

論文94-31B-11-7

測光立體視法에서 범용조명원에 기인한 오차 해석에 관한 연구

(A Study on the Analysis of the Error in Photometric Stereo Method Caused by the General-purpose Lighting Environment)

金泰銀*, 張泰奎**, 崔宗秀*

(Tae Eun Kim, Tae Gyu Chang and Jong Soo Choi)

要約

본 논문에서는 測光立體視法(Photometric Stereo Method: PSM)을 적용하여 3차원 물체의 표면 방향정보를 추정할 때 조명원이 이상적인 평행광이 아닌 범용 조명환경인데서 기인한 표면 방향추정 오차의 해석 방법을 제시하였다. 제시한 방법에서는 일반 형태의 조사 대상을 포함한 조명환경에 대한 구체적인 모델링과 오차분포에 대한 직접적인 시뮬레이션을 통하여 오차해석을 하도록 하였다. 범용조명원은 beam angle을 갖는 점광원으로 가정하고, 조사 대상면에서의 밝기분포는 분산값이 변하는 가우스함수 형태로 모델링하였다. 설정된 조명 모델에서 분산을 여러값으로 변화시켜서 이에따라 PSM에서 나타나는 오차분포를 얻기 위한 목적으로, 임의의 세 방향으로 위치한 조사 대상면의 평균 밝기값을 계산하여 고정된 조명원의 위치벡터를 얻는 시뮬레이션 알고리즘을 제시하였다. PSM과 제안된 조명원의 위치추정 알고리즘 사이에는 상사관계(analogy)가 성립하기때문에, PSM 적용시 비이상적인 조명모델에 의해 나타나는 물체표면방향 추정오차는 제시한 조명원 위치추정 시뮬레이션으로부터 직접적으로 구할 수 있다. 또한 설정된 조사대상면 모델과 같은 원반형태의 계측기구를 제작하여 임의의 방향벡터를 제공하도록 하고, 이를 측정과 시뮬레이션에 사용함으로써 오차해석과 보정을 체계적으로 수행할 수 있도록 하였다. 제시한 방법에 따라 방향 벡터값들의 조합을 공간상에서 다양하게 변화시키면서, PSM에서 나타나는 방향추정 오차분포를 구하는 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션과 같은 방법으로 실측에 의한 방향추정 오차를 구하고 시뮬레이션에서 얻은 결과와 비교 검토하였다. 그 결과, 실제 측정실험에서 얻은 복합적인 오차중 상당부분은 비이상적인 범용조명원 모델로부터 기인한 것임을 확인할 수 있었다.

Abstract

This paper presents a new approach of analyzing errors resulting from nonideal general-purpose lighting environment when the Photometric Stereo Method (PSM) is applied to estimate the surface-orientation of a three-dimensional object. The approach introduces the explicit modeling of the lighting environment including a circular-disk type irradiance object plane and the direct simulation of the error distribution with the model. The light source is modeled as a point source that has a certain amount of beam angle, and the luminance distribution on the irradiance plane is modeled as a Gaussian function with different deviation values. A simulation algorithm is devised to estimate the light source orientation computing the average luminance intensities obtained from the irradiance object planes positioned in three different orientations. The effect of the nonideal lighting model is directly reflected in such simulation, because of the analogy between the PSM and the proposed algorithm. With an instrumental tool designed to provide arbitrary orientations of the object plane at the origin of the coordinate system, experiment can be performed in a systematic way for the error analysis and compensation. Simulations are performed to find out the error distribution by widely varying the light model and the orientation set of the object plane. The simulation results are compared with those of the experiment performed in the same way as the simulation. It is confirmed from the experiment that a fair amount of errors is due to the erroneous effect of the general-purpose lighting environment.

* 正會員, 中央大學校 工科大學 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Chung-Ang Univ.)

** 正會員, 中央大學校 工科大學 制御計測工學科

(Dept. of Control & Instr. Eng., Chung-Ang Univ.)

接受日字 : 1993年 10月 18日

I. 서론

비디오카메라로 얻는 영상의 밝기정보에서 3차원 물체면의 방향정보를 얻고자 하는 문제는 과거 10여 년 전부터 많은 연구가 진행되어왔다. 이러한 문제의 해결은 물체인식 문제를 푸는데 필수적인 요소로서, 특히 로봇시각을 포함한 실제적인 응용을 위해서도 많은 기여가 기대된다. 하지만 일반적으로 조명원, 면반사 특성, 물체에 대한 기하학적 정보등을 포함한 여러요소들에 대해 정확한 모델을 얻어야하는 어려움이 존재하고 특히 이러한 모델들은 관계식들의 비선형성에 의해 해석적으로 다루기 어렵다는 근본적인 어려움이 있기 때문에, 아직까지 만족할 만한 수준의 실질적인 응용을 얻는데는 한계가 있다.^{[1][2][3]}

測光立體視法(Photometric Stereo Method:PSM)은 물체의 3차원적인 정보를 2차원 영상에서 복구하고자 하는 연구의 한 방법으로서, 서로 다른 위치에서 조사되는 여러 조명원으로부터 얻어지는 복수의 영상에 담겨있는 물체표면의 명암분포 정보를 연결시켜서 물체의 3차원적 형상을 복구하는 방법을 일컫는다. PSM은 조명이 이상적인 평행광이고 면반사 특성이 Lambertian이라는 가정하에, 반사함수가 입사각과 면의 법선이 이루는 각의 cosine값에 비례한다는 간략화한 모델에 근거한다. 이 기법은 Woodham에 의해 처음 정립되었으며, Silver, Ikeuchi등에 의해 발전되어 왔다.^{[1][4][5]} PSM은 단일 영상을 사용하는 경우에 비해 세 장의 영상을 사용한다. 이때, 이들 세 장에 대한 영상조도방정식을 연결시켜서 해석적인 해를 구하게 되는데, 不良設定問題(III-posed problem)가 생기지 않으므로 계산 부담이 적고 과정이 복잡해지지 않는 등의 장점이 있다. 또한 상대적으로 조도측정 오차에 덜 민감하고, 계산의 구현이 쉬워 고속병렬 처리 구조에 적합하여, 특히 bin-picking과 같은 산업응용 목적에 유용하게 사용될 수 있다.

그러나 이 기법은 물체 표면의 방향정보를 정밀하게 계측하기 위해서 조도분포가 균일한 평행광원인 이상적 조명원과 상호간섭이 없는 정밀한 실험환경이 주어져야 하고, 특히 설정된 환경이 내포하는 조명원을 포함한 여러 오차 요인들에 대한 해석과 보정 작업등을 필요로 한다. 이러한 요구사항은 PSM의 광범위한 실제응용에 커다란 제약 조건으로 작용하고 있고, 특히 규모가 크고 특수한 collimator등의 고가환경을 요구하게 되어 범용환경을 구성하기 위한 목적에는 비현실적이고 경제적이지 못하다. 따라서 PSM에 관련되는 오차요인들에 대한 해석을 통하여 정밀한 계측환경을 구성하는데 도움을 주고, 또한 이러한 오차들을 효율

적으로 보정하는 기법들을 개발하는 것은 중요한 의미를 지닌다고 볼 수 있다. 지금까지 몇몇 연구가에 의해, 면법선 방향성분 계측치의 민감도(sensitivity)특성을 비롯한 관련 오차해석 및 보정에 관한 연구들이 수행되어왔으나^{[6][7][8]}, 이러한 연구는 오차요인 및 실험환경에 대한 직접적인 분석이 아니어서 실제 응용적인 측면에서의 의미는 미흡하다.

본 논문에서는 이러한 연구의 일환으로 할로겐조명, CCD 카메라 및 PC 데이터 수집 시스템등으로 이루어진 범용 계측환경을 대상으로 하여, PSM을 이용할 때 내재되어 있는 오차요인들 중 상대적으로 비중이 큰 조명원에 기인한 오차영향 분석용 시스템을 제시하였다. 본 시스템에서는 실제 범용 조명원과 근사하면서 수학적으로 다루기 쉬운 조명모델을 설정하였고, 설정된 모델하에서 고정된 조명원의 방향을 추정하는 알고리즘을 구현하여 PSM의 적용시 나타나는 방향추정 오차의 분포를 시뮬레이션을 통하여 구할 수 있도록 하였다. 또한 설정된 모델에 준하여 좌표계 원점에서 임의의 방향의 기준면을 제공하여 줄 수 있는 계측기구를 제작하고, 실측에 의하여 얻어진 조도값을 적용하여 조명원의 위치벡터를 추정하였다. 그래서 이때 나타나는 방향추정 오차의 분포를 구하여 시뮬레이션에 의해 얻은 값과 비교 검토하였다.

이와같은 연구는 범용환경을 대상으로 모델을 설정하고 시뮬레이션과 실측을 통한 체계적인 해석 방법을 제시하였다는 점에서 주된 의의가 있고, 궁극적으로 PSM의 광범위한 실제 응용과 계측의 정밀도를 높이는 데 기여하고자 함이 목적이다.

본 논문의 구성은 Ⅱ장에서는 범용 조명환경에 대하여 모델을 설정하고 이러한 모델하에서 PSM을 적용할 때 나타나는 방향추정 오차를 구하는 과정을 기술하였다. Ⅲ장에서는 Ⅱ장에서 기술한 조명원 위치추정 알고리즘을 적용하여 이때 PSM에서의 방향추정 오차의 분포를 얻는 시뮬레이션 과정에 대하여 기술하였다. Ⅳ장에서는 실제 실험으로 측정된 조도값들에 조명원 위치추정 알고리즘을 적용하여 이때 나타나는 방향추정 오차를 구한 결과를 기술하였다. Ⅴ장은 결론으로 본 논문을 마친다.

Ⅱ. 조명원 모델링을 통한 오차해석

본 장에서는 이상적인 평행광에서 벗어나는 범용환경의 실제조명을 근사적으로 표현할 수 있고 수학적으로 다루기 쉬운 모델을 이용하여 나타내고, 이와 같이 설정한 여러 조명 모델하에서 PSM을 적용할 때 나타나는 방향정보 추정오차를 구하는 과정을 기술하였다.

1. 조명환경에 대한 모델설정 및 해석

PSM을 사용하기 위해서는 서로 다른 세 방향에서 조사되는 평행광을 제공하여 줄 수 있는 조명환경을 구현하여야 한다. 하지만 극히 제한된 좁은 영역을 다루기 위한 경우를 제외하고 PSM과 같이 일정 범위 이상의 물체영역을 조사하여야 하는 일반적인 경우, 평행광원을 구현하는 것은 규모가 크고 특수한 collimator 등의 고가환경을 요구하게 되어 범용환경을 구성하기 위한 목적에는 비현실적이고 경제적이기 못하다. 따라서 제한적인 collimation을 통한 근사적인 조명환경을 설정하고 오차에 대한 보정을 수행하도록 하는 것이 일반적으로 바람직하게 된다. 이러한 경우 조명은 일정 범위의 beam angle을 갖고 퍼지게 되며 조사대상면에서의 밝기가 균일하지 않는 분포를 갖게 된다.

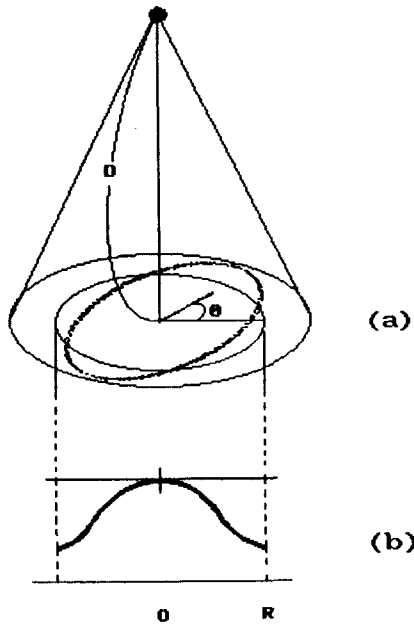


그림 1. (a)범용조명 환경에 대한 모델 (b)조사원 반면 상에서 밝기의 분포함수를 나타 낸 예. R은 조사대상 원반의 반경이고 θ 는 원반이 조사면에 대해 기울어진 각도를 나타내며 D는 조명원에서 조사면 중심에 이르는 거리를 나타낸다

Fig. 1. (a)A suggested model of the general-purpose lighting environment in PSM. (b)Illustration of a luminance distribution on in the irradiance plane.

본 논문에서는 그림 1에 보인 바와 같이, 조명원이 beam angle을 갖는 점광원이고, 조사면의 밝기가 가우스함수 형태로 분포한다고 가정함으로써, 앞에서 언급한 제한적인 collimation을 포함한 범용 조명환경에 대한 모델을 설정하였다. 이와 같이 설정한 모델은 실제적인 조명환경에 근사하다 사료되며 수학적으로 다루기 쉽다. 이러한 조명모델하에서, 임의의 방향으로 놓인 원반형의 조사면을 대상으로 평균조도를 계산하는 관계식을 유도하고, 이를 2절에서 제시한 조명원 방향추정 알고리즘에 적용함으로써, 비이상적인 조명원이 PSM에 미치는 방향추정 오차를 얻을 수 있다는 것이 본 논문에서 제시한 오차해석 방법의 주된 착안점이다.

그림 1과 같은 조명모델하에서 임의의 방향으로 놓인 원반의 평균조도는, 원반상의 임의의 점 (r, ϕ) 에서의 밝기 $f(r, \phi)$ 를 구하는 식을 먼저 유도한 후 이를 식 (1)과 같은 적분하여 계산하여야 한다. 여기서 r, ϕ 는 극좌표 형식에서 원반상의 임의의 한점의 좌표값을 의미한다.

$$I = \int_0^{\theta} \int_0^{2\pi} f(r, \phi) r \, dr \, d\phi \quad (1)$$

이때 원반상 임의의 점에서의 밝기 $f(r, \phi)$ 는, (a) 동일 beam 상에서의 밝기는 광원의 위치로부터 이르는 거리 제곱에 반비례한다는 사실, (b) 동일점에서는 밝기는 그 점에서의 면법선벡터와 조사 빔이 이르는 각에 대한 cosine함수값에 비례한다는 가정, (c) 원반면이 조사면과 평행으로 놓였을 때 가장한 밝기 분포 함수식을 기반으로 기하학적인 상관관계를 이용하여 얻는다.

밝기분포 함수가 가우스함수형태인 경우 $f(r, \phi)$ 는 식 (2)와 같이 얻어지며 이를 유도하는 구체적인 과정은 부록에 기술하였다.

$$f(r, \phi) = \cos\theta \cdot \left\{ \frac{D}{D - r \sin\theta \sin\phi} \right\}^3 \cdot e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2} (1 - \sin^2\theta \sin^2\phi + \frac{D}{D - r \sin\theta \sin\phi})^2} \quad (2)$$

식 (2)에서 σ 는 가우스함수의 편차값을 나타내는 변수이다. 식 (2)을 식 (1)에 대입하여 평균조도값을 구하는 과정은 해석적으로 구하기 어려워 수치해석에 의한 적분을 통해서 계산한다.

2. PSM에 근간한 조명원의 방향추정 알고리즘 및 오차해석

본 절에서는 앞에서 유도한 조도식을 이용하여 서

로 다른 임의의 세 방향으로 기울어진 원반의 평균 밝기를 계산하고, 이를 PSM을 변형하여 얻은 조명원의 위치추정 알고리즘에 적용함으로써 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 추정오차 분포를 얻는 방법을 기술하였다.

일반적으로 PSM에서는 조사면 반사특성이 완전한 Lambertian이라는 가정하에서 조사빔과 면법선벡터가 이루는 사이각이 θ 라 할 때 그 위치에서의 밝기는 식 (3)와 같이 $\cos\theta$ 값에 비례한다는 사실로부터 근거하여, 그림 2에 보인 바와 같이 서로다른 세 조명원에 대해 얻어지는 밝기 I_1, I_2, I_3 를 연립하여 식 (4)와 같은 영상조도방정식을 얻어, 그 위치에서의 면법선벡터 \bar{N} 값을 얻게 된다.⁽⁹⁾

$$I = I_{\max} \cos \theta \quad (3)$$

$$\bar{N} = \frac{I_1(\bar{N}_b \times \bar{N}_c) + I_2(\bar{N}_c \times \bar{N}_a) + I_3(\bar{N}_a \times \bar{N}_b)}{[\bar{N}_a \cdot (\bar{N}_b \times \bar{N}_c)]} \quad (4)$$

여기서 I_{\max} : 면법선벡터와 조사빔이 이루는 사이각이 0 도 일때의 밝기값.

$\bar{N}_a, \bar{N}_b, \bar{N}_c$: 세 조명원에 대한 각각의 위치벡터

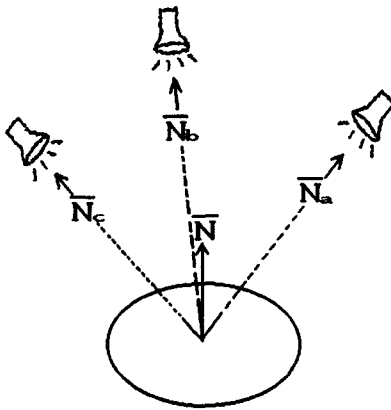


그림 2. PSM에서 조사대상면과 세 조명원의 위치벡터와의 관계

Fig. 2. Illustration of the object plane and the light sources positioned for the PSM.

이때 역의 관계를 이용하여 고정된 한 조명원에 대해, 조사대상면 상에서 법선벡터가 서로다른 세 값, 즉 $\bar{N}_1, \bar{N}_2, \bar{N}_3$ 가 되도록 위치한 면들의 밝기를 I_1, I_2, I_3 라 할 때 이 값들과 $\bar{N}_a, \bar{N}_b, \bar{N}_c$ 대신, $\bar{N}_1, \bar{N}_2, \bar{N}_3$ 값을 식 (4)에 대입하면, 이때 얻어지는 벡터 \bar{N} 은 고

정된 조명원의 위치벡터 값이 된다.

따라서 서로 다른 세 방향으로 위치한 원반을 대상으로 세 쌍의 평균조도값들을 전 절에서 기술한 바와 같이 계산하여 이를 식 (4)에 대입하여, 조명원의 위치를 얻는 작업을 여러 조합의 경우에 대해서 수행하면, 조명원 위치추정 오차의 분포를 알 수 있다. 이러한 조명원 위치추정 오차의 분포는 본 절에서 설정한 비이상적인 조명원 모델하에서 PSM을 적용하여 대상물체의 방향정보를 추정할 때 나타나는 물체의 위치추정 오차와 상사관계(analogy)에 있다. 이 경우 임의의 방향으로 위치할 수 있는 원반형태의 조사대상면을 제공하는 계측기구를 제작하면, 이와 같은 오차해석 방법은 실제 측정에 의한 오차해석을 수행하기에 용이하여 조명원 위치보정 및 오차해석 목적에 적합하게 된다. 특히 전체 원반에 대한 평균조도를 구하여 PSM에 적용하는 것은, 기존의 Horn, Ikeuchi 등에 의해 보여진 pixel-by-pixel mapping에 의한 해석방식⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾으로는 얻을 수 없는, 조사범위에서의 공간적인 위치에 따른 오차변화를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한 대상면을 원형의 평면으로 설정한 이유는, 대칭성으로 인해 수학적으로 다루기 쉽다는 점과, 방향성에 따른 추정오차의 분포 특성을 해석하기에 적합한 이유이다.

Ⅲ. 시뮬레이션에 의한 조명원 방향추정오차 분포

전 장에서 기술한 조명원 위치추정 알고리즘에 적용하여 이때 나타나는 방향추정 오차의 분포를 얻는 시뮬레이션을 수행하였다.

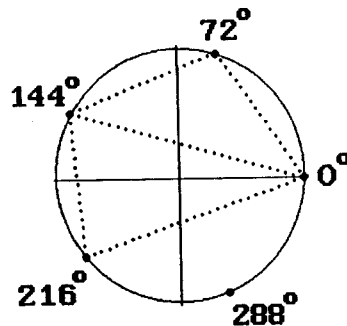


그림 3. 시뮬레이션을 위해 설정한 방위각값의 조합
Fig. 3. Azimuth angles selected for the simulation.

조도분포함수와 조사원반면의 세 방향값을 여러 조

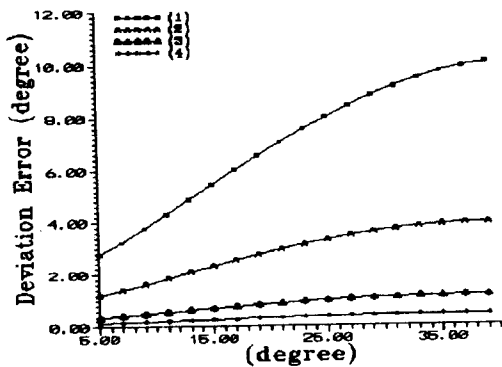
합이 되도록 변화시키면서 시물레이션을 수행함으로써, 조명원과 조사원반면의 상대적인 위치가 광범위하게 변하는 경우에 대한 방향추정 오차분포를 얻도록 하였다. 설정한 좌표계에서 조명원이 z 축상, 즉 위치벡터의 천정각과 방위각값이(0°, 0°)에 위치한 경우에 대하여 조명원 방향추정 오차를 구하는 시물레이션을 수행하였다.

조명원 위치벡터가 (0°, 0°)인 경우 조사 원반면의 세 방향벡터 방위각은 그림 3에 나타난 바와 같이 방위각의 조합이 상대적으로 한쪽으로 치우친 경우 (0°, 72°, 144°)와, 덜 치우친 경우 (0°, 144°, 216°) 로 나누어 시물레이션을 수행하였다. 이때, 세 방향벡터의 천정각 조합은 두 방향벡터의 천정각은 5°, 10°에 고정시키고 나머지 한 방향벡터의 천정각은 15°에서 40°까지 변화시키며 시물레이션을 수행하였다. 또한 설정된 조명모델에서 조도분포함수를 가우스함수형태로 가정하고 편차(σ)값을 광범위하게 변화시키며 방향추정 오차를 구하였다.

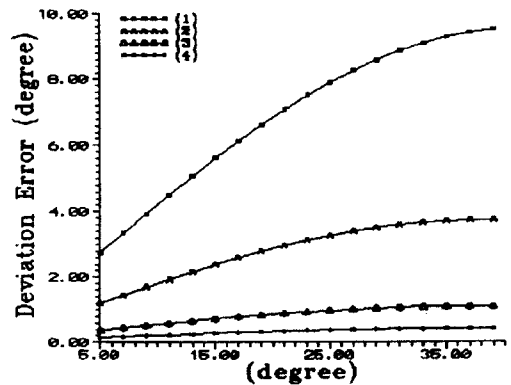
시물레이션을 수행하기 위한 조명환경은 조명원과 조사원반면과의 수직거리 D를 1.7m로 설정하였고, 조사

원반면의 직경(2R)은 PSM을 적용할 때 기하학적 비선형성에 의한 오차때문에 카메라로부터의 거리의 1/10 보다 작아야 한다는 점을 고려하여 16 cm로 설정하였다.

이상에서 수행하여 얻은 조명원 방향추정 오차의 분포를 그림 4에 나타내었다. 그림 4(a)는 원반면의 세 방향벡터 방위각을 0° 72° 144°에 고정시키고 조도분포 함수의 편차(σ)값을 변화시키며 얻은 방향추정 오차값을 나타낸 것이다. 여기서 수평축은 방위각을 72°에 고정시킨 조사원반면의 천정각과 144°에 고정시킨 원반면의 천정각과의 차이값을 의미한다. 수직축은 조명원의 참방향과 시물레이션에 의해 추정된 방향값과의 오차를 나타낸 것이다. 그림 4(b)는 그림 4(a)와 같은 데이터를 원반면 방위각 조합이 0° 144° 216°로 설정한 경우에 대해 얻은 것이다. 이상에서 알 수 있듯이 세 원반면 방위각 조합이 한쪽으로 치우친 경우 그림 4(a)가 방위각 조합이 상대적으로 대칭적으로 위치한 경우 그림 4(b) 보다 방향추정 오차가 큰 것을 확인할 수 있었다. 천정각의 차이가 커지는 경우 또한 오차값이 커지는 것을 확인할 수 있었다.



(a)



(b)

그림 4. (a)방위각 조합이 0°, 72°, 144°일 때 얻은 조명원방향 추정오차. (1) (2) (3) (4)는 가우스함수형태인 조도 분포함수의 편차, σ 값이 반경 R을 1.0으로 할때 각각 0.3, 0.5, 1.0, 2.0인 경우에 대한 결과이다 (b)방위각 조합이 0°, 144°, 216°일 때 얻은 조명원방향 추정오차. (1) (2) (3) (4)는 가우스함수형태의 조도 분포함수의 편차, σ 값이 반경 R을 1.0으로 할때 각각 0.3, 0.5, 1.0, 2.0인 경우에 대한 결과이다

Fig. 4. (a) Deviation error of the light source orientation estimated when the azimuth angles of the three object planes are set at 0°, 72°, and 144°. The values of the standard deviation σ (normalized to radius R) of the Gaussian distribution function associated with the (1),(2),(3), and (4) are 0.3, 0.5, 1.0, and 2.0, respectively. (b) Deviation error of the light source orientation estimated when the azimuth angles of the three object planes are set at 0°, 144°, and 216°. The values of the standard deviation σ (normalized to radius R) of the Gaussian distribution function associated with the (1),(2),(3), and (4) are 0.3, 0.5, 1.0, and 2.0, respectively.

IV. 실험에 의한 조명원 방향추정 오차

본 장에서는 조명원 위치, 조사원반면 크기, 조사원 반면 방향벡터의 조합등을 III 장에서 수행한 시뮬레이션과 같도록 하여 실제 실험환경을 구성하고, PSM을 적용할 때 나타나는 조명원방향 추정오차를 측정하여 시뮬레이션에 의하여 얻은 값과 비교하였다.

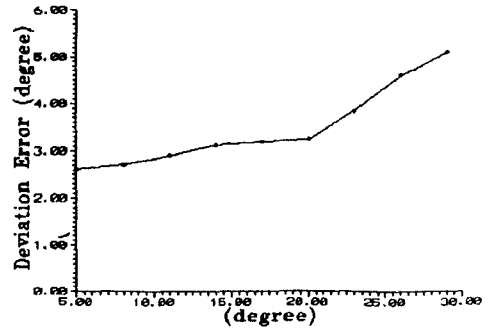
실험을 위하여 임의의 천정각과 방위각을 갖는 원반형태의 조사대상면을 제공하기 위한 계측기구를 그림 5에 나타낸 바와 같이 제작하였다. 원반상에는 직경이 16cm인 얇은 석고판을 부착하여 면의 반사특성이 Lambertian surface에 가깝도록 하였다. 원반의 중심점을 전체좌표계의 중심점으로 설정하였으며 원반으로부터 170cm 떨어진 위치에 조명원을 설치하여 조명원과 계측기구의 중심점을 잇는 축이 z축이 되도록 하였다. 또한, 카메라 위치에 따른 영향이 최소가 되도록 CCD video camera (model XC-57, Sony)를 조명원에 최대한으로 인접하도록 설치하였다. 조명은 정격이 12V, 50W이고 beam angle이 38도인 Halogen Lamp에 지름이 61.5mm이고 초점거리가 5.0cm인 볼록렌즈를 부착시켜 일정양의 collimation을 얻도록 하였다. CCD camera로부터 얻어지는 512 x 512 영상데이터는 IBM type PC에서 Frame Grabber에 의해 수집되고 처리된다.



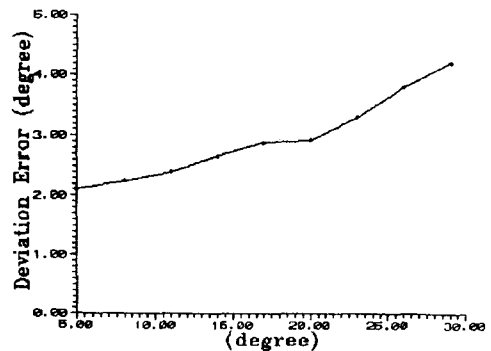
그림 5. 원반형태의 조사대상면을 제공하기 위해 제작한 계측기구

Fig. 5. Instrumental tool fabricated for the circular-disk type object plane.

방향추정 오차분포를 구하기 위해 전장에서 시뮬레이션을 수행한 경우와 동일하게, 조도분포가 가우시안수형태인 경우 계측면의 세 방위각값을 한쪽으로 치우친 0°, 72°, 144° 와 비교적 덜 치우친 0°, 144°, 216°에 대하여 실험을 수행하였고, 조도를 측정하여 방향추정 오차를



(a)



(b)

그림 6. (a) 방위각 조합이 0°, 72°, 144° 일 때 실험에 의해 얻은 조명원방향 추정오차

(b) 방위각 조합이 0°, 144°, 216° 일 때 실험에 의해 얻은 조명원방향 추정오차

Fig. 6. (a) Experimental results shown for the deviation error of the estimated light source orientation when the three azimuth angles of the object planes are set at 0°, 72°, and 144°.

(b) Experimental results shown for the deviation error of the estimated light source orientation when the three azimuth angles of the object planes are set at 0°, 144°, and 216°.

구하였다. 이상의 실험결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)와 그림 6(b)에서 수평축은 천정각값이 5°차이를 갖도록 고정시킨 방향벡터와 나머지 한 방향벡터와 이루는 천정각값의 차이를 의미하고, 수직축은 조명원 방향추정 오차분포를 나타낸다.

그림 6(a)은 방위각의 조합이 0°, 72°, 144°인 경우에 대해 측정된 결과인데, 방향추정 오차분포가 0°, 144°, 216°인 그림 6(b) 경우보다 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 시뮬레이션에서의 결과와 마찬가지로 조사대상면의 천정각 분포가 커질수록 방향추정오차가 커지는 것을 확인할 수 있다.

이상의 측정으로부터 얻어진 추정오차는 조명원, 면특성, camera 등 복합적인 요인들로부터 기인한 값인바, 이중 비이상적인 조명원으로부터 기인한 오차의 상대적인 양을 알아보기 위하여 실제 사용한 조사원반에서의 조도분포를 반복적으로 측정하여 curve fitting 작업을 통해 가장근사한 σ 값을 얻는 실험을 수행하였으며 이 결과 원반에서의 분포값은 $\sigma=0.60R$ 로 얻어 그림 7에 나타내었다.

Sample number: 36

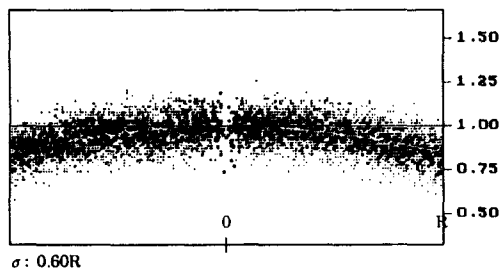


그림 7. 원반형 조사 대상면의 밝기분포
Fig. 7. Luminance distribution of circular-disk type object plane.

실제 환경하에서 측정된 원반상의 조도분포와 가장 근사한 분포함수 모델의 편차 σ 값을 curve fitting 작업을 통해서 0.60R로 얻었다. 그림 7에서 보여진 바와 같이 실제 실험에 사용된 조명의 조도분포가 σ 값이 0.60이 되는 경우보다는 불균일하지 않다(즉, $\sigma > 0.6R$)는 가정에서는, 이상적인 평행광이 아닌 이유에서 기인하는 오차가 약 1.0도값을 중심으로 분포되어 있고, 실제 실험에서 얻어진 오차는 약 3.5도를 중심으로 분포되어 있음을 알 수 있다. 따라서, 범용조명환경의 경우 비이상적인 조명모델로부터 기인한 오차는 본 실험에서 실제 측정결과 나타난 복합적인 오차의 상당 부분을 차지하는 것을 확인할 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 PSM을 적용하여 3차원 깊이정보를 얻고자 할 때, 평행광에서 벗어난 일반적인 조명원에 의한 오차해석을 하기 위해서 조명원의 조도함수가 가우스분포인 경우에 대한 모델링을 하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 하여 여러 계측오차 중 조명에 의한 요인을 분석하였다. 또한 기준면을 제공할 수 있는 계측기구를 제작하여 고정된 조명원의 방향을 PSM을 적용하여 계측할 수 있는 알고리즘을 구성하였고, 실제 여러방향면들의 조합을 사용하여 측정된 조명원의 위치벡터 값들을 보여주었다. 실험결과를 통하여 불 때 조명원이 이상적인 평행광에서 벗어난 이유에서 기인된 오차는 실제 측정된 복합 오차의 상당한 부분을 차지한다는 것을 알 수 있었다. 앞으로 조명에 대한 오차외에 면의 특성등을 포함한 기타 오차요인들에 대한 연구와 보다 많은 실험을 통하여 오차들에 대한 정량적인 해석을 이룩하는 연구가 필요하다 하겠다. 이러한 연구결과는 PSM을 응용한 3차원 물체인식에 필요한 기초 보정자료로 사용될 수 있으며, 조명원 calibration 및 궁극적으로는 인식을 위한 계측의 정밀도를 높이는 데 기여하게 될 것이다.

附錄

조명원으로부터 이르는 중심축과 90°를 이루는 면을 기준으로 조사원반면이 x 축을 회전축으로 하여 각 θ 만큼 기울어진 경우 원반상의 임의의 점 (r, ϕ) 의 밝기는 r, ϕ 에 대한 함수형태로 나타나며 이를 $f(r, \phi)$ 라 하고 구하는 과정을 다음에 기술하였다.

그림 8에 나타낸 바와 같이 대상면이 조명원으로부터 이르는 중심축에 대하여 90°인 경우 이를 면 G라 하고 이때 평면의 평균밝기는 최대이고 이 값을 I_{max} 라 한다. 면 G상에서 중심점으로부터 r만큼 떨어져 있고 방위각이 인 점 p에서의 밝기는 식 (A1)에 나타낸 바와 같이 가우스함수형태로 가정하였고, 이때 I_{max} 는 다음 식 (A2)과 같이 적분에 의하여 구할 수 있다.

$$f_0(r, \phi) = f_{max} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (A1)$$

여기서 f_{max} 는 중심점에서의 밝기값이고 σ^2 는 가우시안함수의 분산을 의미한다.

$$I_{max} = \int_0^r \int_0^{2\pi} f(r) r dr d\phi = \int_0^r \int_0^{2\pi} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \cdot r dr d\phi \quad (A2)$$

면 G가 x축을 축으로 θ 만큼 회전한 경우의 원반을 G'라 하고 이때 점 p의 공간상 위치는 그림 8에 표시한 바와 같이 점 p'로 이동하며 이때의 밝기를 $f(p')$ 라 한다. 이때 점 p'를 포함하면서 z축에 수직인 가상의 면을 G''라 하고 G'상의 점 p'의 밝기를 $f'(p')$ 라 한다. 점 p'에 이르는 조사 빔과 면 G의 법선 벡터가 이루는 사이각을 Ψ' 이고 면 G''의 법선 벡터와 이루는 사이각을 Ψ 라 하면 $f(p')$ 와 $f'(p')$ 의 관계는 식 (A3)과 같이 된다.

$$f(p') = f'(p') \cdot \frac{\cos \Psi}{\cos \Psi'} \quad (A3)$$

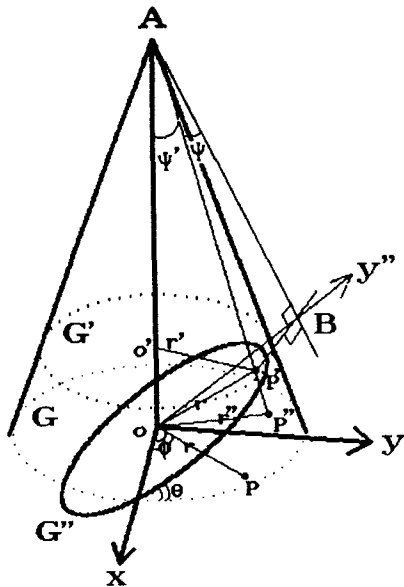


그림 8. 조사원반면 G' 평면의 좌표상 표시도
Fig. 8. Illustration of the object plane G' in the coordinate system.

식 (A3)에서 $f'(p')$ 는 점 p'에 이르는 조사 빔이 면 G와 만나는 점 p''에서의 밝기 $f_0(p'')$ 를 구한다면 $f'(p')$ 와 $f_0(p'')$ 의 관계가 조사 빔에서 이르는 거리의 제곱에 반비례한다는 사실로부터 식 (A4)와 같이 된다.

$$f'(p') = f_0(p'') \cdot \frac{D^2}{D'^2} \quad (A4)$$

D : 조명원(A)에서 면 G의 중심(o)에 이르는 거리
D' : 조명원(A)에서 면 G'의 중심(o')에 이르는 거리

조명원에서 면 G'의 중심에 이르는 거리 D'은 식

(A5)로 얻어지며

$$D' = D - r \sin \theta \sin \phi \quad (A5)$$

또한, $f_0(p'')$ 는 식 (A1)로부터 식 (A6)과 같이 얻어진다.

$$f_0(p'') = f_{\max} e^{-\left(\frac{r''^2}{2\lambda^2}\right)} \quad (A6)$$

z축으로부터 면 G'상의 점 p'에 이르는 거리 r'와 면 G상의 점 p''에 이르는 거리 r''은 각각 식 (A7), (A8)로 주어진다.

$$r' = \sqrt{r^2} = x_0 = \sqrt{r^2(1 - \sin^2 \theta \sin^2 \phi)} \quad (A7)$$

$$r'' = \frac{D}{D'} r' \quad (A8)$$

여기서 x_0 는 면 G'의 중심(o')과 면 G의 중심(o) 사이의 거리이다.

점 p'에 이르는 조사 빔과 면 G의 법선 벡터가 이루는 사이각에 대한 Ψ' 는 그림 8에서 나타나는 바와 같이

$$\begin{aligned} \cos \Psi' &= \frac{D'}{\sqrt{r'^2 + D'^2}} \\ &= \frac{D - r \sin \theta \sin \phi}{\sqrt{D^2 + r^2 - 2Dr \sin \theta \sin \phi}} \end{aligned} \quad (A9)$$

로 구하여진다.

또한, $\cos \Psi$ 는 공간상의 삼각형 ABp'로부터

$$\cos \Psi = \frac{AB}{Ap'}$$

이 된다.

여기서 삼각형 OAB에서

$$AB = D \cos \theta$$

삼각형 OBp'로부터

$$Bp' = \sqrt{r^2 + D^2 \sin^2 \theta - 2rD \sin \theta \cos(90 - \phi)}$$

삼각형 ABp'에서

$$Ap' = \sqrt{D^2 + r^2 - 2rD \sin \theta \sin \phi}$$

$$\text{따라서 } \cos \Psi = \frac{D \cos \theta}{\sqrt{D^2 + r^2 - 2rD \sin \theta \sin \phi}} \quad (A10)$$

로 구해진다.

식 (A4) 과 (A6)으로부터 구한 $f'(p')$ 과 식 (A9) 및 (A10)로부터 얻은 $\cos \Psi', \cos \Psi$ 를 식 (A3)에 대입하여 정리하면 만큼 기울어진 평면상의 한 점에서의 밝기(기울어진 G'평면에서 p'점의 밝기)에 대한 식을 식 (A11)와 같이 얻을 수 있다.

$$f(p') = f(P) \cdot \frac{D^2}{D'^2} \cdot \frac{e^{-\frac{r'^2}{2s'^2} - \frac{D^2}{D'^2}}}{e^{-\frac{r^2}{2s^2}}} \cdot \frac{D \cos \theta}{D'} \\ = \frac{D^3}{D'^2} \cdot \cos \theta \cdot e^{-\frac{r'^2}{2s'^2} - \frac{D^2}{D'^2}} \quad (A11)$$

식 (A11)를 극좌표 형식으로 표현하면, 원반상의 임의의 점 (r, ϕ) 에서의 밝기는 최종적으로 식(A12)과 같이 얻어진다. $f(r, \phi)$ 를 식 (A13)에 대입하여 수치해석 기법으로 적분하면 기울어진 평면의 밝기를 구할 수 있다.

$$f(r, \phi) = \cos \theta \cdot \left\{ \frac{D}{D - r \sin \theta \sin \phi} \right\}^3 \\ \cdot e^{-\frac{r^2}{2s^2} (1 - \sin^2 \theta \sin^2 \phi) - \left(\frac{D}{D - r \sin \theta \sin \phi} \right)^2} \quad (A12)$$

$$I = \int_0^{\theta_0} \int_0^{2\pi} f(r, \phi) r \, dr d\phi \quad (A13)$$

参 考 文 献

[1] B.K.P. Horn and M.J. Brooks, *Shape from Shading*. The M.I.T. