

지상용 3차원 레이저 스캐너의 측정 위치 정확도 향상을 위한 서보 제어기의 연구

Study of Servo Controller for Improving Position Accuracy of 3D Terrestrial Laser Scanner

유종욱¹⁾ · 정중연²⁾ · 김태형³⁾

Yu, Jong Wook · Jeong, Joong Yeon · Kim, Tae Hyung

Abstract

This study is to improve position accuracy by selecting proper a servo motor and applying FOC(Field Oriented Control) on developing a 3D terrestrial laser scanner. A 3D terrestrial laser scanner under developing has range of scanning of azimuth 360° and elevation 270°. It is implemented by precise controlling of a azimuth motor and a elevation motor. In the consequence of study, we have known that position accuracy of the motor can be able to be improved with constant torque of the motor by using FOC(Field Oriented Control). The control technic of the motor is possible to apply a 3D terrestrial laser scanner as well as a robotic total station.

Keywords : 3D terrestrial laser scanner, surveying, Control, Servo Motor, Design

초 록

지상용 3차원 레이저 스캐너를 설계하고 개발하는데 있어서 위치 측정 결과의 정확성을 향상하기 위한 서보 모터의 선정과 서보 모터 FOC(Field Oriented Control) 제어 방식의 적용에 대한 연구이다. 개발 중인 지상용 3차원 레이저 스캐너는 360° 방위각과 270° 고도각의 스캔 범위를 가지고 있다. 이의 구현은 서보 모터인 방위각 모터와 고도각 모터의 정밀한 서보 모터 제어를 통해 실현된다. 연구 결과 FOC(Field Oriented Control)제어를 통해서 모터의 일정한 토크를 유지하면서 모터의 동작 위치 정확도를 향상할 수 있음을 확인하였다. 이러한 모터 제어는 지상용 3차원 레이저 스캐너뿐만 아니라 로보틱 토탈스테이션에도 적용이 가능할 것으로 사료된다.

핵심어 : 지상용 3차원 레이저 스캐너, 측량, 제어, 서보 모터, 설계

1. 서 론

21세기는 본격적인 3차원 측정의 시대로 지상용 3차원 레이저 스캐너의 세계 시장 수요는 그림 1의 자료에 의하면 약 2,500억 원 이상의 규모로 향후 획기적인 성장이 예상되는 신성장 산업 분야이다. 특히 3차원 레이저 스캐너는 산업용 검사 및 측정은 물론 가상현실 등 그래픽에서 의료 분야까지 응용 분야가 급속히 확대되고 있

어 과거 기존 제품의 성장에 버금가는 시장 확대가 예상된다. 이러한 3차원 스캐닝 기술을 이용한 디지털 측정 기술은 토목 및 건축 관련 분야 이외 자동차 제조 및 항공기 제조에도 이용되고 있으며, 인라인 생산 공정 및 품질 검사의 다양한 어플리케이션에 적용되고 있는 추세이다.

최근 국내 여러 기업에서 역시 3차원 스캐닝 기술 도입하기 시작하였으며, 이러한 발전에 힘입어 대학의

1) 정회원 · (주)이오시스템 책임 연구원(E-mail:john2008@eosystem.com)

2) 교신저자 · 정회원 · (주)이오시스템 연구 위원(E-mail:jjyjeong@eosystem.com)

3) ST&C 대표이사(E-mail:miller6502@empal.com)

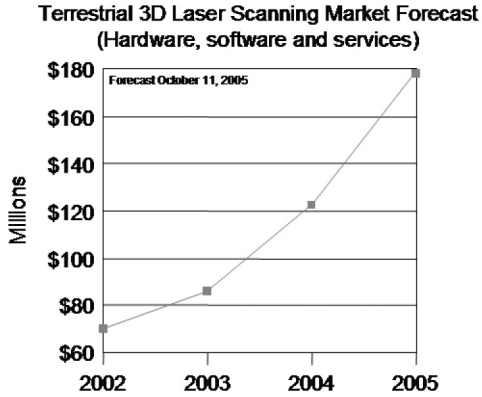


그림 1. 3차원 레이저 스캐너의 예상 수요 (출처 Spar Point Research LLC)

기계학, 설계학, 산업 디자인, 건축, 토목, 계측 및 역설계 분야에서의 활용을 위한 노력이 이루어지고 있다. 구체적인 적용 사례로는 현대기아자동차에서 차량 디자인 개발을 위해 3차원 스캐너를 이용하여 자동차의 3차원 측정 데이터를 취득하여 설계, 시험, 금형 구조와 같은 업무에 적용하여 개발 기간을 단축 하고 있다.

