

정밀 좌표측정용 머신비전 시스템의 광학적 해석에 관한 연구

이 은 호*

A Study on the optical aspects of machine vision based dimensional measurement system

Eun-Ho Lee*

ABSTRACT

A novel method of dimensional measurement using machine vision, which is called Landmark Tracking System, has been developed. Its advantages come from tracking only the bright, standard shaped "landmarks" which are made from retroreflective sheets. In the design of the LTS, it is essential to know the relationship between optical parameters and their influence on system performance. Such optical parameters include the brightness of landmark image, the illumination system design, and the choice of imaging optics. And the performance of retroreflective material also plays important role in the LTS performances. Influences of such optical parameters on LTS's dimensional measurement characteristics are investigated, with respect to the retroreflective material, the imaging optics, and the illumination system. Measurement errors due to parameter variations are also analyzed. Experiments are performed with a LTS prototype. Retroreflective characteristics are verified, and the LTS's measurement performances are measured in the form of repeatability and accuracy. Experimental results show that the LTS has repeatability better than 1/30,000 of a field of view(30 degrees), and accuracy better than 1/3,000 of a field of view.

1. 서 론

로봇, 수치제어 공작기계 등의 자동화장비에서 좌표를 측정하는 방법은 크게 간접식과 직접식으로 나뉜다. 간접식 좌표측정은 센서를 링크 구조등의 기구학적 구조를 사용하여 측정을 원하는 부분과 연결하여 측정하는 방식으로, 로봇의 관절각에서의 각도변위를 측정하여 end effector의 좌표를 계산하는 방식과 공작기계에서 리드스크류의 회전수를 측정하여 공구의 움직임을 계산

하는 방식이 이에 속한다. 직접식 좌표측정은 측정을 요구하는 부분에 센서를 직접 사용하는 방식으로, 시스템이 고속화, 정밀화하여 시스템의 동적 특성이 측정치에 영향을 미치게 됨에 따라 직접방식으로 좌표를 측정해야 할 필요성이 점차 증대되고 있다(1, 2). 직접식 위치 측정은 많은 경우 비접촉 방식을 사용하는 것이 요구되며, 이 경우 사용할 수 있는 방법은 사용되는 물리적 에너지의 형태에 따라 다음과 같이 나뉜다.

- 초음파 : 초음파 거리계, 장애물 회피 센서, 근접센

* 서울대학교 제어계측신기술연구센터

서, 어군 탐지기 등

- 전파 : 레이더
- 빛 : 머신비전 센서, 레이저 거리계, LIDAR
- 자기력 : 근접센서
- 전기용량 : 근접센서

이 방법들은 각각 사용범위와 정확도에서 큰 차이가 있으며 이 중에서 일반 산업현장에서 요구되는 측정범위와 정확도를 만족시키는 것으로 머신비전을 이용한 좌표 측정을 들 수 있다.

CCD(charge coupled device) 카메라를 이용한 머신비전이용 좌표 측정 장치는 일반적으로 처리시간이 길고 측정정도가 높지 않은 결점들을 가진 것으로 알려져 있으나 이는 좌표정보를 갖지않는 화면 내의 다른 모든 물체에 대해서도 영상처리를 행하는 것에 한 원인이 있다. 처리속도에서의 문제점은 일정형상을 가진 표적을 제작하여 화면에서 표적의 영상만 추적함으로써 해결할 수 있으며 이에 기초한 머신비전 시스템의 연구는 주행로보트의 위치추정에 많이 사용되었다(3, 4, 5, 6). 정밀도 문제의 경우, 항공우주 분야에서는 이미 star tracker 등에서 머신비전 시스템을 이용하여 sub-pixel 수준의 고정도 좌표 측정을 수행하고 있다(7, 8, 9, 10). 본 연구에서는 이 두가지 방식을 결합하여, 고정도, 고속의 머신비전 이용 좌표측정시스템인 Landmark Tracking System(LTS)을 개발하였다(11, 12, 13). LTS의 설계에서 고려된 사항들은 다음과 같다.

- 1) 다른 물체보다 훨씬 밝은 표적을 만들기 위하여 재귀반사표적(retroreflective landmarks)를 사용한다.
- 2) distortion이 없는 영상을 위하여 일반렌즈가 아닌 바늘구멍 사진기를 사용한다. 재귀반사표적과 바늘구멍사진기의 결합은 측정표적 이외에는 다른 물체가 보이지 않는 어두운 영상을 가능하게 하는 장점도 갖게 한다.
- 3) 전자플래시 방식의 고속 조명을 사용하여 셔터를 없앤다(43).
- 4) full-digital 방식의 카메라와 이와 연결된 전용 마이크로컴퓨터를 사용한다.
- 5) 고속, 고정도 측정을 위하여 무게중심법을 영상처리 방법으로 사용한다.

본 논문에서는 재귀반사 표적과 바늘구멍사진기를 이용한 정밀위치측정시스템을 설계하고 운용하는데 있어

고려해야 할 광학적 요소들에 대하여 고찰하였다. 재귀반사지의 일반적 광학특성과 머신비전 시스템에서의 성능 및 재귀반사의 특성을 활용하는 조명장치를 설계하는 방법에 대하여 해석적 방법으로 연구가 수행되었다. 또한 재귀반사 특성을 활용하고 좌표측정의 오차를 최소화하는 optics로서 바늘구멍사진기를 채택하고 Fresnel diffraction theory를 이용하여 가장 우수한 화질의 영상을 제공하는 바늘구멍의 크기를 구하였다. 또한 좌표 측정오차의 원인 중에서 광학적 원인들에 대하여 해석하여 조명의 불균일성과 바늘구멍의 두께 등으로 인하여 각각 발생하는 좌표 측정 오차의 형태와 크기를 구하였다. 실험은 LTS의 prototype을 이용하여 수행되었으며 앞서 구한 재귀반사표적의 광학적 특성을 검증하고, 좌표측정의 성능을 camera calibration 등을 거쳐 반복성과 정확성으로 나타내었다.

2. 본 론

2.1 조명 해석

2.1.1 재귀반사지의 광학적 특성

빛의 반사는 반사광의 형태에 따라 정반사(specular reflection), 난반사(diffuse reflection), 재귀반사(再歸反射, retroreflection)의 3종류로 나뉜다(Fig.1). 정반사는 빛의 입사각과 반사각이 서로 같게 나타나는 반사로서 유리 표면이나 연마된 금속 표면에서 일어나며, 난반사에서는 입사광의 방향에 무관하게 반사광이 모든 방향으로 균일하게 발생한다. 재귀반사에서는 반사광이 입사광과 같은 방향으로 발생한다(14). 재귀반사를 나타내는 물체로는 Fig.2에 나타난 corner cube mirror나 glass bead type retroreflector를 들 수 있다. corner cube mirror는 서로 90도 각도로 놓여진 3개의 반사면으로부터의 반사를 이용하며 대개 완전 내부반사를 이용한다. glass bead retroreflector에서는 거울면이 코팅된 유리구슬에서의 빛의 굴절을 이용하여 재귀반사를 얻으며 유리구슬의 크기 매우 작게(dia. < 100 μ m)할 경우 평면에 도포하여 재귀반사면으로 활용할 수 있다. 대표적인 제품에는 3M에서 생산되는 Scotchlite가 있으며 이는 교통안전표지판 등의 제작에 많이 사용된다(15).

