

3차원 좌표 측정기의 측정 자동화 시스템 개발

신재혁* · 류영선** · 강희준*

*울산 대학교 제어계측공학과, ** 삼주 기계(주)

<요 약>

본 논문은 $10\mu\text{m}$ 정밀도를 가진 수동형 3차원 좌표 측정기(Coordinate Measuring Machine, CMM)에 다음의 기능을 부가함으로써, 자동화하고자한다. 그것들은 디스플레이 제어, 키보드나 조이스틱을 통한 Man-Machine Interface 기능 그리고 서보 모터 제어 등이다. 이와같은 기능을 부가하기 위하여, 8031 원칩 마이크로프로세서 시스템을 설계 제작하였고, Yasukawa 모터를 이용한 서보 제어 시스템은 일반적인 PID 알고리즘과 최종점에서 부가적인 Impulse 제어를 수행함으로써, 본 시스템의 요구 조건인 위치 오차 $10\mu\text{m}$ 이내의 정밀 제어가 가능토록하였다.

Development of Automatic Measuring System for 3D Coordinate Measuring Machine

Jae-Hyeok Shin*, Young-Sun Ryuh**, Hee-Jun Kang*

*Dept. of Control & Instrumentation Engineering, ** SamJoo Machinery

<Abstract>

This paper works toward the development of an Automatic Coordinate Measuring Machine(CMM) by adding to a manually driven CMM machine with measuring accuracy of $10\mu\text{m}$ the following functions. a display control, man-machine interface with a joystick and a keypad, and servo motor control. 8031 one chip microprocessor system is designed to control the above functions and A servo motor control system with Yasukawa servo motors allows to control a probe with $10\mu\text{m}$ accuracy by using conventional PID control algorithm and an additional impulse control algorithm.

1. 서 론

3차원 좌표 측정기(3 Dimensional Coordinate Measuring Machine: 3D CMM)는 측정 및 검사 작업을 수행하는데 있어서 높은 범용성과 품질 관리의 효율성을 통해서 오늘날 많은 산업체 현장에서 광범위하게 사용되고 있다. 주로 제작 제품의 정밀도를 측정하는 정밀 측정기로서, 고정밀도, 고신뢰성을 위하여 여러 연구자[1-4]에 의해서 연구되고 있다.

3차원 좌표 측정기는 일반적으로 직교좌표형(PPP type)의 팔(Arm)로 구성 되어있고, 주제어시스템과 연결되어 조이스틱이나 기타 위치제어를 통한 외부 조장이 가능하고, 좌표의 변환이나 데이터 저장 기능이 있으며, 정밀도가 마이크론 단위인 자동형과 데이터의 표시만을 하고, 측정 정밀도가 $10\ \mu\text{m}$ 이상의 수동형으로 분류할 수 있는데, 자동형의 경우 상당히 고가이므로 국내 중소기업이 보유하기에 큰 부담이 될 뿐아니라 일반적인 자동화 시스템의 허용공차 범위가 대개 $10\ \mu\text{m}$ 이상이므로 대부분의 중소기업체 보유하고 있는 것은 일반적인 수동형 3차원 좌표 측정기라 볼 수 있다. 그러나 상대적으로 저가의 수동형 3차원 좌표 측정기는 작업자에게 많은 숙련을 요구할 뿐만 아니라, 작업 시간이 길고, 제품의 정도가 균일하지 않으며, 상당히 많은 수의 측정 점에 대하여 반복 작업을 요구하고, 측정 대상의 형상의 복잡성으로 인해 작업자의 신체적인 불균형을 초래하여 직업병을 발생시키는 등의 사용상의 단점이 있다.

따라서, 본 논문은 기존의 수동형 3차원 좌표 측정기에 대한 측정 자동화 시스템을 개발하여 어려운 작업 환경을 개선하고, 나아가 고가의 장비를 대체하고자 한다. 개발에 필요한 과정은 다음과 같다. 1) 관절 구동에 적합한 모터 시스템 선정, 2) 마이크로 컴퓨터 시스템 제작 및 조이스틱이나 키보드 같은 MMI 환경 구성, 3) 자동 검침 기능 그리고 4) 3차원 측정기의 $10\ \mu\text{m}$ 에 이내의 정밀 제어등이다.

