

스텝모터를 활용한 정밀 스캐닝 구현에 관한 고찰

전 삼석* 박 찬원**

*한국폴리텍1대학 전기계측제어과 **강원대학교 전기전자공학부

Implementation of the laser scanning using the step motor

Sam-Suk Chun* Chan-Won Park**

*Korea Polytechnic I College **Dept. of Electrical and Electronics Eng. Kangwon National University

Abstract - This report is the study for laser scanning. Scanning control of CO₂ laser, He-Ne laser, used for the treatment of body skin, has relatively low band about hundred Hz. It could be used as a substitute for expensive galvanometer that is the established scan method, which operates the number of KHz movement by using step motor when it operates low speed.

To increase the accuracy of step motor's the angle of rotation, We could materialize 100Hz low band by using open loop, closed loop method with microprocessor. This causes it to be stable even direction by attaching electric capacity sensor. Therefore, We could expect to reduce the cost by manufacturing low band scanner rather than costly feedback galvanometer.

1. 서 론

레이저(Laser)는 산업용 및 의료용으로 활용 범위가 넓으며 레이저 빔(Laser beam)을 X축 Y축으로 편향시켜 스캐닝(Scanning)하여 마킹(NdYag 고체레이저) 및 인체의 피부치료(CO₂, HeNe)등에 이용하고 있으며 대부분 고 가격의 고속 갈바노메터(Galvanometer)를 사용하고 있다. 본 연구에서는 소형 스텝모터(Step motor)에 비편향 미러를 장착하여 낮은 주파수 동작의 안정된 스캐닝(Scanning)방법을 실험 하였다.

스텝(Step motor)의 구조적 특성상 빠르게 좌우로 진동시킬 때 회전관성이 크므로, 구동토크는 적지만 소형모터를 사용하였으며, 진동 구동 시 자기 히스테리 효과를 개선하기 위하여 모터중심축에 정전용량 센서를 부착하여 위치검출용 피드백(feed back)센서회로를 추가하여 기존의 오픈 루프 갈바노메터(open loop Galvanometer)보다 회전각도의 정밀도를 향상시켰고, 본 연구에서 마이크로프로세서로 오픈루프, 클로즈드 루프 방법을 조합하여 정밀실험 한 결과 스캐닝능이 우수하였으며 소형 스텝모터로도 수 10Hz 정도의 저속에서 안정된 레이저 스캐닝을 구현할 수 있음을 확인하였다.

2. 본 론

2.1. 레이저 스캐닝 및 미러크기 결정

레이저 스캐닝용 범위로 레이저프린터, 마킹, 바코드리더, 레이저용접, 인쇄, 제판 및 의료용 정밀 피부스캔 등에 활용되고 있으며 기본적으로 스텝로스터(Step Raster), 벡터 스캔(vector Scan)방법이 사용된다.

스캐닝 시 갈바노메터를 미세진동 시키므로 회전관성(rotational inertia)이 발생한다. 이러한 관성 문제로 미러의 무게 및 크기는 스캔속도 제한에 결정적인 영향을 주므로 스캔각도, 레이저 빔 다이아미터(Laser beam diameter), 미러 열전도, 갈바노 토크(torque)등을 고려하여 최적화가 필요하다 2차원 주사시 X-Y미러 사이즈에 약간의 차이를 둔다.

2.2. 레이저 빔 편향기

레이저 빔의 진행 방향을 편향시키는 방법은 기계식, 음향광학, 전기 광학식 등이 있으며 가장 간단한 것은 기계적 구동방식이다. 소자는 반사경이며 연마한 거울 표면에 반사율이 높은 금속(Au, Cr, Ar)을 진공 증착한 표면경을 사용한다. 반사경은 평면도, 열전도(두께) 회전 관성(무게-규격)등을 고려하여 설계하고, 기존의 기계식 광 편향기는 갈바노메터 및 회전 다면경 형태가 있으나 고 가격이며 반사 빔의 각도는 미러의 변화 각도보다 2배 변화하므로 1스텝 15도 스텝모터인 경우 30도를 편향시킬 수 있어 스텝모터를 스캐닝에 충분히 활용할 수 있다.

표 1. 각종 Laser 편향기의 비교

종류	형식	주사각도	주사분해도	주사선수/sec	
기계식	Galvanometer	반사	중	~ 10,000	~ 1,000
	회전다면경	반사	대	~ 10,000	~ 10,000
음향광학	Beam 편향기	회절	소	~ 1,000	~ 100,000
전기광학	Beam 편향기	굴절	소	~ 100	~ 10,000,000

2.2.1 갈바노메터 편향기

자장속에 놓인 코일에 전류를 흘렸을 때 발생하는 힘을 이용하는 검류기

의 회전원리를 이용한 것이며, 현재 자주 사용하고 있는 것은 가동부분에 가동코일이 붙지 않은 가동 철편형으로 회전축에 불 베어링 및 비틀림 스프링을 붙여 구동 전류와 회전각이 비례하도록(open loop형) 사용하나 회전시 히스테리시스가 있으므로, 축을 연장하여 회전각 센서(광학 또는 콘덴서 방식 - closed loop형)를 부착하여, 이것을 피드백하여 정밀도를 높여 편향에 사용하고 공진을 이용하면 빠른 사인파로 주사시킬 수 있고, 수 KHz의 진동이 가능하다.

2.2.2 가동철편형 갈바노메터의 구동원리

코일에 전류를 흘렸을 때 만들어지는 자계의 세기는 전류에 직접 비례한다. 이 자계 속에 가동 철편을 놓으면 그 자화의 세기는 전류에 비례하며 이 철편에 작용하는 흡인력은 자계와 자화 세기의 곱에 비례하기 때문에 그 크기는 전류의 제곱에 비례한다. 또한 가동 철편과 고정 철편을 설치하면 그 사이에 작용하는 반발력의 크기는 코일전류의 제곱에 비례한다. 이와 같은 원리를 응용한 레이저 편향기가 가동철편(moving-iron)이고 그 가동부 전류 I는 정현파인 경우에는 I의 제곱은 다음 수식으로 표현된다.

$$i^2 = (Im \sin \omega t)^2 = Im^2/2 (1 - \cos 2\omega t) \text{ -----(1)}$$

이때 계기의 가동 부분은 주파수가 1[Hz] 이하인 낮은 경우를 제외하고 2 ω 로 변화 하는 부분에는 동작하지 않고, 전류 순시 값 제곱의 평균값은 실험값의 제곱으로 이러한 경우 구동토크는 전류 실험값의 제곱으로 표현된다. 제어토크는 회전축 비틀림 스프링 또는 마찰계에 인가되고 회전각에 비례하므로 실험값으로 응답은 제곱형태로 동작한다. 또한 주파수가 높아지면 철편속에 와전류가 발생하여 자계가 변화하여 히스테리시스가 발생하고 이러한 이유로 전류가 상승하거나 하강할 경우에 오차가 발생한다.

2.2.3. 레이저 미러의 반사율

레이저를 스캐닝 할 때 빔의 경로를 바꾸는 반사경의 선택이 매우 중요하다. CO₂ 레이저 반사경은 금속거울을 사용하고 구리 또는 베릴륨구리를 소재로 해서 사용하거나, 거울 면에 금이나 은을 코팅한 것 또는 다시 산화방지 막을 붙인 것이 일반적으로 사용된다. 반사경은 광학변형이 적고 반사율이 높고 흡수가 작은 것을 사용하고 표2는 재료에 따른 시제품의 반사율의 특성이다.

