 아래의 정의된 함수  $f_i$ 를 식(2)을 이용하여 Newton-Raphson 법에 적용한다.

$$f_i = {}^0_4T \cdot {}^4P - F_d = \begin{bmatrix} c_{124}x - s_{124}y + a_2c_{12} + a_1c_1 - X_d \\ s_{124}x + c_{124}y + a_2s_{12} + a_1s_1 - Y_d \\ z + d_1 - d_3 - Z_d \\ 1 - 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

그리고,

a)  $f(x_k), [\frac{\partial f}{\partial x}(x_k)]^2$  at  $x = x_k, k = 1, \dots, 4$ 을 계산한다.

$$b) x_{k+1} = x_k - [\frac{\partial f}{\partial x}(x_k)]^{-1} \cdot f(x_k)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_{1k+1} \\ \theta_{2k+1} \\ d_{3k+1} \\ \theta_{4k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{1k} \\ \theta_{2k} \\ d_{3k} \\ \theta_{4k} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_1}{\partial d_3} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_2}{\partial d_3} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_3}{\partial d_3} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_4} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} f_1(x_k) \\ f_2(x_k) \\ f_3(x_k) \end{bmatrix}$$

특히, 위의 단계 b)에서 역행렬을 계산할 경우 정방행렬이 아닌 관계로 Gauss소거법과 같은 일반적인 방법으로는 역행렬 계산을 할 수가 없으므로 다음과 같은 식을 사용한다<sup>(5)</sup>.

$$x = A^T (AA^T)^{-1} y \quad (4)$$

단계 3)  $\sum_{i=1}^4 |x_{k+1} - x_k| < \epsilon$  (허용오차)를 만족한다면 이때  $x_{k+1}$ 이 원하는 해이며, 만족하지 않는다면 단계 2)와 단계 3)을 반복한다.

## 2.3 F/T 센서 해석

본 논문에 사용되어진 F/T 센서는 BL Autotec사의 30/300시리즈의 6 자유도 F/T를 사용하였다. 하중용량은 Force는 30Kgf이고 토크는 300Kgf-cm이다. F/T센서는 말단효과장치에 가해지는 세 개의 힘과 세 개의 토크를 측정할 수 있는 기기이다. 센서로부터 전달된 정보, 즉 세 개의 힘과 세 개의 토크는 적절한 제어를 위한 유연성을 로봇에 제공해 준다. F/T 센서를 위한 센서 제어기는 12 bits A/D 변환기를 사용하여 증폭된 8개의 스트레인 게이지의 아날로그 신호를 디지털화 하고, 이 디지털화 된 스트레인 게이지의 값들은 이후 힘과 토크 값들로 변환된다. 변환된 힘과 토크 값들은 RS-232C 직렬 포트를 통하여 출력된다.

F/T센서와 로봇 제어기간의 인터페이스 소프트웨어를 개발하기 위하여 본 연구에서 사용하는 F/T 센서에 대한 보정식이 필요하게 된다. 사용된 로봇이 스카라형이기 때문에 글쓰는 작업에서 쓰여지게 될 바닥에 있는 종이의 존재는 컴프라이언스계의 Zc축을 따른 위치에서의 자연적인 제한을 나타낸다.

F/T 센서에 대한 보정식을 해석하기 위하여

유성색연필에 대한 -0.1 mm당 힘 변화를 측정하였다. Fig.2는 깊이의 변화에 대한 측정된 힘의 변화상태를 보여준다. 이 그림에서 보여주는 것 같이 -0.2 mm를 기준으로 선형변화가 2개구간에서 나타난다. 즉, 0.0 mm ~ -0.1 mm를 I 구간, -0.2 mm ~ -1.0 mm를 II 구간으로 하였다. 본 연구에서는 로봇의 z 방향 위치를 보정하기 위하여 F/T 센서 보정식을 II 구간을 사용하여 글쓰는 작업에 적용하였다.

II 구간에서의 깊이의 변화에 따른 힘 변화 실험을 여러 번 수행하여 얻은 데이터를 최소승법을 사용하여 아래와 같은 보정식을 구하였다.

$$y = 140.194x + 11.534 \quad (5)$$

여기서,  $y$  는 F/T 센서가 받는 힘( $F_z$ ),  $x$  는 깊이(depth)를 나타낸다.