2. 수동형 CMM의 구성

일반적인 3차원 좌표측정기(CMM)는 그림 1에서 보여진 대로, 각각 선형 자기 센서가 부착된 3개의 직교하는 링크로 구성된 P-P-P 형태의 몸체를 갖고 있으며, 그 몸체의 마지막 링크의 끝에는 기계적인 압력계가 연결된 측정탐침이 달려 있다. 여기서, 압력계의 용도는 위치 측정시, 측정 대상물과의 기준 측정 압력을 유지토록 하여 접촉에 따른 오차를 가급적 줄이고자 함이다. 각각의 링크에는 링크를 이동하기 위한 회전 손잡이가 있어 측정하고자 하는 위치에 링크 끝단의 측정탐침을 대략적으로 이동시키는데 사용된다. 이렇게 CMM이 움직이는 동안 표시장치에는 기준 위치로부터의 현재 거리가 X, Y, Z축에 대하여 표시된다. 좌표계의 원점은 Reset 스위치가 눌러진 위치에서 정의되거나 특정 위치에서 preset을 통하여 상대 좌표로 정의 할 수 있다. 고려된CMM의 최대 측정 범위는 X축은 5480.24mm, Y축은 1370.86mm, Z축은 1435.23mm 이다.

일반적인 CMM의 위치 검출센서는 그림 2에 보여진 대로, 특수 자성재료에 정확한 주기로 기록된 자기 신호를 눈금으로 한 스케일과 자기눈금을 전기신호로 변환하는 헤드 부분으로 구성되어 있는데, 기본적인 신호 검출은 홀센서를 사용하고 있다. 그 출력 신호는 그림 3에 제시되는데, 이 출력 신호에 의하여 현재의 위치를 검출할 수 있는 신호처리가 필요하다.

2. CMM의 구동 메커니즘

기존의 3차원 좌표 측정기를 자동화하기 위한 첫 번째 작업은 각각의 관절 위치에 붙어 있는 회전 손잡이를 제거한 후, 그곳에 설치될 감속기어와 AC 서보 모터의 사양을 결정하는 것이다. 또 부가적인 작업으로는 각각의 관절 양끝에 리밋스위치(Limit Switch) 부착, 위치센서인 자기센서의 신호를 검출하기 위한 위치 검출기 연결 그리고 자동 검출 기능이 가능하도록 관절 끝에 접촉센서가 부착된 탐침을 연결하는 것이 필요하다.