그리고 문화재, 건축, 고고학 등의 더욱 다양한 학문, 기술 분야에서 3차원 스캐닝 기술을 필요로 하고 있다. 이처럼 3차원 레이저 스캐너의 활용도는 여러 분야로 확대되어 가고 있으며 특히 국내의 경우 국토 공간의 효율적인 활용 및 관리의 중요성이 커지고 있는 상황에서 3차원 지형 공간 정보의 획득은 국토 계획 및 관리, 토목, 환경 이라는 측면에서 필요로 하고 있는 현실이다.

토목 및 건축 관련 분야에서 지상용 3차원 레이저 스캐너의 활용은 기존의 토탈스테이션으로 구현하기 어려운 연속적인 점군 데이터의 취득에 주로 활용이 된다. 또한 지상용 3차원 레이저 스캐너의 거리 정밀도는 거리 측정 EDM(Electronic Distance Measurement)부의 성능이 좌우 하는 반면 위치 정확도는 스캔 범위를 설정하는 방위각 서보 모터와 고도각 서보 모터의 위치 제어에 상당한 영향을 받는다.

이런 위치 정확도의 향상을 위해 서보 모터의 제어기의 정밀 제어 설계가 필요하다. 본 논문에서는 지상용 3차원 레이저 스캐너를 개발함에 있어 측정 위치 정확도를 높이기 위해 서보 제어기의 역할과 영향. 정밀 제어 구조에 대한 방법을 제시하는데 목적을 둔다.

2. 지상용 3차원 레이저 스캐너의 구조와 서보 모터의 역할

2.1 지상용 3차원 레이저 스캐너의 구조

지상용 3차원 레이저 스캐너는 기구적으로 상부 프레임과 하부 프레임 두개의 프레임으로 구성이 된다. 하부 프레임에는 360° 스캔 영역 확보를 위해 방위각 모터와 방위각 서보 모터 제어부로 구성이 된다. 상부 프레임에는 270° 스캔 영역 확보를 위한 고도각 모터, 고도각 서보 모터 제어부, 거리 측정을 위한 EDM(Electronic Distance Measurement)부, 레이저 송신 구동부 그리고 3차원 레이저 스캐너의 전체 시스템 제어를 담당하는 MPU(Main Processor Unit)부로 구성이 된다.

방위각 모터와 고도각 모터는 각 서보 모터 제어부에 의해 제어가 된다. 그리고 서보 모터 제어부는 MPU부에 의해서 제어가 된다. 또한 MPU부는 외부 호스트 컴퓨터와 통신을 하며 사용자의 명령을 처리 하게 된다. 다음 그림 2는 지상용 3차원 레이저 스캐너의 간략한 구조를 보여 준다.