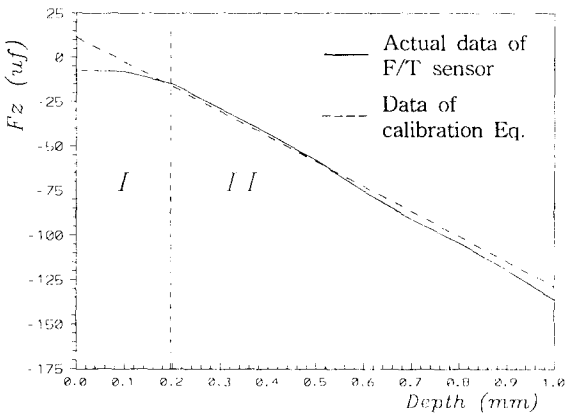


Fig.2 Relationship between depth and force

### 3. 로봇시스템과 F/T 센서간의 인터페이스

센서로부터 얻어진 데이터를 분석하여 로봇이 고정밀 및 고기능 작업과 불확실한 환경의 변화에 능동적으로 대처하기 위하여 컴퓨터를 이용한 로봇 시스템과 센서간의 인터페이스는 중요한 부분을 차지한다.

#### 3.1 인터페이스 방법

이날로그 신호와 디지털 신호를 인터페이스 하는 방법은 사용되는 센서에 따라 여러 가지의 방법이 사용된다.

본 논문의 인터페이스 부분에 사용된 신호 흐름도는 Fig.3과 같다. F/T 센서에서 생성된 8개

의 스트레인 게이지의 신호는 센서 제어기를 거치면서 신호 처리되어 3개의 힘과 3개의 토크로 변환되어 RS-232C 규격의 직렬 통신을 통해 host PC로 들어온다. host PC는 들어온 6개의 힘, 토크 값들을 획득(Acquisition)하고 사용할 수 있는 적절한 값들로 변환(Cooking)시켜, 이 변환된 값들은 역기구학과 F/T 알고리즘에 이용되어 4개의 위치 값들로 바뀌어진다. 계산되어진 값들은 로봇 제어기의 요구시 로봇 제어기로 전달된다.

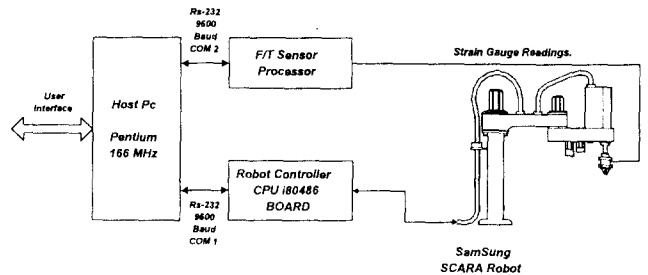


Fig.3 Overall signal flow chart for interface of hardware system.

또한 통신시 데이터 전송을 위한 제어와 그 오류처리 제어에 사용되는 방법으로는 폴링(polling)과 인터럽트 구동(interrupt-driven)방식이 있는데, 본 연구에서는 인터럽트 구동 소프트웨어의 빠른 응답성 때문에 호스트 시스템과의 속도 매칭이 잘 이루어지며, 데이터의 유실 가능성이 적은 인터럽트 구동방식을 사용하였다.

#### 3.2 통신프로그램 개발

개발된 통신 프로그램, Connect는 기본적으로 다음의 3가지 기능을 가진다. (1) 센서 제어기로부터 직렬포트(COM2)를 통해 F/T 값들을 받아들인다. (2) 로봇 제어기에서 요구하는 형식으로 F/T 값들을 변환시킨다. (3) 로봇 제어기에서 데이터 송신 요구시 직렬포트(COM1)를 통해 로봇 제어기로 송신한다. 사용된 F/T 센서는 host PC와 RS-232C 직렬포트를 통하여 9600 보오 레이트(Baud rate)로 연결된다. 또한 8 비트 데이터 비트, 1개의 스톱 비트를 사용하며, 패리티는 사용하지 않는다. 삼성의 SRC-401 로봇 제어기 역시 9600보오 레이트를 사용하고 8개의 데이터 비트, 1개의 스톱 비트, 패리티는 사용하지 않는다.

Fig.4는 개발된 인터페이스 소프트웨어의 흐름

도를 보여준다. `path_trajectory()`에서는 로봇의 이동할 경로를 설정하여주며 `fts_open()`에서는 F/T 센서와 host PC 간의 통신을 위해 COM2 포트를 열어주며, F/T 센서 데이터를 host PC에서 받아들이기 시작한다. `fts_bias()`는 받아들인 F/T 센서 데이터를 바이어스 시킨다. `Connect()`에서는 본 프로그램의 가장 중요한 역할을 하는 로봇 제어기와 host PC간의 통신을 위한 COM1 포트를 열어주며 로봇 제어기가 요구하는 토큰을 받아 분석하여 로봇 제어기에 요구하는 형식에 맞게 데이터를 변환하여 보내준다. `fts_close()`는 F/T 센서와의 통신을 끊고 프로그램을 종료한다.