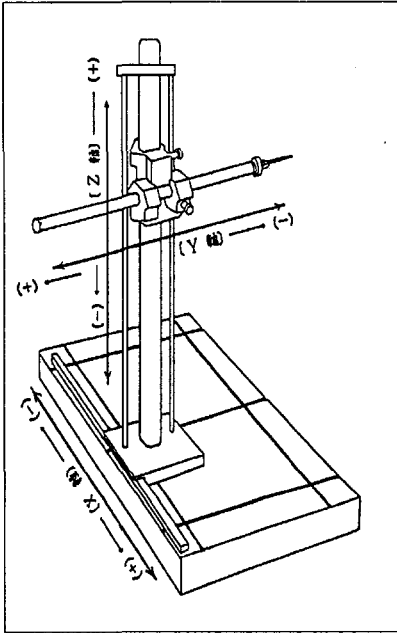


그림 1. 3차원 CMM

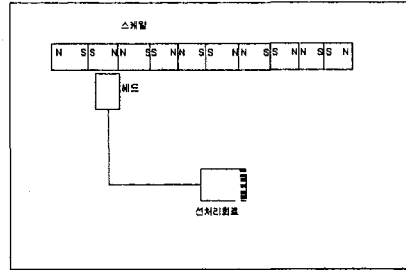


그림 2. CMM의 위치검출 센서

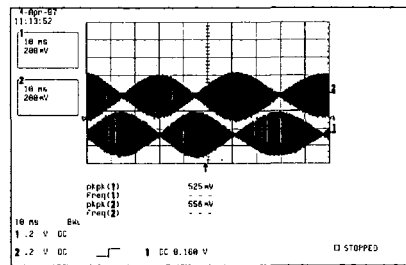


그림 3 위치 검출 센서의 출력 파형

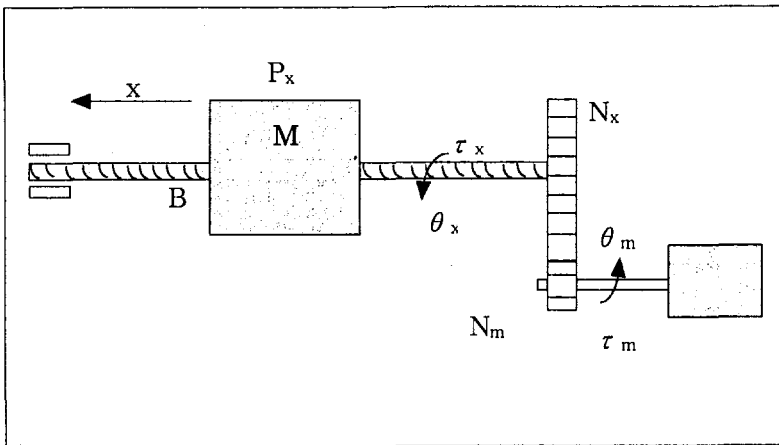


그림 4. 모터 및 감속비 선정을 위한 시스템 모델

구동 메커니즘의 감속비와 모터의 크기를 선정하기 위하여 그림 4의 시스템 모델을 관찰부하가 가장 큰 x축(1축)을 대상으로 적용하였다. 기어의 감속비를 선정하기 위하여 3차원 측정기의 최고속도를 \dot{x}_{\max} 를 300mm/sec로 잡고, 일반적인 AC 모터의 최대 속도를 4500rpm(471.24 rad/sec)으로 잡으면,

$$\dot{x}_{\max} = \frac{P_x}{2\pi} \frac{N_m}{N_x} (\dot{\theta}_m)_{\max} \quad (2.1)$$

$$300[mm/sec] = \frac{110}{2\pi} \frac{N_m}{N_x} \frac{4500}{60} 2\pi \quad (2.2)$$

$$\frac{N_m}{N_x} = 0.03636 \quad (2.3)$$

여기서, x-방향 피치 P_x 는 110mm/rev이다.

식 (2.3)으로부터 기어의 감속비를 1/30로 선택한다. 따라서, x축의 최대 속도는 275 mm/sec가 되고, 이 값은 위치 측정 센서의 최대 응답속도 이내에 들어가므로 유효하다.

기어의 구동 능력에 해당하는 모터의 크기를 선정하기 위하여, 모터 궤적 계획을 사다리꼴 궤적 계획을 가정하고 그 가속 시간을 0.01초로 설정하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{x} = \frac{275}{0.01} = 27500 [mm/sec^2] \quad (2.4)$$

$$(\ddot{\theta}_m)_{\max} = \frac{\ddot{x}_{\max} 2\pi}{P_x \frac{N_m}{N_x}} = 47997 [rad/sec^2] \quad (2.5)$$

그리고 그림 4의 모델로부터 모터 자체의 관성량을 포함한 모터 토오크 계산식은 식 (2.6)과 같이 추론될 수 있다.

$$\tau_m = (J_a + M(\frac{P_x N_m}{2\pi N_x})^2) \ddot{\theta}_m + (B_a + B(\frac{P_x N_m}{2\pi N_x})^2) \dot{\theta}_m \quad (2.6)$$

이 식에 모터의 최고회전 속도 4500 rpm, 최대가속도가 47997 rad/sec²을 적용하면 최대 토르가 0.506 Nm를 얻을 수 있다. 따라서, 본 논문은 위 조건이 만족하는 Yasukawa 200W 모터를 선정하였다(자세한 것은 참고 문헌 [5] 참조). 선정된 모터와 감속기어를 장착한 3차원 좌표 측정기의 무부하시 이상적인 예상 성능은 관절의 최고 속도가 275 mm/sec, 정격 가속도가 27500 mm/sec²가 된다.

3. 마이크로 컴퓨터 시스템의 설계 및 제작

측정 자동화 시스템에 요구되는 기능을 정리하면 다음과 같다: 측정 표시기 제어(현재 위치 표시 및 좌표 설정, 제거 기능 가능), 조이스틱의 조작에 의한 모터 제어 기능, 접촉 센서에 의한 접촉좌표 측정기능, 관절 한계 감시 기능, 그리고 PC로 데이터 전송기능 등. 이와 같은 기능을 수행하기 위하여 본 논문에서는 인텔사의 8비트 데이터버스를 가진

8031 One Chip CPU를 이용한 마이크로 컴퓨터 시스템을 개발하였다.

그 내용은 CPU 보드 설계, 키보드 및 조이스틱 설계, 모터 제어용 신호 출력 회로 설계, 데이터 통신 및 접촉 센서 처리, 그리고 좌표 표시기 제작 등이고, 개발된 시스템을 그림 5에 제시한다.



그림 5 One Chip CPU-Based 제어장치

3.1 CPU 보드 설계

본 논문에 사용된 8031은 8비트 단위의 4개의 입출력 포트가 있어 모두 32비트의 입출력 라인을 가지고 있다. 본 연구에서는 메모리 영역을 롬과 램을 합하여 64K 바이트(Byte)로 설계하였기 때문에 메모리를 액세스하기 위하여 16비트의 어드레스버스와 8비트의 데이터버스가 필요하게 되어, 4개의 포트중 P0와 P2의 포트를 어드레스버스로 사용하고, P0는 래치하여 데이터버스와 공동으로 사용하였다. 그리고 메모리 제어 출력 신호는 P3포트의 6번째, 7번째 비트를 읽기/쓰기(Read/Write)신호로 사용하였고, ALE와, PSEN신호는 따로 준비되어 있으므로 그것을 사용하였다. 3포트는 제어용 신호단자로서의 기능을 이용하였다. PC와 시리얼 통신을 하기 위하여 자료 받기(Receive data : RxD), 자료 쓰기(Transmit data : TxD) 신호용으로 2비트를 쓰고, 외부 인터럽트 입력용으로 2비트가 있는데, 이 중 하나는 키보드 인터럽트용으로 사용하고, 나머지 하나는 터치 센서로부터 입력되는 신호를 인터럽트로 처리하기 위하여 사용하였다. 그리고 2비트의 타이머/카운트중 1비트는 통신의 보레이트를 설정하기 위하여 사용하였고, 1비트는 사용하지 않았다. 나머지 두 비트는 읽기/쓰기 신호 출력용으로 사용하였다. P1포트중 P1.0는 X축의 카운터를 P1.1은 Y축을 P1.2는 Z축의 카운터를 각각 클리어 하는 신호를 출력하는 단자로 사용하였고, 나머지 5비트는 입출력을 임의로 선택하여 범용으로 사용하도록 외부 출력단자에 연결하여 두었으며, 현재는 개발의 편의상 조이스틱으로 제어할 축을 선택하거나, 좌표를 설정하려고 하는 축의 선택을 선택했을 때 선택된 축을 표시하는 등 부가적인 표시 신호 출력을 위해 사용하였다.

8031 메모리 구조는 256 바이트의 내부 메모리와 외부 메모리로 되어있다. 내부 메모리

는 128바이트의 데이터 램과 128바이트의 특수 기능 레지스터로 구성되어 있고, 외부 메모리는 프로그램이 들어가서 수행되고 읽기만 가능한 외부 프로그램 메모리 영역과, 데이터를 읽고 쓸 수 있는 외부 데이터 메모리 영역으로 구성되어 있다. 외부 데이터 메모리를 액세스할 때는 $-RD$ 와 $-WR$ 신호를 사용하고, 외부 프로그램 메모리를 읽을 때는 $-PSEN$ 신호를 읽기 신호로 사용한다. 그런데 $-PSEN$ 신호는 외부 데이터 메모리를 액세스하는 $-RD$, $-WR$ 신호가 동작할 때는 출력되지 않는다. 외부 프로그램 메모리에는 데이터만을 기록하는 용도로 사용하고, 프로그램을 기록하여 사용할 수는 없다. 그러나 본 논문에서는 $-RD$ 와 $-PSEN$ 신호를 논리곱(And)하여 새로운 $-PRD$ 신호를 생성하여 외부 프로그램 메모리와 외부 데이터 메모리의 읽기 신호로 동시에 사용함으로써 외부 데이터 메모리 영역에 프로그램을 써넣어 실행시킬 수 있도록 하였다. 이렇게 하여 프로그램을 개발 할 때, 매번 롬 라이터(ROM Writer)로 롬에 프로그램을 써넣고, 지우는 번거로운 과정을 거치지 않고, 프로그램을 시리얼 통신으로 램에 다운로드 한 후 실행 할 수 있게 하였다. 그리고 개발 후에는 PC로부터 새로운 프로그램을 다운로드 받아서 쓸 수 있는 가능성을 가지는 가변적인 구조를 가진 제어시스템의 구성을 가능하게 하였다. 시스템이 시작되면, CPU는 항상 절대번지 0000H로부터 프로그램을 시작하므로 메모리의 하위번지는 프로그램메모리 영역이어야 한다. 그래서 롬 영역을 0000H - 7FFFH로 하여 32K 바이트로 설계하였으며, 램 영역은 8000H - FFFFH 까지로 설계하였다. 그런데 실제로 램을 액세스 할 수 있는 영역은 8000H - FFBFH 까지 이고, 나머지인 FFC0H - FFFFH 까지의 메모리 공간은 디스플레이 장치의 제어, 조이스틱 값의 입력, 모터 제어, 키보드값 입력, 측정기의 자기 엔코더 신호입력, 입출력 장치의 확장 등을 위하여 할당하였다.