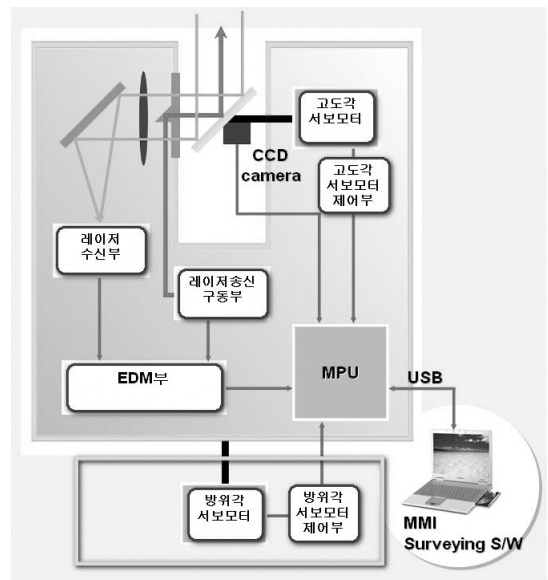


그림 2. 지상용 3차원 레이저 스캐너의 구조

각 블록의 기본 기능과 내용은 다음과 같다. 상부 프레임에 있는 거리 측정 EDM(Electronic Distance Measurement)부는 거리를 측정 하는 역할을 한다. 지상용 3차원 레이저 스캐너의 기술(Fröhlich, C 등, 2004)은 크게 3가지로 분류가 되는데 레이저 펄스의 TOF(Time of

Flight)를 이용하는 방식, 레이저 펄스의 위상을 측정 하는 방식, 광 삼각법을 이용하는 방식이 있다. 이번 설계에서는 TOF 방식을 이용하여 레이저 스캐너로부터 측정 목표물까지의 레이저 펄스의 왕복 시간을 측정한다. 측정된 왕복 시간에 빛의 속도를 곱하여 거리를 산출 하며 측정 목표물에서 반사되어온 레이저의 반사 강도 또한 EDM부에서 실시간으로 측정 한다.

MPU(Main Processor Unit)부는 서보 모터와 통신을 통해 사용자가 측정하고자 하는 스캔 범위를 제어하기 위해서 서보 모터의 동작을 관리한다. 그리고 EDM부에서 측정된 거리 정보 데이터와 반사 강도 데이터를 처리하며 외부 영상과의 맵핑을 위한 카메라 정보 데이터도 같이 처리한다. 최종적으로 이렇게 취합된 데이터를 후 처리 하여 호스트 컴퓨터에 유선 또는 무선으로 데이터를 전송하여 사용자에게 정보를 제공 하게 된다.

서보 모터 제어부는 MPU부에서 지령한 위치 제어 동작 수행을 하기 위해 서보 모터의 신호들을 피드백 받아서 모터 제어 알고리즘을 사용하여 모터의 회전 위치 및 토크 제어를 수행 한다. 서보 모터의 제어부에서 발생하는 처리 결과 및 에러 메시지들은 MPU부에게 전송 하여 MPU부에서 시스템을 관리 할 수 있도록 구성 되어 있다. 표 1은 개발 진행 중인 스캐너의 사양을 나타낸다.

표 1. 지상용 3차원 레이저 스캐너의 설계 사양

항 목	사 양
측정 거리	300m@90%
스캐닝 속도	50,000point/sec
거리 정밀도	3mm
위치 정밀도	5mm
Beam divergence	0.25mrad
측정 각도 범위	Horizontal : 360 Vertical : 270
각도분해능 (Horizontal/Vertical)	60urad / 60urad
레이저	근적외선
전원	24V DC
사용 환경	-20℃ ~ 40℃

개발 중인 3차원 레이저 스캐너는 기존 상용으로 판매 되는 제품과 가장 큰 차이점은 레이저 다이오드를 반도체

다이오드를 사용한다는 것이다. 반도체 다이오드를 사용하는 장점은 저가격화 및 다른 레이저 소스 대비 전력 소비를 줄일 수 있다는 것이다.

2.2.3 차원 레이저 스캐너의 위치 정확도

레이저 스캐너의 위치 정확도는 X축, Y축, Z축 기준으로 다음과 같은 식 (1)으로 표현될 수 있다.

$$\text{위치 정확도} = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$$

ΔX = Horizontal angle error

ΔY = Range error

ΔZ = Vertical angle error (1)

X축 오차는 방위각 모터에 의해서 발생하고 Z축 오차는 고도각 모터에 의해 발생, Y축은 EDM부의 거리측정 오차로 발생한다. 레이저 스캐너의 거리 측정 시 3축이 같은 크기의 오차가 발생한다면 3차원 위치 정확도는 다음 식 (2)와 같다.

$$\text{위치 정확도} = \sqrt{3^2 + 3^2 + 3^2} = \sqrt{27} \approx 5.19\text{mm} \quad (2)$$

지상용 3D 레이저 스캐너의 위치 정확도는 위의 식 (2)에서와 같이 모터의 각도 분해능에 의해 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

2.3.3 차원 레이저 스캐너의 서보 모터

지상용 3D 레이저 스캐너용 서보 모터의 선정은 레이저 스캐너의 위치 정확도의 성능과 크게 관련된 부분임으로 모터 동작 전압, 모터 최대 토크, 엔코더 분해능을 고려하여야 한다.

위의 고려 사항을 기준으로 선정된 모터는 모터의 내구성과 구동 토크를 고려하여 BLDC (Brushless DC)모터를 선정하였다. BLDC 모터는 일반 DC 모터의 최대 단점인 브러시와 정류자가 없기 때문에 내구성이 우수하며 일반 DC 모터 대비 정류 한계가 없어서 순간 허용 최대 토크를 크게 잡을 수 있다. 자세한 사항은 표 2와 같다.

표 2의 서보 모터의 사양에서 방위각 서보 모터의 엔코더는 1회전 시 9000카운터를 고도각 서보 모터는 1회전 시 2048 카운터를 Sine 과 Cosine 파형으로 출력한다. 레이저 스캐너의 시스템 설계 사양인 60urad 각도 분해

표 2. 서보 모터의 사양

항목	방위각 모터	고도각 모터
Maximum		
rated torque	6.33Nm	0.232Nm
Voltage	280V	24V
Continuous		
Powe	r285 wattl	7.2 watt
Encoder	9000 c/r	2048 C/r
Weight	2.27kg	0.2148kg
Temperature	-20℃~90℃	-20℃~90℃



그림 4. 고도각 서보 모터

능을 구현하기 위해서는 서보 모터 엔코더의 분해능을 체배기(interpolator)를 이용하여 높여야 한다. 체배기(interpolator)로 사용한 부품은 iC-Haus사의 iC-NQ이다.

다음의 식 (3)과 식 (4)는 체배기(interpolator)와 DSP(Digital Signal Process)를 이용해 엔코더 신호를 체배함으로 3D 레이저 스캐너의 각도 분해능의 사양의 3배 이상을 갖도록 설계한 결과를 보여준다.

방위각 모터:

$$9000[\text{pulse/Rev}] * 10[\text{Interpolator Factor}] * 4[\text{DSP}] = 360,000[\text{pulse/Rev}]$$

$$\text{Ex) } 2 * \pi [\text{rad}] / 360,000 = 17.453[\text{urad}] \quad (3)$$

고도각 모터 :

$$2048[\text{pulse/Rev}] * 50[\text{Interpolator Factor}] * 4[\text{DSP}] = 500,000[\text{pulse/Rev}]$$

$$\text{Ex) } 2 * \pi [\text{rad}] / 500,000 = 12.566[\text{urad}] \quad (4)$$

그림 3은 방위각 서보 모터와 그림 4는 고도각 서보 모터를 보여준다.



그림 2. 방위각 서보 모터

3. 지상용 3차원 레이저 스캐너 서보 제어기의 설계

3.1 3차원 레이저 스캐너의 서보 제어기의 설계

서보 제어기의 하드웨어 구조는 크게 제어를 담당하는 DSP(Digital Signal Processor)부, 모터 엔코더 분해능을 높이는 체배기(Interpolator), 모터 제어를 위해 구동 전류를 검지하는 전류 센서부, 검지된 모터 전류를 증폭하는 센서 증폭부(Sensor AMP), 모터 안전 동작을 위한 과전류 센서부, 제어기의 내부 시간을 측정 하는 실시간 시계부(Realtime Clock)부로 구성이 된다.

DSP(Digital Signal Processor)부는 TI사의 TMS320F28335를 사용하였다. TMS320F28335는 내부 엔코더 펄스 모듈(QEP)을 가지고 있어서 추가적인 모터 엔코더 신호를 처리 할 수 있도록 하였다. 또한 RS-232포트를 내장하여 외부 호스트와 통신이 가능 하다. 그림 5는 설계한 서보 제어기의 전체 블록도를 보여 준다. 그림 6은 제작된 서보제어기 실물이다.