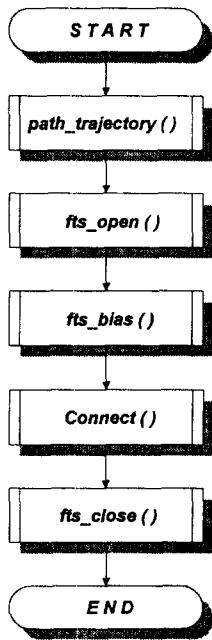


Fig.4 Basic flow chart for connection of interface software

#### 4. 실험장치 및 실험결과

##### 4.1 실험장치

개략적인 시스템 구성은 Fig.3에서 보여준다. 이 그림에서 보여준 것 같이 실험장치에 대한 구성은 다음과 같이 크게 3개로 분류된다.

- 1) 삼성 스카라형 4축 로봇 및 SRC-401 로봇 제어기를 포함하는 로봇시스템.
- 2) BL Autotec사의 30/300 시리즈의 6자유도 F/T 센서.
- 3) Pentium 166MHz CPU를 장착한 host PC.

##### 4.2 통신프로그램의 적합성을 위한 글쓰기 작업

개발된 인터페이스 소프트웨어의 적합성을 보여주기 위하여 F/T 센서를 부착한 로봇을 가지고 2종류의 글쓰기 작업을 실행하였다.

###### 4.2.1 F/T 센서 보정식을 사용하지 않은 경우

F/T센서 보정식을 사용하지 않고 유성색연필을 사용하여 “가”모양의 문자를 종이에 쓰는 실험을 실시간으로 개발된 인터페이스 소프트웨어의 적합성을 실험하였다. F/T센서 트랜듀서로부터 받은 스트레인게이지 데이터를 host PC에 전달하는 통신속도는 9600보오드 레이트이며, 인터페이스 소프트웨어가 데이터를 처리하여 로봇 제어기에 위치 데이터를 전송하는데 0.25sec가 소요되었다. 글쓰기 작업시 유성색연필의 끝점과 바닥의 종이간에 마찰은 없다고 가정하며 이때 유성색연필은 -0.3 mm의 일정한 깊이로 하여 글쓰기 작업을 수행하게 하였다.

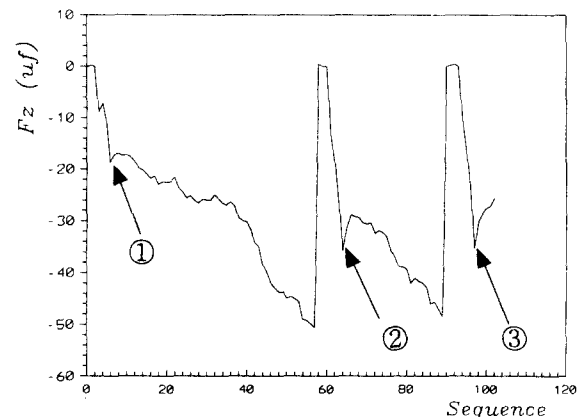
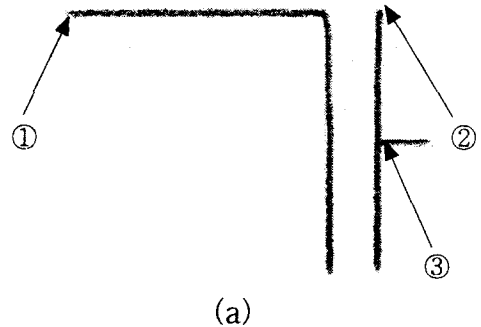


Fig.5 1st. Writing task without calibration equation of F/T sensor  
(a) Written letter (b) Variation of  $F_z$

Fig.5(a)는 글쓰기 작업을 통하여 종이에 쓰여진 문자 “가”를 보여주며, Fig.5(b)는 글쓰기 작업을 하면서 발생하는 힘( $F_z$ ) 값들의 변화를 보여준다. 일정한 깊이 -0.3 mm로 종이에 접촉을 하면서 힘 값들의 변화를 나타내는 Fig.5(b)에서 보여주듯이 일정한 힘을 유지하는게 아니라 작업대의 위치오차에 의해 F/T센서가 받는 힘이 계속적으로 변화하고 있는 것을 보여준다. 또한, 첫 번째 글쓰기 작업을 한 후 다시 종이 위에 일정한 깊이 -0.3 mm를 유지하면서 문자 “가”를 쓰게 하는 실험을 행하였는데, 이 때 문자의 모양과 힘( $F_z$ )의 변화를 Fig.6에서 보여준다. Fig.6(b)에서 보여주듯이 일정한 힘을 유지하는게 아니라 작업대의 위치오차와 첫 번째 글쓰기 작업시 유성색연필의 마모에 의한 위치오차가 발생하였다.