표 2. 각종 CO₂ 레이저 반사경의 특성

레이저 반사경 재질	표면 코팅	시제품 반사율 (%)
Cu	없음	99.2%
Cu	Au	99.4%
Cu	Ag	98.8%
W	없음	98.1%
W	Au	99.1%

레이저 반사는 스넬법칙 ($\sin\theta = n * \sin\theta$, n= 굴절율)에 의하여 반사 및 굴절이 되고 이때 흡수 및 산란 손실이 발생한다. 반사경에 의한 레이저 beam 손실은 될 수 있는 한 작은 값으로 억제해야 하며 표면은 유리라도 거울면은 금속으로 되어있다. 반사경 제작 시 고 진공 증착에 의한 100%의 반사율이 얻어지지 않고 파장에 의한 어느 정도의 차이는 있으나, 가시광선에서는 90-99%의 반사율이 된다. 따라서, 유리표면의 반사손실을 가하면, 약 10-20% 가까운 손실이 발생한다. CO₂ 레이저에서는 유리 기판에 금을 증착한 면을 반사경으로 사용한다. 굴절율이 다른 2종류의 물질을 증착에 의해 교대로 몇 층을 겹친 유전체 다층막을 사용하고 박막은 광 파에 대하여 약 1/5파장의 두께가 되게 한다. 반사는 멀티코팅 면의 굴절율의 차이로 일어나며 임피던스의 비가 되고, 박막의 두께가 $\lambda/4$ 일 때 실용의 반사율이 98%이면 투과율이 1.8%가 되어, 0.2% 정도의 손실이 발생하고 주된 손실은 빛의 흡수 손실이고 산란손실도 발생한다. 유전체 다층막의 재료는 저 굴절율 재료로서 석영유리와 같은 산화실리콘(SiO₂)을 사용하고, 고 굴절율 재료로서 강한 제질인 산화티탄(TiO₂)를 사용한다.

3. 실험 제작 및 고찰

3.1 시스템구성

실험에 사용한 CO2 레이저 (30 watt) 스캔 시스템은, 주 제어장치와, X-Y 2축 스캔 제어부(고속초퍼방식의 서보시스템으로 구성), 스텝모터형 갈바노메타(정전용량변위 센서를 부착) 직접 제작하여 구성하였고, 클로즈드 루프형으로 정밀하게 작동하도록 제작하였으며, 컴퓨터 인터페이스로 16bit D/A 변환기를 구성하고 프로그램으로 정밀 위치제어를 하여 문자 및 그림 데이터를 dot scan 방식으로 마킹 실험을 하였다.

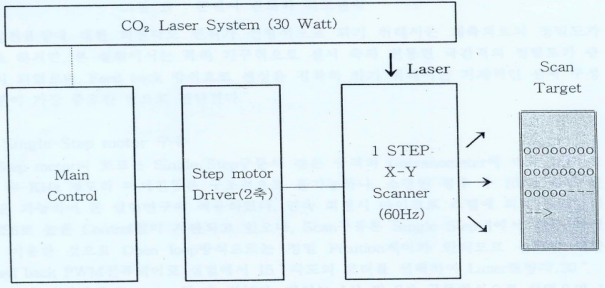


그림1 . 2 X-Y Scan 시스템 블록도

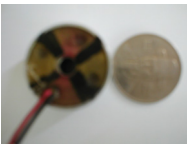


그림2. 정전용량센서 고정부



그림3.정전용량센서 가동부

3.2 CO2 레이저 시스템

본 실험에 사용한 CO2 레이저는 30Watt급으로 mode 레이저 튜브를 사용하였다. 레이저 출력은 1-30 와트를 PWM 방법으로 제어하였고, 고전압 발생은 페라이트 코어 트랜스의 편자현상을 최소화 시키기 위해 하프 브리지 방법을 이용하였으며, 브리지 특성상 고속으로 스위칭 할 때 구동 트랜지스터의 축적시간에 의한 전원단락을 고려하여 공진형 승압 회로를 설계하였다. 또한 스위치 펄스를 발생시키기 위해서는 수십 K-Volt 직류 전압이 필요하고 고전압을 발생시키는 방법으로 승압 트랜스와 출력배압 단수를 증가하여 사용하나 배전압 단수가 높을수록 출력저항이 급속히 증가하여 에너지 손실이 발생한다. 이러한 이유로 레이저 공진 튜브에 공급하는 고전압부의 출력임피던스를 적게 하기 위하여 AC 220V 입력단을 2배압 정류하여 출력저항을 줄여서 에너지 효율을 증가시켜 사용하였다.

3.3 스텝모터 제어

스텝모터의 종류는 가변릴럭턴스(Variable Reluctance)형, 영구 자석형(Permanent Magnet), 복합형 등이 있으며 1 Step 내에서 갈바니 형태의 미세 진동 시 회전관성을 고려하여 소형의 PM타입을 채택하였다. 마이크로 스텝의 소프트한 포지션유지 및 센서 피드백 방식으로 정밀 구동 하였으며, D/A 변환기 위치제어 데이터와 센서좌표 데이터를 비교하는 PWM 정류구동 방식으로 제어하였다(그림4참고).

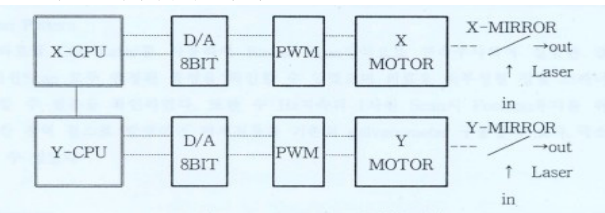


그림4. 스텝 모터 드라이버 블록도

3.4 정전 용량 변화를 이용한 미소 각도측정

콘덴서 용량 변화에 의한 변위측정은 수[nm]의 정밀도가 있으며, 정밀 스캔 구동을 하기 위하여 스텝모터측에 콘덴서 센서를 부착하여 용량 변화로 미소 각도를 검출하는 회로를 구성하였으며 빠른 정역회전 시 자기히스테리시스 오차를 보정한 클로즈드 루프 컨트롤 방식을 채택하였다.

정전용량 C는 다음 식과 같으며,

$$C = (\epsilon * S) / x$$

ϵ : 극판간의 유전율, S: 대향 면적 x : 극판간의 거리

실험에서는 극판거리 x를 상수 (constant : 0.05mm)로 하여 원통전극의 센싱면적(s)을 변화시켜 콘덴서 용량변화로 scan 각도를 측정하였다.

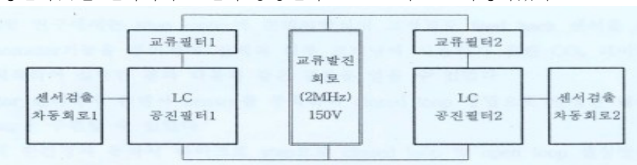


그림5 AM방식 가도센서 측정회로 블록도

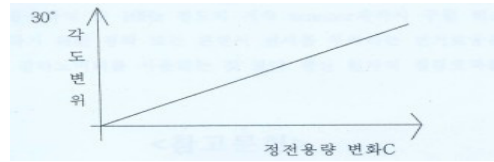


그림6 콘덴서 변화와 각도 변위

정전 용량에 대한 회전각도 변위가 선형적으로 되기 위해서는 계측회로의 정밀도가 매우중요하고, 본 실험에서는 특히 기구적으로 센서 축과 원통면 극간격의 정밀도가 중요시 되었으며, 피드백 방식으로 센싱을 정확히 하기 위해서는 기계적인 센서 구성 부분이 가장 중요한 것으로 판단된다.

3.5 스텝모터 구동

스텝모터 토크는 구동시 같은 규격의 갈바노메타에 비해 1/4정도로 수KHz 정도의 미세진동은 구조적으로 불가능하나, 소형인 경우 수 10Hz 저속 진동은 가능하여 본 실험연구에 적용하였다. 연속 회전 시 마이크로 스텝에 의한 분해능이 1/256로 높은 컨트롤 칩이 시판되고 있으나, 스캔 구동은 1스텝내에서 진동 특성을 이용한 것으로 오픈 루프방식으로는 정밀 위치제어가 안되므로 센서에 의한 피드백 PWM 전류제어로 실험에서 15° 각도의 모터를 선택하여 레이저 편향각 30°를 보다 안정되게 스캐닝할 수 있었다. 제어는 1상 및 2상 구동방식으로 하였으며 1상 방식에서 안정적인 특성이 있었고, 2상 전류제어 구동 방식에서 주파수를 보다 높일 수 있었다.

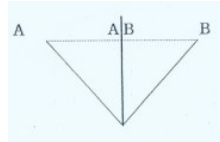


그림 7 상구동(15°),

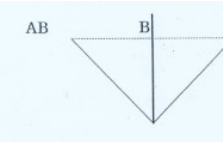


그림 8 상구동(15°)

3.5 스캔 패턴

30W급 CO2 레이저를 사용하여 로스터 스캔(Raster Scan)방식으로 연속 주사하여 실험한 결과 1-2 차원 스캔 모두 안정된 특성을 확인할 수 있었으며 렌즈의 초점거리가 짧을수록 마킹해상도가 증가함을 확인하였다. 또한 수 Hz 저속의 1차원 스캔시 위치유지를 위해 필요한 정역 펄스로 발생하는 미세진동을 기존의 갈바노메타 구동방식 보다 극소화 시킬 수 있었다.

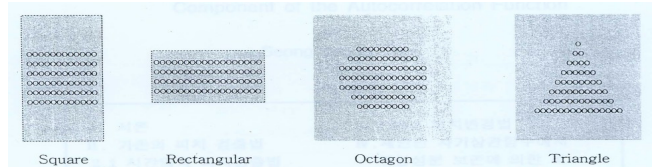


그림9. 실험에 사용한 스캔 패턴도

4. 결 론

본 실험제작 연구에서는 스텝에 콘덴서방식의 고정밀도 피이드백 센서를 부착 후 갈바노메타 기능을 부여하여 마킹에 사용하기 위한 CO2 레이저 스캐너를 제작하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 스텝모터 센터 축에 콘덴서 센서를 부착하여 클로즈드 루프방식으로 안정된 레이저의 스캐닝을 구현할 수 있었다.
2. 스캐너의 순간정지 동작 시 마이크로 스텝으로 클로즈드 루프 및 오픈 루프 센싱방식으로 제어하여 기존의 갈바노메타 구동방식 보다 위치유지 정역 펄스에 의한 미세진동을 보다 극소화시킬 수 있었다.
3. 스텝모터를 응용하여 수 10Hz 정도의 저속 스캐너 제작시 구동 히스테리시스에 의한 오차를 보상하기 위한 광학 또는 콘덴서 센서를 부착하는 번거로움은 있으나 고가격의 피이드백 갈바노미터를 사용하는 것 보다 생산원가의 절감효과를 기대할 수 있었다.
4. 최근 스텝모터에 광학 엔코더를 부착하여 1회전 1만펄스(1회전 200스텝 기준, 1스텝 50등분) 마이크로스텝 제어 컨트롤러가 시판되고 있으며, 본 실험에서 구성한 정전용량센서를 스텝모터의 회전 제어에 응용할 경우, 초정밀 미세제어에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

<참고문헌>

- [1]. 서창덕, "레이저로 아름다운 세상을 가꾼다", 예문, 1995
- [2]. 전자통신학회 편, "실용레이저 기술", 기전연구사, 1993
- [3]. 기전편집부, "레이저와 화상", 기전연구사, 1974
- [4]. 기전편집부, "응용레이저 가이드", 기전연구사, 1993
- [5]. "월간레이저기술", 한국정보 산업센터, 1999-2000
- [6]. "월간전자기술-마이크로 스텝제어", (주)천단, 2000.9
- [7]. 세운편집부, "전력제어회로 설계", 도서출판세운, 1985
- [8]. 세운편집부 "스텝모터의 제어회로설계", 도서출판 세운, 1988