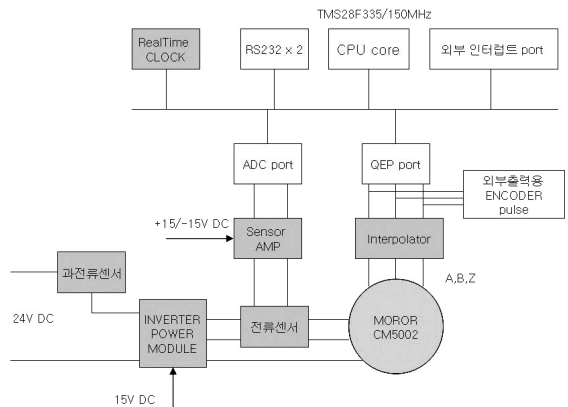


그림 2. 서보 제어기의 블록도



그림 6. 서보 제어기 실물

지상용 3차원 레이저 스캐너에서 위치 정밀도 및 서보 모터 토크의 효율적인 제어(Alberti, L 등, 2008)를 위해 그림7의 FOC(Field Oriented Control) 알고리즘을 적용하였다. 모터에서 발생되는 토크는 구동전류(id, iq)에 비례하므로 이 전류를 기준 명령으로 지정하여, 실제로 피드백 되는 전류(idF, iqF)가 기준 명령 값을 추정토록 하면 모터의 구동 토크는 정확히 구동 명령을 추종한다. 이런 전류 피드백을 사용하는 이유는 모터가 회전하면서 생기는 역기전력에 의해서 회전속도가 증가하면 토크가

감소하는 현상을 보정하기 위함이다.

FOC 알고리즘에서는 3상 전압을 벡터로 생성하여 3상 고정자 전류를 제어한다. 파크 & 클라크 변환을 통해 물리적 전류를 회전 벡터로 변환하면 토크 및 유속 요소가 시간에 따라 변하지 않게 되어 DC 모터와 마찬가지로 PI(Proportional & Integral) 컨트롤러와 같은 기존 기법으로 제어를 수행할 수 있게 된다. BLDC 모터는 구조상 고정자 유속과 회전자 유속이 서로 90도로 유지 되므로 모터에서 최대한의 토크를 발생시킬 수 있다. 그림 8은 Matlab을 이용한 FOC 알고리즘의 시뮬레이션 결과로 신호의 오버슈트 없이 안정적으로 제어됨을 볼 수 있다.

FOC 기법을 사용할 경우 모터 전류는 DC 모터에서처럼 2축 벡터로 변환된다. 프로세스는 세 개의 위상 모터 전류를 측정하는 것으로 시작된다. 실제로는 세 전류 값의 순간 합계가 0이 되기 때문에 세 개의 전류 중 두 개만 측정하면 세 번째 값을 구할 수 있다. 또한 전류 센서를 두 개만 사용하면 되기 때문에 하드웨어 비용이 줄어드는 효과도 얻을 수 있다.