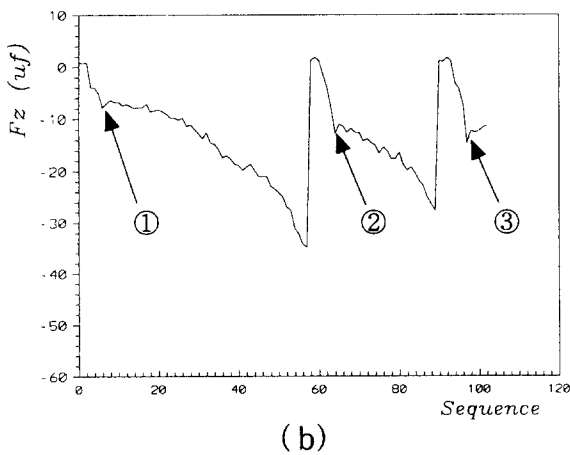
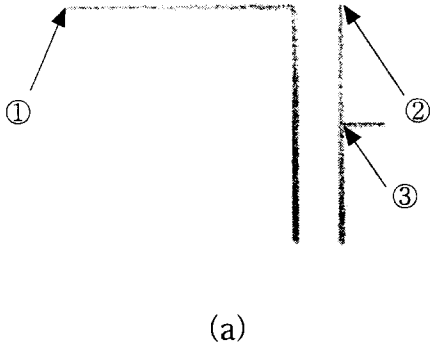


Fig.6 2nd. Writing task without calibration equation of F/T sensor  
(a) Written letter (b) Variation of  $F_z$

#### 4.2.2 F/T 센서 보정식을 사용한 경우

F/T 센서에서 구해진 보정식을 이용하여 로

봇의  $z$  방향 위치를 제어하도록 글쓰기 작업을 수행하였다. F/T 센서가 받는 힘의 깊이는 항상 -0.30 mm를 유지할 수 있도록 로봇의  $z$  방향 위치를 수정할 수 있게 하였다. Fig.7은 보정에 의해 쓰여진 문자 “가”와 보정 되어진 힘( $F_z$ )을 보여준다.

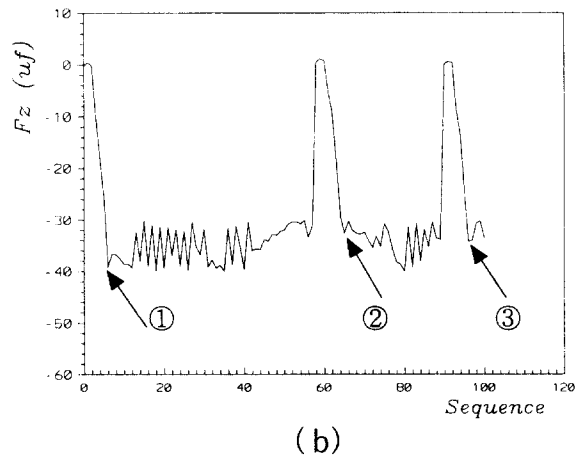
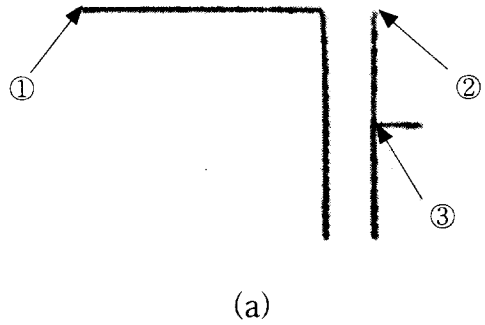


Fig.7 Writing task with calibration equation of F/T sensor  
(a) Written letter (b) Variation of  $F_z$