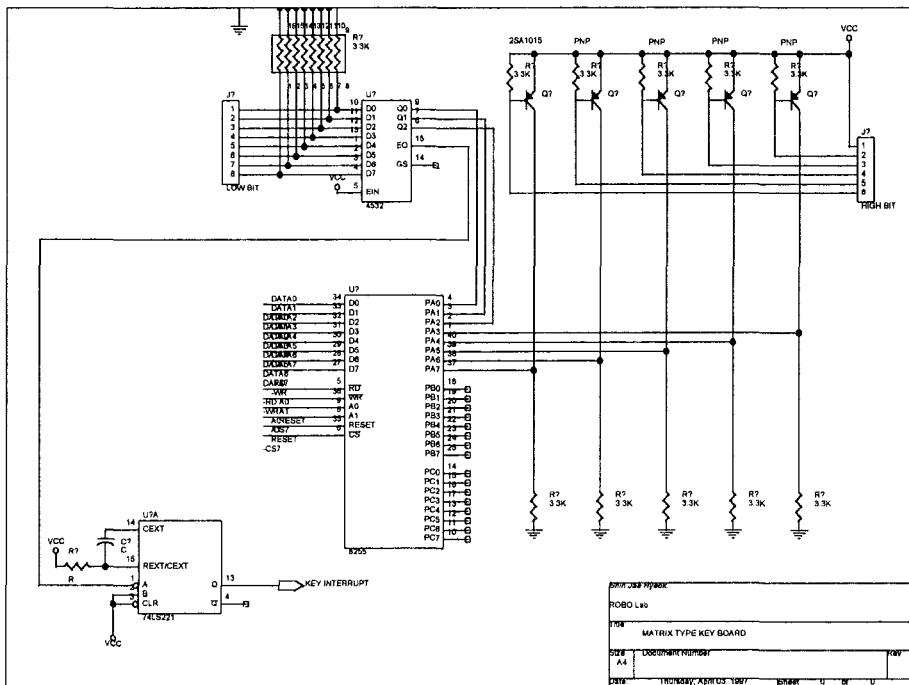


그림 6. 키보드 회로

3.2 키보드 및 조이스틱 설계

측정기의 입력 장치로서 키보드와 조이스틱을 설계하였다. 키보드는 그림 6에 제시된 대로 8행 6열의 48개의 키로 구성하였고, 본 연구에서는 이 중 24개의 키를 사용하였다. 키패드는 숫자키와 축선택키, 그리고, 기능키로 구성되며, Preset, Reset, Store, Restore, 등의 기능을 수행하도록 설계하였다. 조이스틱은 가변저항을 이용하여 저항 값의 변화에 비례하는 전압을 출력하도록 하여 이것을 8비트 A/DC를 이용해서 디지털 값으로 변환하여 CPU에 입력하였다. 조이스틱은 3개의 모터를 각각 제어해야 하지만 3개의 모터를 동시에 움직여야 할 필요는 없으므로 조이스틱은 1개를 사용하고, 키보드의 축선택키를 이용하여 3개 중의 1개의 모터를 선택하는 방법을 사용하였다.

3.3 모터 제어용 신호 출력

서보증폭기의 속도 제어신호 입력 단자에 공급되는 신호는 중앙처리장치에서 출력되는 디지털 값의 속도 신호를 디지털 아날로그 변환기를 이용해서 아날로그 전압으로 변환하여 공급하였다. 이것을 위하여 DAC0800을 사용하였는데, 이 칩은 대칭전류 출력 단자를 가지고 있으므로 간단히 저항을 연결하는 것만으로도 출력되는 전압 신호를 +10V에서 -10V로 설정 할 수 있다. DAC0800은 내부에 데이터 래치를 갖고 있지 않고, 데이터 버스가 3스태이트 버퍼를 갖지 않아서 직접 중앙처리장치의 데이터 버스에 연결할 수 없으므로 병렬 입출력 소자인 8255를 통하여 중앙처리장치와 연결하였다.

3.4 데이터 통신 및 접촉 센서처리

측정된 데이터를 PC로 전송하기 위하여 PC에 내장된 전2중방식의 시리얼 포트를 사용하여 시리얼 통신을 하였다. 이 통신 포트는 4가지 모드로 사용이 가능한데, 그 중 모드 3을 사용하였다. 모드 3은 11비트 프레임으로서 보레이트를 변경할 수 있는 비동기 통신 모드이다. 11비트 프레임은 “ 스타트 비트 1 + 8비트 데이터 비트 + 다목적 비트 1 + 스톱 비트 1 ”로 구성되어 있으며, 이 모드의 보레이트는 타이머/카운터 1의 모드 2를 사용하여 설정할 수 있는데, 본 연구에서는 보레이트가 9600bps가 되도록 설정하였다. SFR(Special Function Register)영역에 있는 SBUF(Serial Port Buffer Register), SCON(Serial Port Control Register), PCON(Power Control Register)의 3개의 레지스터를 이용하여 소프트웨어적으로 제어한다. SBUF는 송신할 데이터와 수신할 데이터를 일시적으로 저장하는 레지스터 이고, SCON은 시리얼 포트의 제어와 시리얼 포트의 상태를 감시하기 위한 레지스터 이고, PCON레지스터의 마지막 비트는 시리얼 전송의 레이트를 제어한다.

접촉센서는 일종의 감도가 매우높은 스위치형태여서 탐침 끝에 미세한 접촉이 있으면, 단자가 분리되는 구조이다. 이러한 구조를 가지므로 한쪽 단자를 접지하고, 다른 단자는 풀업하여, 풀업한 단자의 신호를 채터링 방지 회로를 통과하여 정형한다. 이 신호를 인터럽트 5번단자에 입력하여 접촉스위치가 반응하면, 인터럽트가 걸리게 하고, 인터럽트 서비스루틴을 프로그램하여 처리하도록 하였다.

3.4 좌표 표시기

One Chip CPU-Based 제어장치의 좌표 표시기는 7세그먼트 7개를 이용하여 1비트의 부호 비트와 23비트의 BCD코드를 이용하여 -7999.99mm에서 7999.99mm까지 표시할 수 있는 숫자 전용 출력장치를 개발하였다. 이 장치는 CPU로부터 각 자리의 값을 병렬포트를 통해 전달받아 전달된 16진값을 7세그먼트 드라이브 칩을 통해 BCD값으로 바꾸어 7세그먼트를 점등하는 구조로 되어있다.

4. 3차원 측정기의 제어 특성 실험

개발 시스템의 주요 기능 중에 하나는 자동 검침 기능인데 그 원리는 다음과 같다. 측정 목표의 좌표를 "X,Y,Z,Z_top"의 형태로 입력하면, 장애물에 충돌하는 것을 방지하기 위하여, 먼저 Z축으로 이동하여, 측정물의 윗부분에 탐침이 위치하도록 한다. 그리고, X-Y축의 모터를 구동하여 탐침을 X-Y평면상의 목표점으로 이동시킨 후, Z축의 목표위치로 이동하기 위하여 Z축 모터를 구동하여 목표점에서는 천천히 접근시킨다. 그러면 접촉센서는 목표점에 닿게되고, 그렇게 되면, 모터는 정지하고, 이 때의 좌표를 읽어 파일에 기록한다. 이와 같은 기능을 수행하기 위해서는 주어진 좌표값으로의 자동 정밀 제어가 수행되어야 한다. 고려된 3차원 측정기의 encoder pulse는 1mm당 25개의 pulse이고 이것을 4배하여 100pulses/mm로 만들어 3차원 측정기를 0.01mm의 정밀도로 제어하고자 한다. 본 제어 알고리즘에서 가장 어려운 문제는 3차원 측정기가 기어의 백래쉬를 제거하기 위하여 Friction Drive 방식을 사용하므로 모터 구동시 심한 미끄러짐이 발생한다는 것과 0.01mm 센서를 이용하여 0.01mm의 정밀도를 유지하여야 한다는 것이다. 하지만 3차원 측정기의 제어 목표가 궤적 추적이라기 보다는 일정 시간 내에 정해진 목표점에 도달하면 만족되므로 우선 목표점 근방에 도달한 후 다음 Impulse에 의한 구동방식을 선택하면 원하는 제어 목표를 달성할 수 있다. 따라서 본 제어기의 기본 알고리즘은 식 (4.1)의 PI 제어기에 목표점에서 오차가 발생하면 Impulse에 의한 구동을 선택하였다.

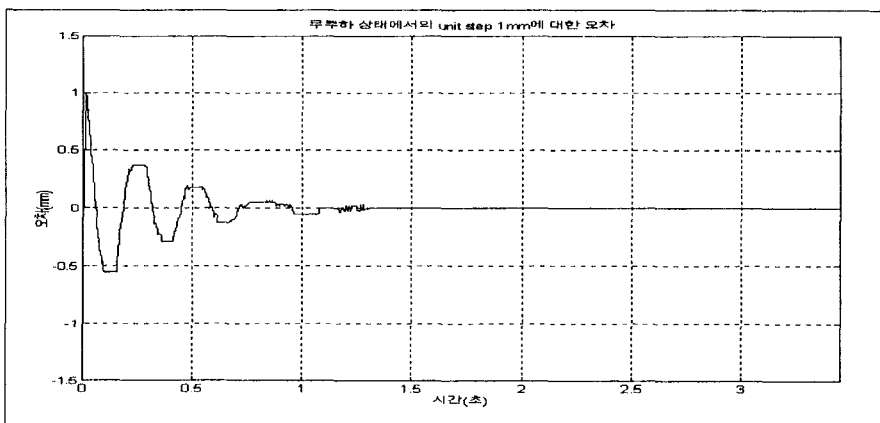


그림 7 1mm Unit Step Response

$$\tau = \dot{X}_d + K_p (X_d - X) + K_i \int (X_d - X) \quad (4. 1)$$

적절한 Gain과 고려된 Impulse 제어의 유용성을 고려하기 위하여 Unit step size를 1mm로 하여 제어 실험을 수행하였다. 그림 7은 제어주기가 0.003442초이고 $K_p=10$, $K_i=1.5$ 로 설정하였을 때 1mm Unit Step 응답이다. 1 초이후의 작은 진동은 0.01mm의 정밀도를 유지하기 위한 Impulse 제어구간인데 비록 0.3초 내외의 시간이 소요되긴 하지만 최종적으로 0.01 mm의 제어 정밀도를 유지할 수 있다. 3차원 측정기의 측정 목표를 고려 할 때 이 같은 고려는 타당하다고 할 수 있다.

본 알고리즘의 타당성을 고려하기 위하여 궤적에 대한 추종 특성 실험을 수행하였다. 궤적은 본 연구의 목적상 몇 개의 경유점이 설정되고 최종 목표점이 설정되면, 각각의 경유점을 부드럽게 경유하여 최종 목표점에 도달하도록 계획하였다. 이를 위하여 산업용 제어 기기에 흔히 사용되는 사다리꼴 궤적계획을 사용하였다. 이 방법은 속도를 순차적으로 등가속, 등속, 그리고 등감속의 모양을 하도록 제어하는 것이다. 특히 등가속과 등감속하는 부분에서는 급격한 속도 변화가 없도록 하여 모터와 측정기 사이의 Friction Drive에서 미끄러짐을 최소화하도록 고려하였다. 이것은 등가속 구간과 등감속 구간의 시간을 적절하게 설정함으로써 실현할 수 있었다. 그림 8에 궤적계획의 예로서 경유점이 있는 사다리꼴 궤적 계획에 대한 위치 분포와 속도 분포를 나타내었다. 이 예는 100mm를 경유하여 200mm 지점으로 가는 경우인데, 100mm까지 3초에 가고, 다시 200mm까지 3초에 가도록 하였고, 경유점에서의 속도는 0으로 하였다. 다른 궤적 실험도 동일한 방법으로 구성한다. 실험시, 제어주기는 0.003442초, $K_p=10$, $K_i=1.5$ 로 설정하였다.

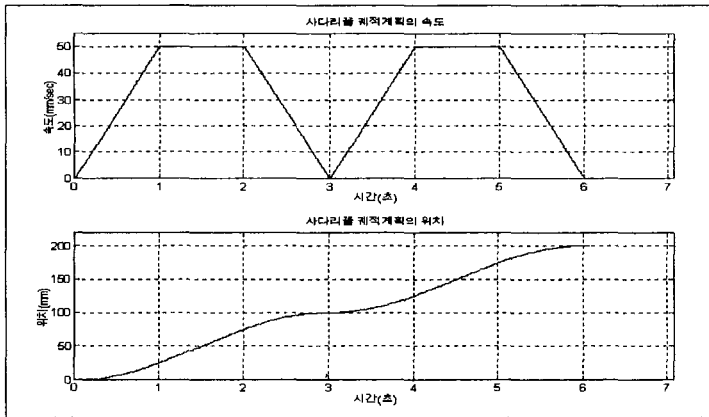


그림 8. 실험 궤적 계획

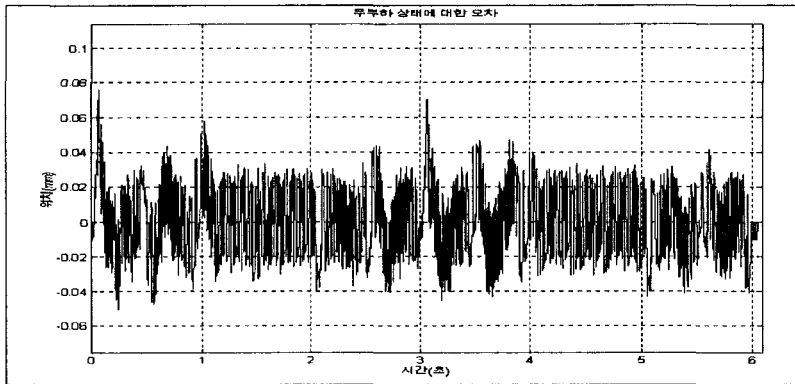


그림 9. 100 -> 200 궤적 추종 오차

그림 9는 임의의 시작점에서 시작하여 3초간 100mm 까지 이동하여 정지하고, 다시 3초간 200mm 지점에 도착하도록 궤적계획을 하여 제어를 했을 때, 이 궤적에 대한 오차를 보여준다. 이 그림에서 6초 이후를 보면, 목표시간 이후에도 제어 행위가 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 제어 정밀도와 센서의 정밀도가 같기 때문에 센서의 정밀도 근방에서 발생하는 오차를 제거하기 위하여 Impulse 제어가 수행되는 시간이다. 따라서, 0.5 초이내의 정착 시간이 주어진다면 제안된 제어 알고리즘이 3차원 측정기의 제어 알고리즘으로 사용될 수 있음을 보여준다.

5. 결 론

본 논문은 기존의 수동형 3차원 좌표 측정기 사용상의 어려움을 개선하고, 나아가 고가의 장비를 대체하여 생산성을 향상시키고자 측정 자동화 시스템을 개발하였다. 개발된 내용은 다음과 같이 요약될 수 있다. 1) 관절 구동에 적합한 모터 시스템 선정, 2) 마이크로 컴퓨터 시스템 제작 및 조이스틱이나 키보드 같은 MMI 환경 구성, 3) 자동 검침 기능 그리고 4) 3차원 측정기의 $10\ \mu\text{m}$ 에 이내의 정밀 제어등이다. 앞으로 3차원 시각 센서를 부착하여 고려된 표식에 따라 자동 측정이 가능한 3차원 측정기를 개발하고자 한다.

6. 인용 문헌

- [1] Kunzmann, H., Treppe, E., and Waldele, F., "Concept for Traceability of Measurements with Coordinate Measuring Machines," *International Progress in Precision Engineering*, pp. 40-52, 1993.
- [2] Hocken, R., "Three Dimensional Metrology," *Annals of CIRP*, Vol. 26/1, pp. 403-408, 1977.
- [3] Busch, K., Kunzmann, F. and Waldele, F., "Calibration of Coordinate Measuring

Machines", Precision Engineering, Vol. 7(3), pp. 139-144, 1985.

- [4] Zhang, G., Veale, R., Chorlton, T., and Hocken, R., "Error Compensation of Coordinate Measuring Machine," Annals of CIRP, Vol. 34/1, pp.445-448, 1985.
- [5] 신재혁, 3차원 좌표 측정기의 측정 자동화 시스템 개발, 울산대학교 석사 학위 논문, 1998.