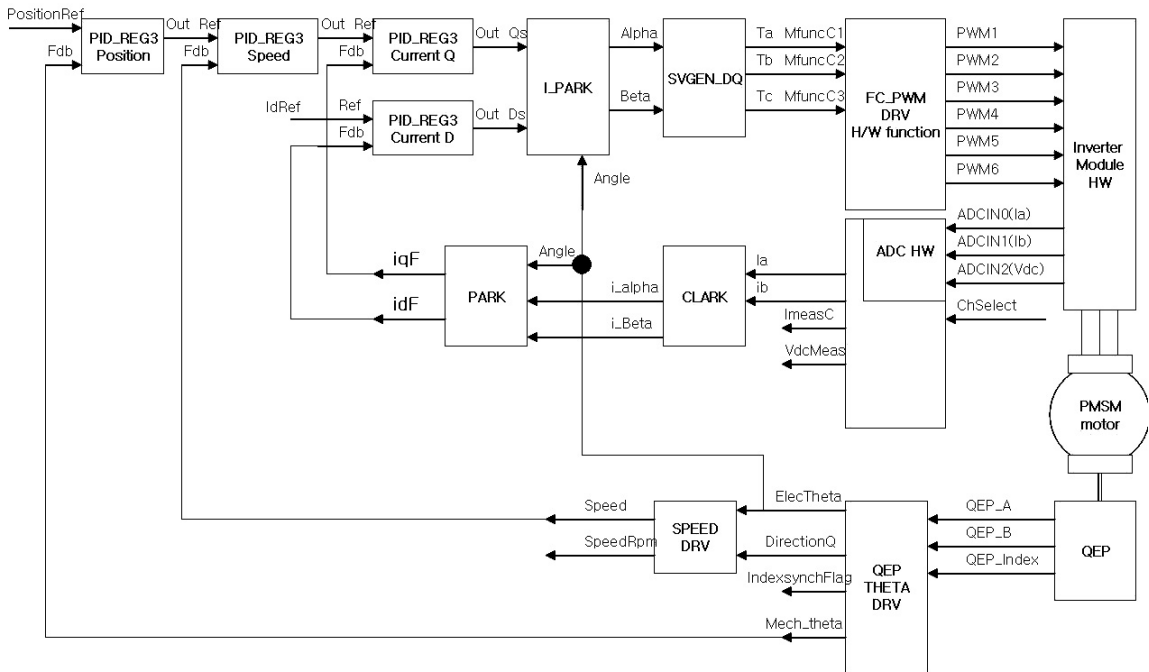


그림 7. 서보 모터 FOC 제어기 알고리즘 구성도

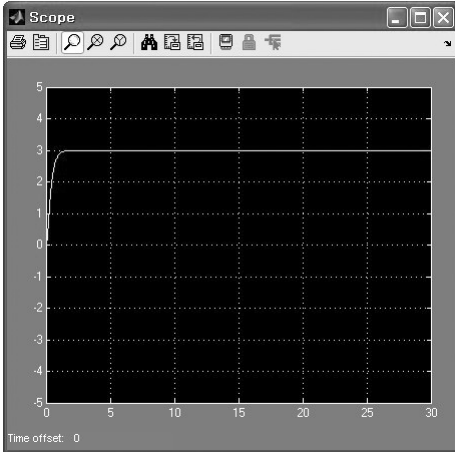


그림 8. FOC 알고리즘 시뮬레이션

3.2 서보 제어기의 실험 및 평가

3.2.1 엔코더 각도 분해능 실험

서보제어기의 각도 분해능 60urad을 확인하기 위해 오실로스코프를 이용하여 모터 엔코더의 신호와 체배기(Interpolator)의 각 출력인 A, B, Z의 신호가 정확히 체배가 되어졌는지 신호를 확인한다. 그림 9는 방위각 모터의 엔코더 신호(9000 c/r)가 체배기(Interpolator)를 통해 체배 된 결과를 보여준다. 그림 9의 오실로스코프의 파형에서 채널 1은 모터 엔코더의 A상, 채널 2는 B상, 채널 3은 Z상을 보여 준다. 채널 1 파형이 약 100Khz로 9000카운터의 약 10배가 체배 된 결과를 볼 수 있다.

그림 10은 FOC 제어 알고리즘으로 제어할 때 서보 모터의 피드백 되는 동작 전류 파형을 측정 한 오실로스코

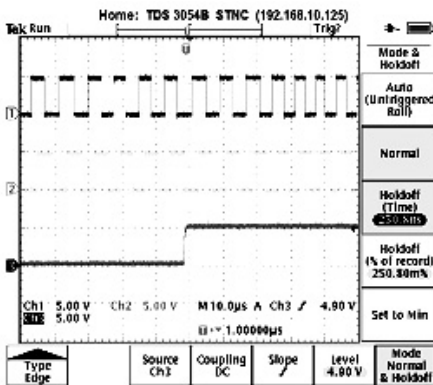


그림 9. Interpolator 출력(A, B, Z)

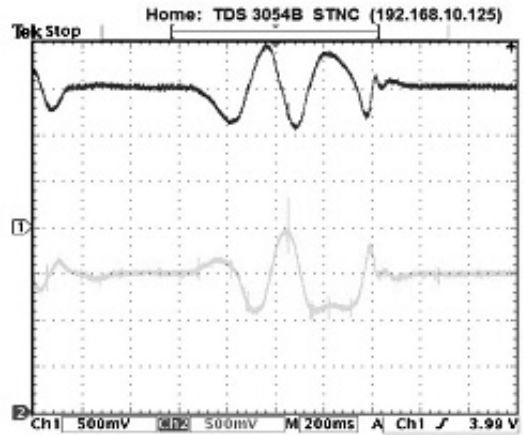


그림 10. 서보 모터 Feedback 전류 파형

프 파형이다. 그림 10과 같이 모터의 3상 고정자 전류에서 2상의 전류 신호(id, iq)만 FOC(Filed Oriented Control) 알고리즘에 적용 하였다

3.2.2 서보모터 위치 제어 평가

서보 모터의 위치 제어 평가는 체배기(Interpolator)가 내장된 별도의 서보 모터 제어기 보드를 측정 장비로 이용하여 모터의 엔코더 신호를 카운터 하는 방식으로 모터의 동작 각도를 확인 하였다. 정밀 측정기 보드는 14urad 분해능으로 체배기(Interpolator)를 설정 하였다. 다음 그림 11은 서보 모터 위치 제어 평가를 위한 시험 환경으로 향온 향습과 무진동으로 설계된 온도 챔버 내부를 보여 주고 있다.



그림 11. 서보 모터 위치 제어 평가 환경

서보 모터 위치 제어 평가를 하기 위해 서보 모터의 초기 점을 확인 하여야 한다. 서보 모터의 전원을 공급 하면 서보 제어기의 프로그램에 의해서 모터의 초기 위

치인 모터의 각도 초기 점을 먼저 찾게 된다. 서보 모터 제어기는 모터 초기 점의 위치에서 정지 한 후 사용자의 서보 제어 명령을 기다린다.

서보 모터의 초기점 기준에서 모터 동작 명령을 45°로 동작했을 때 정밀 측정기 결과를 기록한다. 총 시험 횟수는 정밀 측정기로 20회 측정하여 20회 결과 값의 평균과 표준편차로 확인 한다. 그림 12는 방위각 모터의 45° 이동의 측정 결과이며 그림 13은 방위각 모터의 90° 이동 측정 시험 결과의 히스토그램이다. 통계 분석을 위해 사용한 분석 프로그램은 Minitab을 이용하였다.

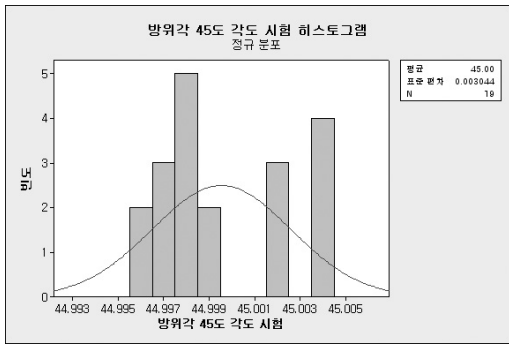


그림 12. 방위각 45° 시험 히스토그램

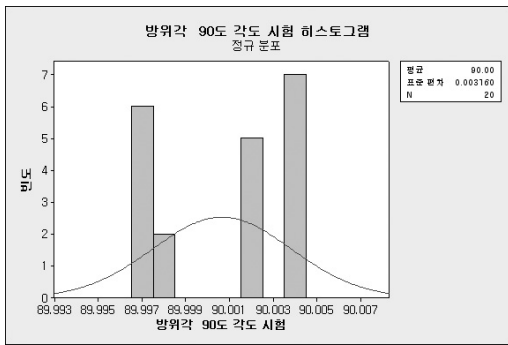


그림 13. 방위각 90° 시험 히스토그램

다음 표3은 측정 결과의 평균치와 표준편차를 보여준다. 표준편차(1σ)가 약 0.003044°이다. 이 수치를 초로 환산하면 약 11초이다. 이 값은 레이저 스캐너의 설계 요구 사항인 60urad(12초)을 만족한다.

표 3. 서보 모터 위치 제어평가 결과

방위각 모터	평균치	표준편차(1σ)
45° 이동	44.9997°	0.003044°
90° 이동	90.0006°	0.003160°

4. 결 론

지상용 3차원 레이저 스캐너의 위치 정확도는 레이저 거리 측정부인 EDM부의 거리 정밀도 성능과 두 개의 서보 모터 방위각 모터, 고도각 모터의 위치 정확도에 의해 결정됨을 알 수 있었다. 특히 두 개의 모터로 의해 발생하는 고도각 위치 에러와 방위각 위치 에러를 최소화함으로써 레이저 스캐너의 위치 정확도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

서보 모터의 위치 정확도를 높이기 위해 기존에 사용된 모터 속도 제어 알고리즘인 스칼라 제어 방식은 공급 전압과 주파수의 변화를 기반으로 하기에 모터의 급가속 및 급감속 운전에는 한계가 있으며 토크 제어의 어려운 단점이 있다. 벡터 제어방식인 FOC(Field Oriented Control) 제어를 적용하여 모터의 토크는 최대로 유지하면서 레이저 스캐너 위치 정확도 요구 사항을 만족할 수 있었다.

본 연구를 통하여 서보 모터의 여러 제어 방식 중에서 벡터 제어 방식인 FOC(Field Oriented Control)제어가 레이저 스캐너와 같은 정밀한 측정이 요구 되는 장비에 적합한 알고리즘으로 확인이 되었다. 결과적으로 서보 제어기가 이 알고리즘을 이용해서 스캐너 상부 몸체(5kg)의 부하에서도 정밀한 위치 제어의 구현(60urad)이 가능하였다.

추후 보완할 사항으로는 현재 실험실 수준의 결과에서 양산성을 고려한 설계가 필요하다. 그리고 현재의 방위각 서보 모터의 경우 저전압에서 최대 토크를 발생 할 수 있도록 개선이 되어져야 한다. 이번 연구에서 24V전원에서 5Nm의 토크가 레이저 스캐너용 방위각 모터 최적 사양으로 도출 하였다. 고도각 모터의 경우는 모터 엔코더 출력이 현재 2048 분해능인데 4096 분해능 출력을 가지면 좀 더 위치 제어 오차를 줄일 수 있다. 이러한 서보 모터의 개선 사항들이 서보 모터 제조사와 협의가 이루어져 서보 모터를 개선하는 연구가 필요하다. 또한 레이저 스캐너의 스캐닝 속도를 향상하기 위해서는 서보 모터의 60urad의 위치 정밀도를 유지하면서 서보 모터의 빠른 응답 속도 구현이 필요 하다. 이런 응답 속도 개선 부분에 대해서도 서보 모터 제어기의 추가적인 연구가 필요하다.

그리고 서보 모터의 개선 사항과 더불어 기구적으로 발생하는 축 오차에 대한 보상방법(Hans-Martin Zogg 등, 2007)이 연구가 되어야 한다. 축 오차에 대한 보상은 전

자 부분, 기구 부분, 소프트웨어 부분들이 연관 되어 있기에 통합적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업-지능형 국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(과제번호07국토정보C02-2-2-03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

Fröhlich, C.; Mettenleiter, M.(2004), Terrestrial Laser scanning -- new perspectives in 3D surveying. *International society of photogrammetry and remote sensing*, Freiburg, www.isprs.org/commission8/workshop_laser_forest/

Alberti, L.; Bianchi, N.; Bolognani, S. (2008), Field oriented control of induction motor: A direct analysis using finite element, *IECON 2008*. IEEE, Florida, Volume , Issue , pp. 1206-1209.

Hans-Martin Zogg and Hilmar Ingensand (2007), Terrestrial 3D-laser scanner ZLS07 developed at ETH ZURICH: An overview of its configuration performance and application In: *Swiss Federal Institute of Technology*, Zürich, www.geometh.ethz.ch/research/laserscanning

(접수일 2009. 3. 20, 심사일 2009. 4. 17, 심사완료일 2009. 4. 21)