첫 번째 글쓰기 작업과 두 번째 글쓰기 작업에서 로봇의  $z$  방향 위치를 -0.3 mm 깊이로 일정하게 유지하면서 작업을 하였을 때 일정한 힘을 유지하지 못했다. 두 번째 글쓰기 작업에서는 첫 번째 작업 중에 유성색연필이 마모에 의한 위치오차가 발생하여 첫 번째 실험보다 0.16 mm 적게 접촉을 한 상태에서 글쓰기 작업을 시작하였다. 이리하여 2.4절에서 구한 보정식을 사용하여 첫 번째와 두 번째의 글쓰기 작업을 하는 과정에서 발생한 유성색연필의 마모에 의한 위치오차와 작업대의 위치오차를 보정하여 -0.30 mm의 깊이를 유지할 수 있게 하였다. Fig.7(a)에서 ①번 지점은 마모에 의한 위치오차와 작업대의 위치오차

를 보정하여 실제로는 로봇의  $z$  방향 위치로  $-0.5 \text{ mm}$  아래에서 글쓰기 작업이 시작되었다. 또한, ②번 지점은  $-0.55 \text{ mm}$ , ③번 지점은  $-0.58 \text{ mm}$ 로 보정식에 의해 로봇의  $z$  방향 위치가 보정 되어서 글쓰기 작업을 수행하였다. 위와 같은 과정을 수행한 힘 제어 알고리즘에 대한 소프트웨어 흐름도는 Fig.8에서 보여준다.

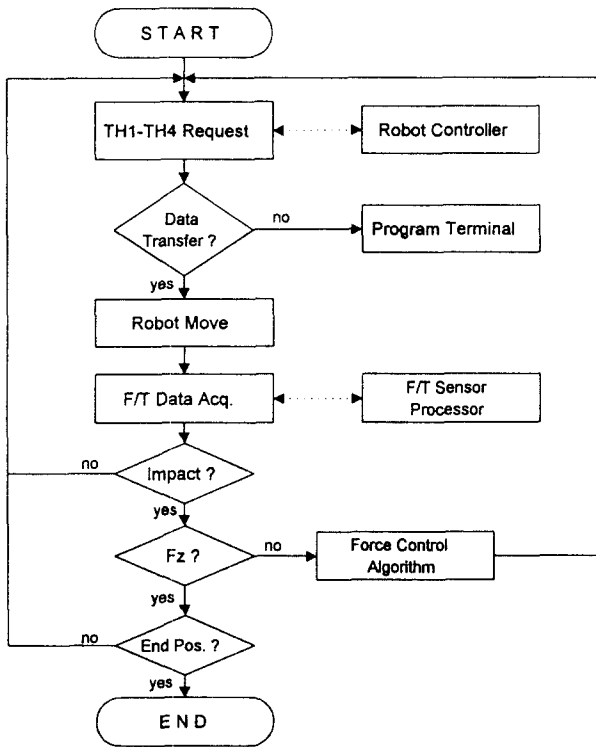


Fig.8 Software flow chart for force control algorithm

### 5. 결론

본 연구에서 F/T센서와 로봇 제어기간의 통신을 위해 필요한 인터페이스 소프트웨어 개발과 개발된 소프트웨어를 사용하여 실행한 글쓰기 작업을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 2 종류의 글쓰기 작업에서 보여준 것 같이 F/T 센서와 힘 제어 알고리즘은 로봇의 위치 오차를 수정하여 정확한 작업을 수행할 수 있음을 보여준다.
- 2) 이와같이 개발된 인터페이스 소프트웨어는 접촉이 일어나는 환경에서 환경의 변화에 능동적으로 실시간에서 작업을 원만히 수행할 수 있음을 보여준다.

- 3) 구성된 하드웨어간의 통신속도의 개선을 이룬다면 고속 운동을 하는 로봇을 사용하여 생산 공장 조립자동화에 직접 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

### 참고문헌

- [1] B.Shimano and B.Roth, "On Force Sensing Information And Its Use In Controlling Manipulator," *Proc.of the 8th Industrial Symposium On Industrial Robots*, Washington, D.C. pp.119-126.
- [2] J.Kenneth Salisbury, "Active Stiffness Control Of Manipulator In Cartesian Coordinates", *Proceedings of 19th IEEE conf on Decision and Control*, pp.95-100,1980
- [3] Akihiko Yabuki, "Six-Axis Force/Torque Sensor For Assembly Robots," *Fujitsu Sci. Tech. j.*, 26,1,april,1990, pp.41-47.
- [4] Charlotta Linderstam, Bertil AT Söderquist, "Monitoring the Generic Assembly Operation for Impact from Gripping to Finished Insertion", *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April, 1996, pp.3330-3335
- [5] Youdan Kim, John L. Junkins, "Dynamics and Control of Flexible Structures", Texas A&M University, 1992, pp.14-15