재귀반사의 성능은 retroreflector에 가해진 빛의 양과 반사된 빛의 양의 비율로 표시하며 여기에 사용되는

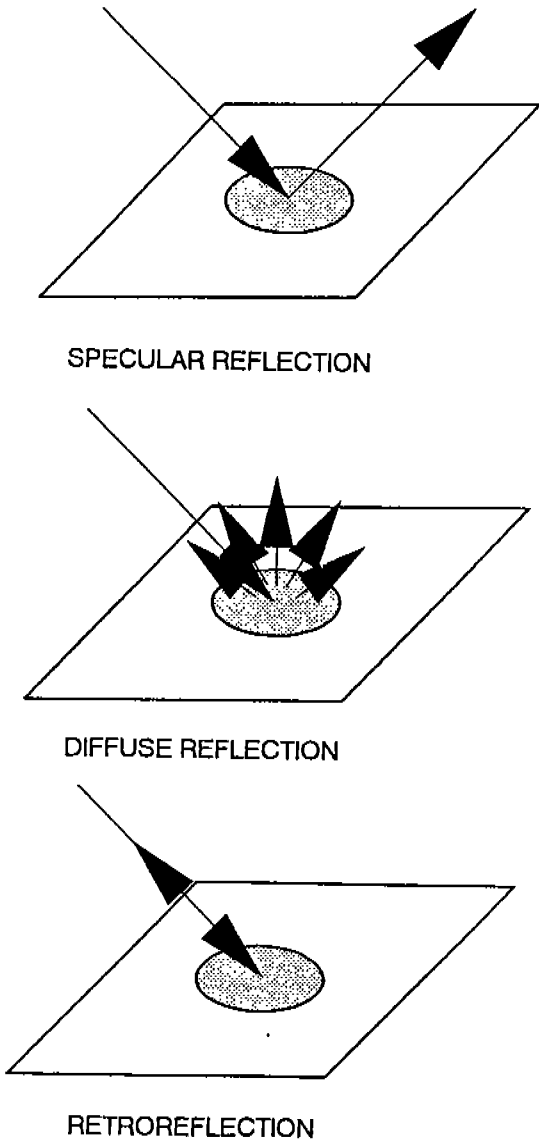


Fig.1 Types of reflections

계수로는 다음과 같은 것이 있다(16, 17, 18).

- 1) 광도계수(光度係數), coefficient of luminous intensity, R (또는 specific intensity) retroreflector에서 관측점 방향으로의 Luminous intensity (I , watts/sr)를 retroreflector 표면에서 입사광선에 수직인 평면 위에서의 illuminance (E_{\perp} , watts/m²)로 나눈 값이다.

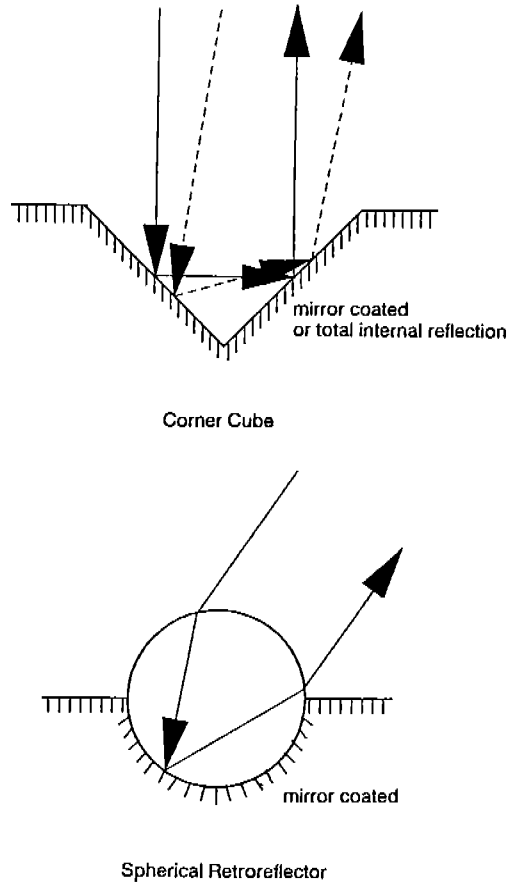


Fig. 2 Retroreflectors

$$\left(\frac{\text{watts/sr}}{\text{watts/m}^2}, \text{ 또는 } \text{cd} \cdot \text{lx}^{-1} \right)$$

$$R = \frac{I}{E_{\perp}} \quad (1)$$

- 2) 재귀반사계수, coefficient of retroreflection, R' (또는 specific intensity per unit area) coefficient of luminous intensity R 을 재귀반사표면의 넓이 A 로 나눈 값이다. (sr⁻¹ 또는 cd · lx⁻¹ · m⁻²) 표면의 광학특성을 표시하며 특히 sheet 형태의 retroreflector의 특성표시에 사용된다.

$$R' = \frac{R}{A} = \frac{I/E_{\perp}}{A} \quad (2)$$

3) 휘도(輝度) 계수, coefficient of luminance, $\frac{L}{E_{\perp}}$ (또는 specific luminance) retroreflector 표면에서 관측방향으로의 휘도(luminance L , watts/m²·sr)를 retroreflector에서 입사광에 수직인 평면 상에서의 illuminance(E_{\perp})로 나눈 값이다. (sr⁻¹ 또는 cd·m⁻²·lx⁻¹) R' (coefficient of retroreflection)과는 달리 입사각에 무관한 특성을 얻을 수 있다.

$$\frac{L}{E_{\perp}} = \frac{I/A \cos \theta}{E_{\perp}} = \frac{R'}{\cos \theta} \quad (3)$$

여기에서 θ 는 관측각이다.

이 상수들은 주로 Fig. 3과 같이 retroreflector와 광원, 센서가 배치되었을 때 정의되는 observation angle, entrance angle 등을 매개변수로 사용하여 표시한다. 재귀반사특성은 대개 observation angle의 변화에 민감한 특성을 보인다. Fig. 4에 도시한 Scotchlite #3870의 경우 observation angle이 1도 보다 커지면 R' 의 값이 급격하게 떨어짐을 알 수 있으며 entrance angle은 20도 까지 증가하더라도 R' 의 감소가 적음을 알 수 있다(19). 완전 난반사표면(diffuse surface)의 equivalent R' 이 $1/\pi$ 이므로, Fig. 4에 나타난 retroreflector는 observation angle을 작게 유지하는 조명이 가해질 경우 난반사표면 보다 1,000배 이상 밝게 보인다는 것을 알 수 있다(16, 17, 18).

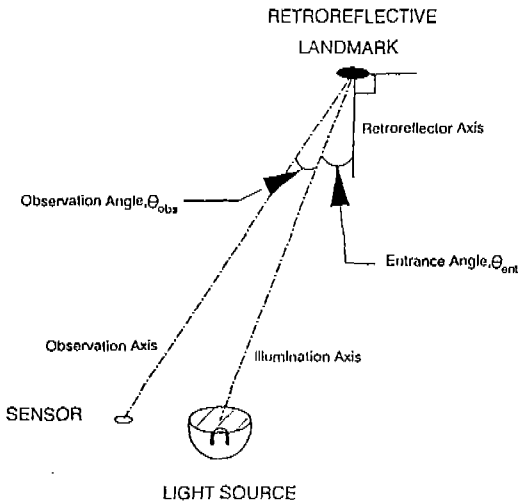
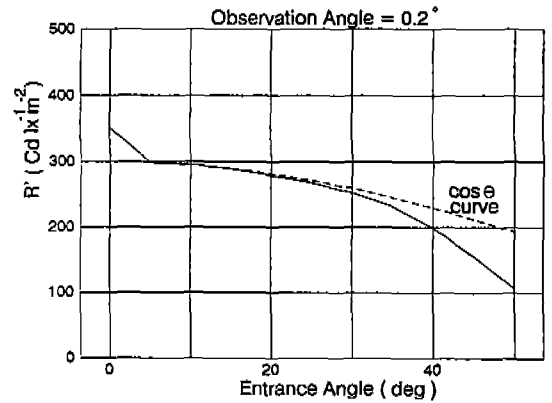
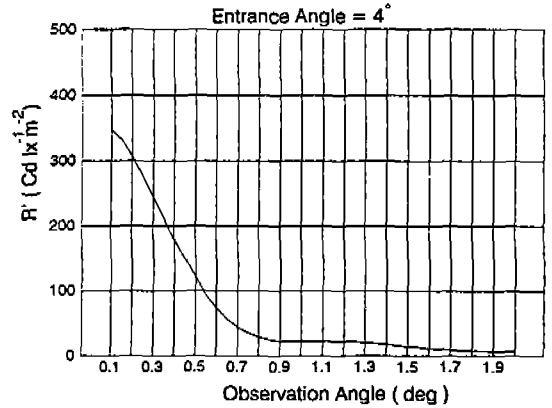


Fig. 3 Optical elements in retroreflector analysis

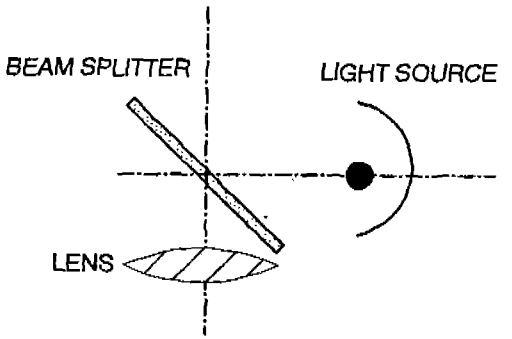


Material : Scotchlite #3870 Grey

Fig. 4 Retroreflectance change due to observation angle and entrance angle

2. 1. 2 재귀반사 표적을 위한 조명 설계

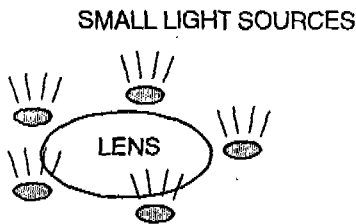
Landmark Tracking System의 영상에서 재귀반사표적과 그 외의 물체와의 명도비(contrast)를 극대화시키기 위해서는 observation angle을 작게 유지하는 조명장치가 요구된다. 이러한 조건을 만족시키는 조명방식들은 Fig. 5에 제시된 바와 같다(20, 21, 22). 여기에서 50% beam splitter를 사용하는 coaxial 조명은 observation angle이 항상 0이므로 재귀반사지의 성능을 최대로 활용할 수 있으나 beam splitter에서의 반사와 투과를 거치기 때문에 광원출력을 최대 25%만 사용할 수 있다. 반면에 조명광원을 optical axis의 측면에 배치하는 방법은 표적이 근거리 상에 있을 때는 observation angle이 커져서 효율이 나쁘다. 따라서 각각의 조명 방식에 의한 재귀반사표적의 밝기를 상대적



(A) Coaxial Illumination Using Beam Splitter



(B) Ring Light Illumination



(C) Small Light Sources Around Lens

Fig. 5 Illumination methods

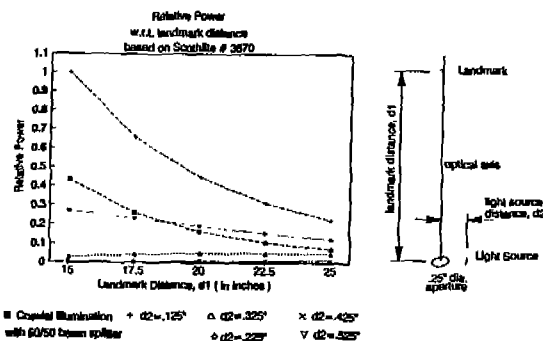


Fig. 6 Effect of illumination design

으로 비교하는 것은 적정 조명방식을 선정하는 데 있어서 매우 중요하다.

부록 A에 수록한 해석방식에 의하여 구한, 50% beam splitter을 사용한 coaxial illumination 경우에서의 점광원을 optical axis 측면에 배치한 경우에서의 재귀반사표적의 상대적 밝기를 Fig. 6에 나타내었다. 여기에서 beam splitter을 사용하는 coaxial illumination 방법은 조명효율이 최대 25% 밖에 되지 않는 이유로 카메라와 재귀반사표적 간의 거리가 멀어짐에 따라 LTS용 조명방법으로서의 장점을 급격히 잃는 것을 알 수 있다. 그리고 광원과 재귀반사표적 간의 거리가 50cm 내외일 때는 광원과 optical axis 사이의 거리가 1cm 보다 훨씬 작아야 재귀반사 특성을 활용할 수 있음을 알 수 있다.

2.1.3 재귀반사 표적(retroreflective landmark)의 광학적 특성해석

Retroreflector는 observation angle을 작게 하는 조명과 결합될 경우 머신비전 센서의 시야 내에 있는 다른 물체보다 1,000배 이상 밝게 보인다. 따라서 재귀반사지를 표적(retroreflective landmark)으로 이용하면

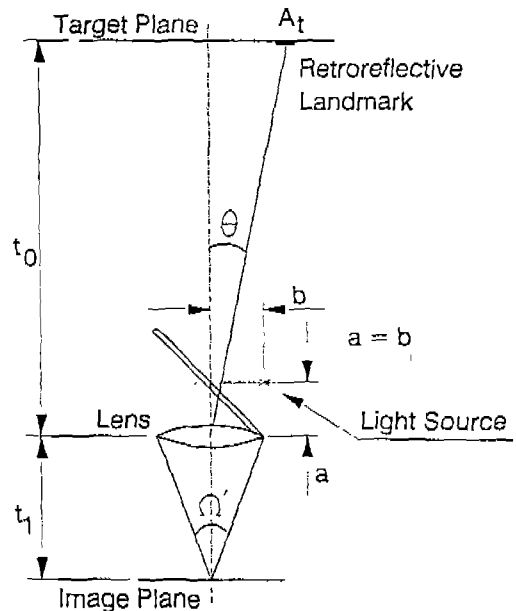


Fig. 7 Ideal arrangement of the LTS components

표적 이외의 영상은 완전히 어둡게 할 수 있어 화상처리 속도를 빠르게 할 수 있다. 이때 영상정보로부터 재귀반사표적의 좌표를 측정하기 위하여 주로 사용되는 영상처리 알고리즘은 무게중심법(center of gravity method^(23, 24, 25, 26))으로서 pixel의 grey level 정보를 이용하여 빠른 시간에 sub-pixel 수준의 고정도 측정을 수행할 수 있다. 이때 재귀반사표적의 실제 밝기를 아는 것은 적정 조명강도의 설계 뿐만 아니라 CCD 카메라에서 발생하는 blooming (번짐) 현상⁽²⁷⁾을 방지하여 측정의 정확성을 유지하는데 매우 중요하다.

재귀반사표적의 영상 밝기를 계산하기 위하여 Fig. 7과 같은 광원, 카메라, 재귀반사표적의 배치를 가정하였으며 여기에서 사용된 가정은 다음과 같다.

- 1) 광원은 점광원(point source)이다.
- 2) 원형 landmark의 크기는 카메라의 조명장치로부터의 거리에 비해 충분히 작아 한 개의 landmark 상에서는 observation angle과 entrance angle이 일정하다.
- 3) 조명으로 50% beam splitter를 이용한 coaxial 조명을 사용한다.

Sheet 형태의 retroreflector의 광학적 특성은 Eq.

(2)에서 coefficient of retroreflection $R' = \frac{I/E_{\perp}}{A}$ 으로 표시되었다. 2.1절에서 기술한 바와 같이 R' 은 observation angle과 entrance angle의 함수로 표시할 수 있는데 Fig. 5의 경우 coaxial 조명으로 observation angle은 landmark 영역에서 항상 0이라고 가정할 수 있으며, entrance angle은 viewing angle θ 와 같다. 이 경우 R' 을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$R' = R'(\theta_{obs}, \theta_{ent}) = R'(\theta) \quad (4)$$

이것을 Eq. (3)의 coefficient of luminance와 결합하면 Eq. (5)를 얻는다.

$$L = \frac{E_{\perp} \cdot R'(\theta)}{\cos\theta} \quad (5)$$

일반적으로 Luminance가 L인 물체의 영상을 lens의 transmittance가 T_{lens} 인 optical system에 의해 형성할 때 그 영상의 밝기(irradiance)는 다음 식으로 표시된다⁽²⁸⁾.

$$E_e' = T_{lens} \cdot L \cdot \Omega' \cos^4\theta \quad (6)$$

여기에서 Ω' 는 aperture와 object가 이루는 solid angle 이다. 이 식에 Eq. (5)를 대입하면 retroreflective landmark 영상의 irradiance는 다음과 같이 표시된다.

$$E_e' = T_{lens} \cdot E_{\perp} \cdot R'(\theta) \Omega' \cos^3\theta \quad (7)$$

또한 retroreflector 위에서의 E_{\perp} 는 점광원의 intensity를 I_s , beam splitter의 reflectance를 R , 광원과 retroreflector 사이의 거리를 t_0 라고 할 때 다음과 같이 표시된다⁽²⁸⁾.

$$E_{\perp} = R \cdot \frac{I_s}{t_0^2} \cos^2\theta \quad (8)$$

그러므로 retroreflective landmark에 의한 영상의 irradiance는 Eq(7), (8)로부터 다음과 같이 구하여진다.

$$E_e' = T_{lens} \cdot T \cdot R \cdot \frac{I_s}{t_0^2} R'(\theta) \Omega' \cos^5\theta \quad (9)$$

여기서 T 는 beamsplitter의 투과성(transmittance)이다. 이로부터 CCD 센서 표면에 도달한 총에너지를 다음과 같이 구할 수 있다.

total light energy =

$$T_{lens} \cdot T \cdot R \cdot \frac{I_s}{t_0^2} R'(\theta) \Omega' \cos^5\theta \cdot \Delta t_s \quad (10)$$

여기서 Δt_s 는 카메라의 노출시간이다.

2.2 바늘구멍사진기의 설계

Landmark Tracking System에서 사용할 optics에서는 다음과 같은 조건들이 요구된다.

- 1) 매우 밝은 재귀반사표적만 보이도록 가능한 한 화면을 어둡게 하는 높은 f/STOP.
이는 영상처리시간을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 초점심도(depth of field)를 크게하여 측정가능 범위를 넓히는 데도 도움이 된다.
- 2) 작은 geometric distortion
- 3) 경량, 저가격

이 중에서 geometric distortion의 경우는 좌표측정에 있어서 측정의 정확도에 가장 큰 영향을 주는 요소이다. 일반적으로 인간의 눈은 1% 정도의 distortion은 판별하기 어렵기 때문에 photogrammetry용 렌즈들을

제외한 일반 렌즈들은 distortion에 대해서는 비교적 관대하게 설계된다(29). 그러나 좌표측정에서는 0.1%의 distortion이라도 큰 오차를 가져오며 distortion을 상쇄하기 위해서는 보정 알고리즘을 수행하여야 하는 등의 부담이 따르게 된다.

본 연구에서는 distortion이 작고 위의 조건들을 만족시키는 optics로서 바늘구멍을 사용하였다. 바늘구멍은 렌즈없이 영상을 만들 수 있는 특성 때문에 특수 산업용으로 이미 사용되고 있다(30, 31, 32, 33). 바늘구멍은 염가이고 distortion이 없는 영상을 만들 수 있는 장점이 있으나 바늘구멍의 크기에 따라 영상의 화질이 변화하는 성질을 갖고 있다. 바늘 구멍의 직경이 크면 영상은 흐리고 이는 바늘구멍의 직경을 작게 함에 따라 점차 개선되나 바늘구멍이 어느 한계 이하로 작아지면 영상의 화질이 다시 악화된다. 이 현상은 바늘구멍의 크기가 작아질 때 두드러지는 빛의 회절(diffraction)현상 때문이다. 따라서 바늘구멍을 optics로 사용할 때에는 가장 선명한 영상 화질을 얻는 바늘 구멍의 크기가 존재하며 이를 구하는 연구는 19세기부터 수행되어 왔다(34, 35, 36, 37, 38, 39). 본 연구에서는 Fresnel diffraction equation으로부터 바늘구멍에 의한 diffraction pattern을 구하고, 점광원으로부터의 영상이 diffraction에 의해 퍼지는 것이 최소화하는 조건으로부터 가장 선명한 영상을 얻는 바늘구멍의 크기를 수치해석적으로 구하였다. 이때 사용된 수식은 부록 B에 수록되었으며 이에 의하면 최적 영상을 만드는 바늘구멍의 크기는 다음과 같다(40).

$$r \approx \sqrt{0.7\lambda f} \tag{11}$$

r=pinhole radius
 λ=wavelength of light
 f=focal distance

2.3 위치측정의 오차 해석

본 연구의 목표 중 하나는 고정밀 좌표측정을 저가격에 고속으로 수행하는 것이다. 이를 위하여 optics로는 바늘구멍을 사용하고 영상처리 알고리즘으로는 무게중심법(center of gravity method)을 사용하였다. 무게중심법은 영상의 grey level distribution에 수록된 위치 정보를 추출하는 방법으로서 grey level의 분포가 비대칭일 경우는 이 방법을 사용하면 바르지 못한 위치 측

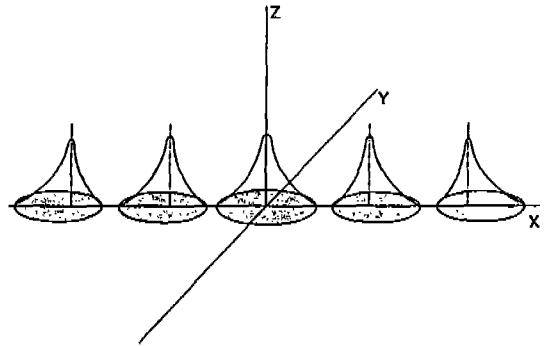


Fig.8 Image intensity profile shift

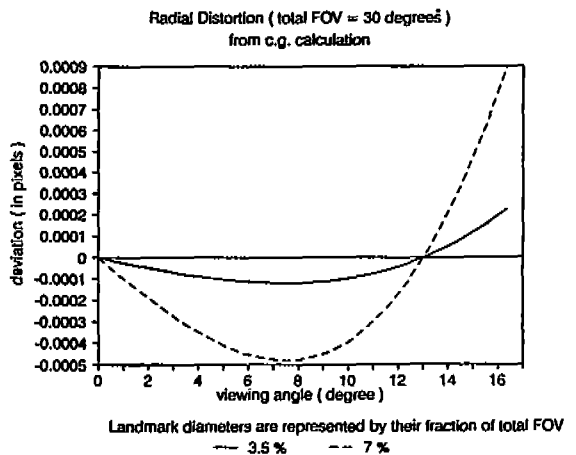


Fig.9 Distortion by non-uniform image intensity pattern

정값을 얻게 된다. Grey level의 분포를 비대칭으로 할 수 있는 원인들에는 다음과 같은 것들이 있다.

- 1) 조명의 cosine 법칙 : 조명측에서 멀어질수록 조명의 강도가 약해진다.
- 2) 바늘 구멍의 두께 : 바늘 구멍의 직경이 그 두께에 비해 작기 때문에 바늘구멍을 통한 영상은 파이프 내를 통과한 것과 같은 효과를 가진다.

이 중에서 조명의 cosine 법칙은 optical axis로부터 먼 부분일수록 어둡게 하여 Fig.8에서와 같이 재귀반사 표적 영상의 grey level distribution에 비대칭성을 갖게 한다. 조명의 cosine 법칙에 의하여 변형된 grey level distribution을 사용하여 무게중심법으로 재귀반사 표적의 좌표를 계산할 때 발생하는 오차를 Fig.9에 도시하였다. 여기에서 영상의 크기가 클수록 비대칭성이

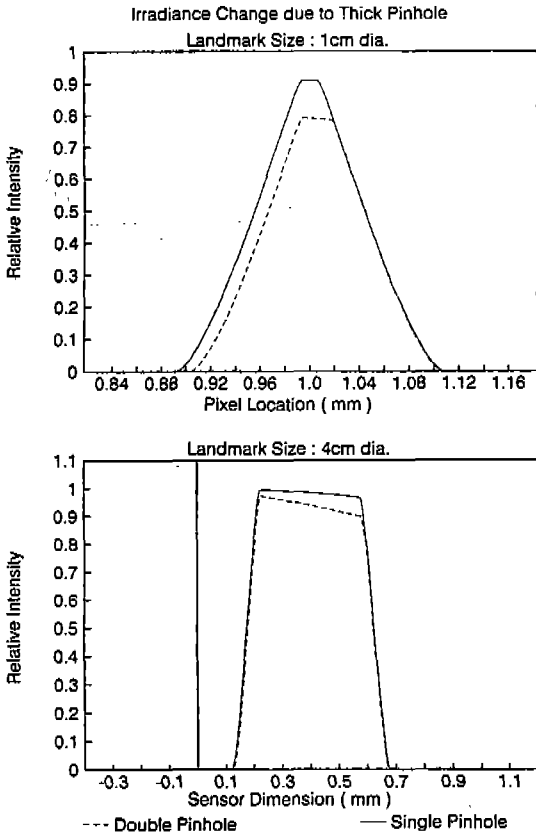


Fig.10 Effect of pinhole thickness

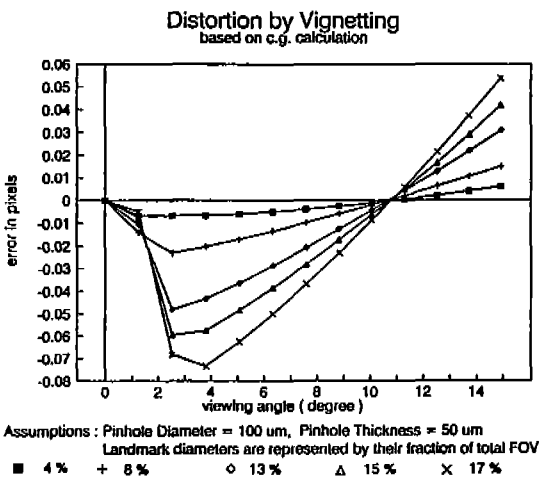


Fig.11 Position estimation error by thick pinhole 정확도에 미치는 영향이 크을 알 수 있으며 어느 경우에도 오차의 크기는 전체 시야의 6/1,000,000보다 작음을 알 수 있다⁽⁴⁰⁾.

바늘구멍의 두께는 바늘구멍을 통한 영상이 실제로는 파이프를 통과한 영상과 같은 효과를 내게 함으로써 시야의 가장자리 부분으로 갈수록 effective aperture의 크기가 작아져서 화면이 어두워지는 현상을 가져온다. 이는 다시 재귀반사표적영상의 grey level distribution에 영향을 주어 좌표측정에 오차를 가져오게 한다. 이 현상은 vignetting 효과로 해석할 수 있으며 이때 바늘구멍을 두께 t만큼 서로 떨어진 두개의 aperture로 가정하고 해석하였다⁽²⁸⁾. 이 해석의 결과로서 바늘구멍이 두께 t를 가질 때의 영상의 grey level distribution을, 바늘구멍 두께가 0인 이상적 바늘구멍에서의 경우와 비교하여 Fig.10에 도시하였으며 이 변형된 grey level distribution을 이용한 좌표측정의 오차를 Fig.11에 도시하였다. 여기에서도 마찬가지로 영상의 크기가 클수록 오차가 커짐을 알 수 있으며 오차의 최대치는 시야의 0.04% 보다 작음을 알 수 있다.

2.4 실험 및 결과

실험은 8 bit 마이크로프로세서를 사용하여 설계, 제작된 처리 시스템과 Texas Instrument의 TC211 CCD 센서와 직경 100 μ m의 바늘구멍을 이용하여 자체 제작된 카메라, 그리고 전자 플래시를 이용한 스트로보 방

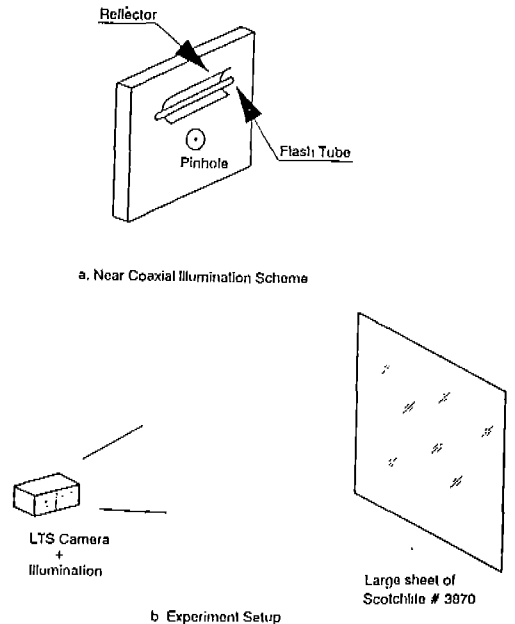


Fig.12 Retroreflector response measurement

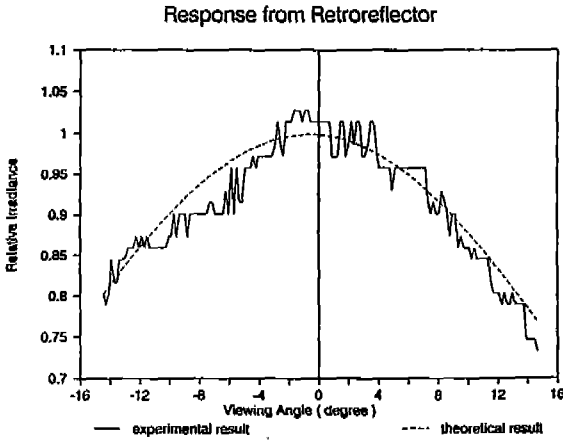


Fig. 13 Irradiance pattern from retroreflector

식 조명장치를 결합하여 구성한 Landmark Tracking System을 이용하여 수행되었다. 이 시스템의 광학부는 앞서 제시된 방식에 따라 설계되었다. 사용된 LTS의 세부사양은 부록 C에 수록되어있다.

2. 4. 1 재귀반사 특성 측정

식 (9)에서 해석적으로 구한 LTS에서의 재귀반사지의 광학적 특성을 실험으로 검증하였다. 이 실험을 위하여 Fig. 12와 같은 장치를 구성하고 재귀반사지 영상의 밝기를 LTS를 사용하여 측정하였으며 그 결과는 Fig. 13에 도시한 바와 같다. 이때 entrance angle의 변화에 따른 R'의 변화는 cosine 곡선으로 근사화시켰으며 사용된 retroreflector는 Scotchlite #3870이다. 여기에서 식 (9)에서 해석적으로 구한 결과와 실험 결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

2. 4. 2 Landmark Tracking System의 성능 측정

Landmark Tracking System의 성능은 재귀반사표적의 좌표를 측정하고 그 결과를 실제의 좌표와 비교함으로써 측정할 수 있다. 본 연구에서는 LTS의 성능을 좌표측정의 repeatability와 accuracy를 측정함으로써 구하였다.

좌표측정의 repeatability는 고정된 재귀반사표적의 좌표를 연속적으로 측정하여 그 결과들을 비교하는 방법으로 측정하였다. 서로 다른 재귀반사표적 크기와 거리의 조합에 대하여 실험을 수행하였으며 그 결과 중 일부를 Fig. 14에 도시하였다. 여기서 좌표측정의 repeatability는 표준편차가 한 pixel 크기의 0.006에서 0.007 배이

며 센서 전체에 192×165개의 pixel들이 있으므로 측정의 표준편차가 전체 FOV(시야각)의 1/30,000 미만인 양호한 결과를 보임을 알 수 있다.

좌표측정의 accuracy는 좌표를 미리 알고 있는 표적들을 LTS로 측정함으로써 구할 수 있다. 이를 위하여 camera calibration 방법을 사용하였다⁽²⁹⁾. 이 방법의 결과로서는 좌표측정의 오차외에 effective focal length, rotation matrix, translation matrix, distortion coefficient 등을 구할 수 있다. camera calibration에 사용된 calibration용 target은 직경이 0.25인치인 재귀반사지를 10개씩 1인치 간격으로 9줄로 X-Y 방향으로 배치한 90개의 재귀반사표적으로 제작되었다. 이것을 LTS로 촬영하여 각각의 표적의 위치를 계산한 결과는 Fig. 15와 같다. 이 결과로부터 Tsai^(41, 42)

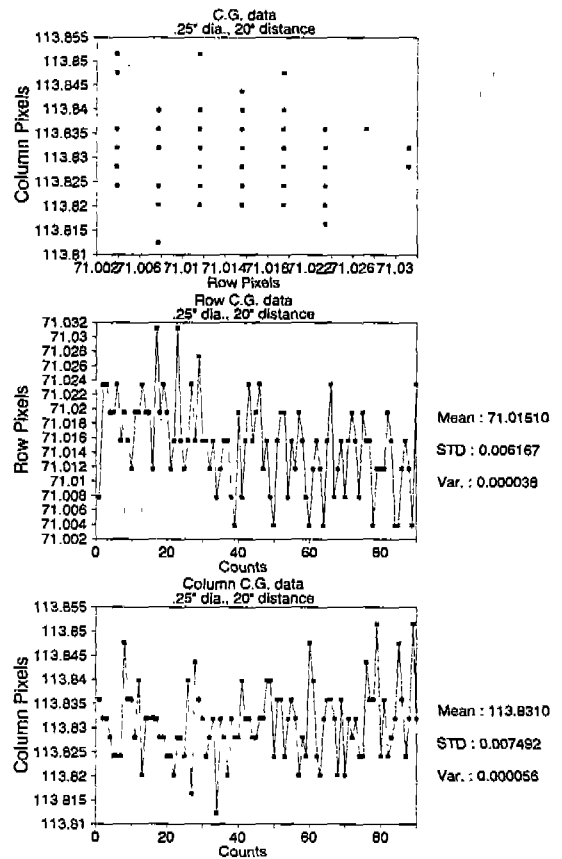


Fig. 14 Repeatability test results (Landmark diameter : .25", distance : .20")

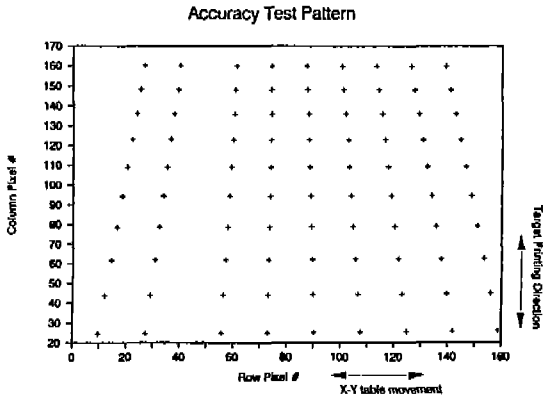


Fig. 15 Camera calibration targets

의 알고리즘을 이용하여 camera calibration을 수행하였다. 그 결과는 Table 1과 같으며 이때 사용된 식은 부록 D에 수록되었다.

Table 1 Calibration Results

ITEM		VALUES
Effective focal length		4,6354mm
Rotation matrix		- .002 .794 .608 1.000 -.015 .023 .027 .608 -.793
Translation matrix		-154.790 -134.518 405.998
Average Error	X-direction	0.0933017 mm
	Y-direction	0.120977 mm
Maximum Error	X-direction	1.211924 mm
	Y-direction	0.530802 mm

이 결과에서 오차는 보정용 표적 상의 좌표계에 대한 값이며 보정용 표적의 크기가 300mm×300mm 이기 때문에 field of view에 대하여 표시하면 평균 측정오차는 전체 field of view의 약 1/3,000에 해당한다. 이것은 아무런 보정 알고리즘도 수행하지 않은 상태에서 얻은 결과이기 때문에 매우 양호한 결과이다. Y방향의 오차가 X방향의 오차보다 큰 이유는 CCD 센서의 pixel 갯수가 X방향으로는 192개이고 Y방향으로는 165개이기 때문이다.

3. 결 론

본 논문에서는 재귀반사 표적과 바늘구멍사진기를 이용한 정밀위치측정시스템에서 광학적 요소들의 영향에 대하여 해석과 실험으로 고찰하였다. 재귀반사의 일반적 광학특성을 제시하고 이로부터 각기 다른 조명방식에 따른 재귀반사표적의 상대적 밝기를 구하여 재귀반사의 특성을 극대화시키는 조명방식을 선택할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 임의의 거리와 각도에 위치한 재귀반사표적을 LTS로 측정할 경우 형성되는 영상의 밝기를 수식으로 나타내어 조명강도 및 노출시간, aperture 등을 선정할 수 있게 하였다. Optics로는 좌표측정의 오차를 최소화 하고 재귀반사 특성을 최대로 활용하는 바늘구멍을 채택하였다. 바늘구멍에 의한 영상의 화질은 바늘구멍의 크기가 작아짐에 따라 개선되다가 바늘구멍이 작아지면 현저해지는 diffraction 현상으로 다시 화질이 저하되며 이때 가장 선명한 화질을 제공하는 바늘구멍의 크기가 존재한다. 본 연구에서는 Fresnel diffraction equation을 수치해석적 방법으로 풀어서 가장 선명한 영상을 얻을 수 있는 바늘구멍크기를 빛의 파장과 촛점거리의 함수로 구하였다. 무게중심법을 영상 처리방법으로 사용하는 경우 grey level의 불균일성 때문에 발생할 수 있는 오차에는 조명의 불균일성에 의한 오차와 바늘구멍의 두께에 의한 오차가 있다. 두가지 경우에 대하여 발생하는 좌표측정의 오차를 구하고 오차의 크기가 영상의 직경에 관계된다는 것을 보였으며 발생가능한 최대 오차가 각각 6ppm, 0.04% 보다 작음을 해석적으로 구하였다.

실험은 해석부에서 제시된 설계조건을 이용하여 제작된 LTS를 이용하여 수행되었으며 해석적 방법으로 구한 재귀반사표적의 밝기에 대한 수식을 측정치와 비교하여 검증하고 측정결과와 수식이 일치함을 보였다. LTS의 성능은 좌표측정의 반복성과 정확도로부터 구하였다. 고정 표적을 연속적으로 촬영하여 구한 좌표측정의 반복성은 field of view의 1/30,000로 나타났다. 정확도는 10×9개의 표적을 사용한 camera calibration을 통하여 구하였으며 field of view의 1/3,000보다 작은 오차만 존재함을 보였다.

부 록

A. 조명방식에 따른 재귀반사표적의 상대적 밝기 비교
재귀반사지의 coefficient of luminous intensity R
은 observation angle의 변화에 매우 민감하며 그 관
계는 다음의 식으로 근사화 시킬 수 있다.

$$R = C \cdot e^{-a \theta_{obs}^2} \quad (A-1)$$

3M에서 제공된 데이터를 이용하여 Scotchlite #3870
에서 C의 값은 350, a의 값은 12,267로 근사화할 수
있다. 식 (A-1)을 이용하여 조명장치와 optical axis
사이의 각기 다른 거리들에 대한 재귀반사표적의 상대적
밝기를 구할 수 있다. 이 해석을 위하여 Fig.A-1과
같은 이상적인 모델을 사용하였다. 여기에서 광원은 점
광원이며 재귀반사표적은 optical axis위에 위치한다고
가정하였다. 이때 intensity가 I인 재귀반사표적으로부터
면적이 A인 aperture에 도달하는 light power는 식
(A-2)와 같다.

$$\phi_e = \int_A I \, d\Omega \quad (A-2)$$

여기서 $d\Omega$ 는 재귀반사표적과 aperture와 접한 구면
상의 미소 면적인 dA 가 이루는 solid angle이다. 이때
I는 R의 정의로부터 식 (A-3)과 같다.

$$I = R \cdot \frac{I_s}{R_s^2} \quad (A-3)$$

여기서 R_s 는 광원부터 재귀반사표적 간의 거리, I_s 는
광원의 intensity이다.

이상의 식에서 dA , $d\Omega$ 는 다음과 같이 구할 수 있
다.

$$\begin{aligned} dA &= r \, d\psi \cdot R_0 \, da \\ &= R_0 \sin \alpha \, d\psi \cdot R_0 \, da \\ &= R_0^2 \sin \alpha \, d\psi \cdot da \end{aligned} \quad (A-4)$$

$$\begin{aligned} d\Omega &= \frac{dA}{R_0^2} \\ &= \sin \alpha \, d\psi \cdot da \end{aligned} \quad (A-5)$$

이 결과를 이용하여 식 (A-2)를 표시하면 다음과
같다.

$$\phi_e = \int_A I \, d\Omega$$

$$\begin{aligned} &= \int_{\psi=0}^{\psi=2\pi} \int_{\alpha=0}^{\alpha=\theta_A} I \sin \alpha \, d\psi \cdot da \\ &= \int_{\psi=0}^{\psi=2\pi} \int_{\alpha=0}^{\alpha=\theta_A} R \cdot \frac{I_s}{R_s^2} \sin \alpha \, d\psi \cdot da \\ &= \int_{\psi=0}^{\psi=2\pi} \int_{\alpha=0}^{\alpha=\theta_A} C \cdot e^{-a \theta_{obs}^2} \\ &\quad \cdot \frac{I_s}{R_s^2} \sin \alpha \, d\psi \cdot da \end{aligned} \quad (A-6)$$

여기서 θ_A 는 광원과 aperture 면적이 이루는 half
angle이다. 그리고 기하학적 관계로부터 θ_{obs} 를 다음과
같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_{obs} &= \cos^{-1}(\sin \theta_s \cdot \sin \alpha \cdot \cos \psi + \\ &\quad \cos \theta_s \cdot \cos \alpha) \end{aligned} \quad (A-7)$$

식 (A-6)과 (A-7)을 이용하여 광원과 optical axis
간의 각각 다른 거리에 대한 재귀반사표적의 상대적 밝
기를 수치적분적 방법으로 구할 수 있다.

B. Fresnel diffraction equation과 수치해석 방법

Fig.B-1과 같은 점광원, 바늘구멍, 영상면의 배치를
가정하고 점광원으로부터 바늘구멍까지의 거리를 α , 바
늘구멍의 반경을 r , 바늘구멍으로부터 영상면까지의 거
리를 b , 영상면에서의 diffraction pattern의 반경을
 ζ 라고 하자. 이때 영상면에서의 irradiance값은 식 (B
-1)에 의해 주어진다.

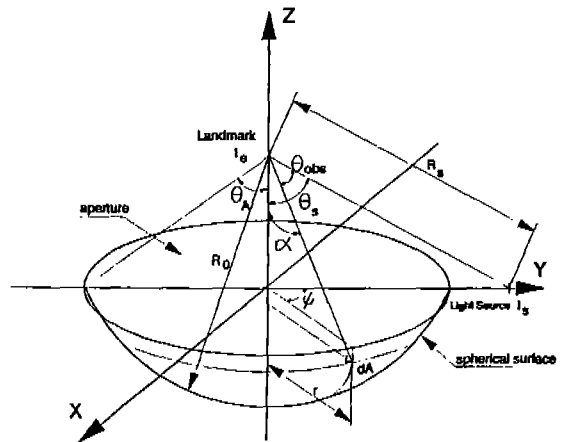


Fig.A-1 Idealized setup for light power calculation

$$I^2 = \frac{1}{a^2 b^2 \lambda^2} (C^2 + S^2) \quad (B-1)$$

where

$$C = \int \int \cos\left(\frac{1}{2} \kappa \rho^2 - l \rho \cos \phi\right) \cdot \rho \, d\rho \, d\phi$$

$$S = \int \int \sin\left(\frac{1}{2} \kappa \rho^2 - l \rho \cos \phi\right) \cdot \rho \, d\rho \, d\phi$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} \frac{a+b}{2ab} = \frac{1}{2} \kappa$$

$$\frac{2\pi z}{b} = l$$

적분은 원형 바늘구멍의 면적에 대해서 이루어지며 이때 C와 S는 식 (B-2)와 같이 Bessel 함수로 표시된다.

$$C = 2\pi \int_0^r J_0(l\rho) \cos\left(\frac{1}{2} \kappa \rho^2\right) \cdot \rho \, d\rho \quad (B-2)$$

$$S = 2\pi \int_0^r J_0(l\rho) \sin\left(\frac{1}{2} \kappa \rho^2\right) \cdot \rho \, d\rho$$

$\kappa r^2 = y$, $lr = z$ 로 하면 C와 S를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C = \pi r^2 \left(\frac{\cos \frac{1}{2} y}{\frac{1}{2} y} U_1 + \frac{\sin \frac{1}{2} y}{\frac{1}{2} y} U_2 \right) \quad (B-3)$$

$$S = \pi r^2 \left(\frac{\sin \frac{1}{2} y}{\frac{1}{2} y} U_1 - \frac{\cos \frac{1}{2} y}{\frac{1}{2} y} U_2 \right)$$

where

$$U_1 = \frac{y}{z} J_1(z) - \frac{y^3}{z^3} J_3(z) + \frac{y^5}{z^5} J_5(z) - \dots$$

$$U_2 = \frac{y^2}{z^2} J_2(z) - \frac{y^4}{z^4} J_4(z) + \dots$$

이상의 수식으로부터 식 (B-1)을 유도하면

$$\begin{aligned} I^2 &= \frac{1}{a^2 b^2 \lambda^2} (C^2 + S^2) \\ &= \frac{1}{a^2 b^2 \lambda^2} \frac{4\pi^2 r^4}{y^2} (U_1^2 + U_2^2) \\ &= \frac{\pi^2 r^4}{a^2 b^2 \lambda^2} \cdot M^2 \end{aligned} \quad (B-4)$$

where

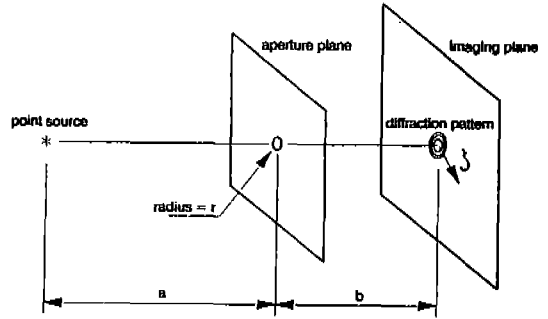


Fig. B-1 Fresnel Diffraction

$$M^2 = \left(\frac{2}{y} U_1\right)^2 + \left(\frac{2}{y} U_2\right)^2$$

여기서 M^2 와 I^2 는 y 와 z 의 함수이며 y 와 z 는 다음과 같다.

$$y = \frac{2\pi r^2}{\lambda} \frac{a+b}{ab}$$

$$z = \frac{2\pi r z}{\lambda b} \quad (B-5)$$

식 (B-4)에서 구한 irradiance pattern은 y 의 값을 변화시켜가면 Fig. B-2와 같이 변화하게 되며 이때 영상면에 도달한 광 에너지의 양은 Fig. B-2의 곡선 아래의 면적에 비례한다. 이에 의하여 전체 에너지의 50%를 포함하는 irradiance pattern의 반경을 구하면 Fig. B-3과 같이 y 의 값이 약 1.4 π 일 때 나타나게 되며 따라

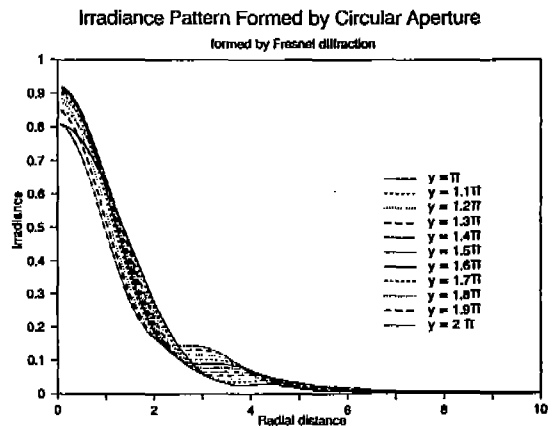


Fig. B-2 Irradiance pattern by circular pinhole

서 점광원까지의 거리를 무한대로 가정하고 촛점거리를 f라고 하면

$$r = \sqrt{\frac{1.4}{2} \lambda f} \quad (B-6)$$

으로 가장 선명한 영상을 얻는 바늘구멍의 반경을 구할 수 있다.

C. Landmark Tracking System의 세부사항

Table 2 Specifications of Landmark Tracking System

ITEM	SPECIFICATION
CPU	MC68000
A/D converter	8 bit flash A/D converter
field of view	30 degrees
focal distance	4.5 mm
CCD sensor	TC 211 (192×165 pixels)
scan method & speed	full frame digital, 8 MHz
pinhole diameter	100 μm
pinhole thickness	40 μm
used retroreflector	Scotchlite #7610, 3870

D. Camera calibration equation

기본적인 카메라 모델에서 (x_w, y_w, z_w)가 3차원 기준 좌표계의 한 점의 좌표이고 (x, y, z)가 그 점을 카메라 좌표계로 표시한 좌표일 때 두 좌표의 관계는 다음과 같이 Rotation matrix R과 Translation matrix T를 이용하여 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T \quad (D-1)$$

그리고 한점의 영상면 상에 나타난 좌표를 (u, v)라고 하면 이는 다음 식으로 표시되며 이때 f는 effective focal length이다.

$$u = f \cdot \frac{x}{z} \quad (D-2)$$

$$v = f \cdot \frac{y}{z}$$

그리고 측정오차는 camera calibration을 거쳐 구한

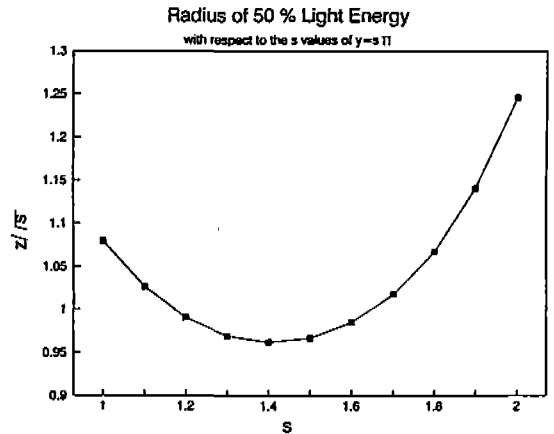


Fig.B-3 Radius of the 50% light energy 보정표적 상의 좌표값과 실제 좌표값의 차이로 구한다.

참고문헌

1. Groover, M. P., Automation, Production Systems, and Computer-Aided Manufacturing, Prentice Hall, 1980
2. Koenigsberg, W. D., "Noncontact Distance Sensor Technology", Intelligent Robots: Third International Conference on Robot Vision and Sensory Controls RoViSeC3, SPIE Volume 449, pp.519~531
3. Fukui, I., "TV Image processing to Determine the Position of a Robot Vehicle", Pattern Recognition, Vol. 14, Nos. 1-6, pp.101~109, 1981
4. Courtney, J. W., Magee, M. J., and Aggarwal, j. k, "Robot Guidance Using Computer Vision", Pattern Recognition, Vol. 17, No. 6, pp.585~592, 1984
5. Magee, M. J., Aggarwal, J. k., "Determining the Position of a Robot Using a Single Calibration Object", IEEE International Conference on Robotics, pp.140~149, Atlanta, Mar 13-15 1984
6. Takeda, T., Kato, A., Toru, S., and Mitsuo, H., "Automated Vehicle Guidance Using Spotmark", Proc. of Int. Conf. on

- Robotics and Automation, pp.1349~1353, 1986
7. Kunkel, B., Lutz, R., and Manhart, S., "Advanced auto-electronical Sensors for Autonomous Rendezvous-Docking and Proximity Operations in Space", SPIE Vol. 591, Solid State Imagers and Their Applications, 1985
 8. Wargocki, F. E., Ray, A. J., and Hall, G. E., "Retroreflector Field Tracker", SPIE Vol. 501, State-of-the-Art Imaging Arrays and Their Applications, 1984
 9. Deters, R. A., Gutshall, R. L., "Charge Transfer Device Star Tracker Applications", J. Guidance, Vol. 10, No. 1, Jan-Feb, 1987
 10. Aviation Week & Space Technology, pp.100~102, June, 5, 1989
 11. McKinney, W. S., "A low cost vision system for landmark tracking", M. S. Thesis (in M. E.), Georgia Institute of Technology, 1987
 12. Lee, E. H., Li, D., and Dickerson, S. L., "A Landmark Tracking Sensor for Manufacturing Control," Proc. of the IIE Integrated System Conference, Atlanta, GA, pp.651~656, Nov. 1989
 13. Lee, E. H., Dickerson, S. L., "Pinhole Imaging for Industrial Vision Systems", Monitoring and Control for Manufacturing Processes, 1990 ASME Winter Annual Meeting
 14. Johnson, N. L., "Accuracy in the Photometry of Retroreflectors", SPIE Vol. 196, Measurement of Optical Radiations, pp.136~146, 1979
 15. Reflex Light Reflector, United States Patent 2,326,634, Aug. 10, 1943
 16. Stephenson, H. F., "The Photometry of Retroreflectors", SPIE Vol. 146, Light Measurement in Industry, London, Sep. 1978
 17. Federal Test Method Standard 370, March 1, 1977
 18. Rennilson, J. J., "Retroreflection Measurements: a review", and five papers, Applied Optics, Vol. 19, No. 8, pp.1234~1273, 15, April, 1980
 19. 3M에서 제공된 Scotchlite #3870에 대한 기술데이터 자료
 20. Novini, A., "Fundamentals of Machine Vision Lighting", SPIE Vol. 728, Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision, 1986
 21. Schroeder, H. E., "Practical Illumination Concept and Technique for Machine Vision Applications", ROBOTS 8, Conference Proceedings, Vol. 2, pp.14~27-14~43, Detroit, Michigan, Jun, 1984
 22. Uber, G. T., "Illumination Methods for Machine Vision", SPIE Vol. 728, Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision, 1986
 23. Andersson, R. L., "Real-Time Gray-Scale Video Processing Using a Moment-generating Chip", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-1, No. 2, Jun, 1985
 24. Andersson, R. L., A robot ping-pong player: experiment in real-time intelligent control, MIT Press, 1988
 25. Salomon, P. M., "Charge-coupled device (CCD) trackers for high accuracy guidance applications", SPIE Vol. 203, Recent Advances in TV Sensors and Systems, 1979
 26. Winick, K. A., "Cramer-Rao lower bounds on the performance of charge-coupled-device optical position estimators", Journal of Optical Society of America, Vol. 3, No. 11, Nov 1986
 27. Fairchild Weston Systems Inc., CCD Imaging Division, CCD Solid State Imaging Technology, 1988
 28. O'Shea, D. C., Element of Modern Optical

- Design, John Wiley & Sons, 1985
29. Manual of Photogrammetry, 4th Ed., American Society of Photogrammetry, 1980
 30. Risovic, D., Svenda, K., and Persin, A., "A Device for Positioning and Tracking of Luminous Targets", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. IM-35, No. 1, pp.61~64, Mar. 1986
 31. Rushford, M. C., Kuzmenko, "Pinhole Camera for Hot Environment Viewing of Electron Beam Materials Processing", SPIE Vol. 787 Optical Techniques for Sensing and Measurement in Hostile Environments, pp.86~92, 1987
 32. Combustion Pinhole Camera System, United States Patent 4,432,286, Feb. 21, 1984
 33. Newmann, P. A., Rible, V. E., "Pinhole Array Camera for Integrated Circuits", Applied Optics, Vol. 5, No. 7, pp.1255~1228, Jul. 1966
 34. Petzval, "On the Camera Obscura", Philosophical Magazine and Journal of Science, S. 4., Vol. 17, No. 111, Jan, 1859
 35. Lord Rayleigh, "On Pin-hole Photography", Phil. Mag., S. 5, Vol. 31, pp.87~99, Jan-Jun 1891
 36. Hardy, A. C., Perrin, F. H., The Principles of Optics, pp.124~126, McGraw Hill, 1932
 37. Mack, J. E., Martin, M. J., The Photographic Process, pp.33~38, McGraw Hill, 1939
 38. Young, M., "Pinhole Optics", Applied Optics, pp.2763~2767, Vol. 10, No. 12, Dec. 1971
 39. Fjeld, J. M., "Survey of Pinhole Optimization", Journal of SMPTE, Vol. 74, Apr. 1965
 40. Lee, E. H., "Illumination, Optics, and Retroreflectors for Efficient Landmark Tracking", Ph. D. Thesis, Georgia Inst. of Technology, March 1991
 41. Tsai, R. Y., "A Versatile Camera Calibration Techniques for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses", IBM Research Report RC 11413, Sep 30, 1985
 42. Yutkowitz, S. J., "A Practical Vision-Guided Part Feeding Algorithm for Flexible Manufacturing Automation, M. S. Thesis (in M. E.), Georgia Institute of Technology, 1990
 43. Edgerton, H. E., Electronic Flash, Strobe, MIT press, 3rd Ed., 1987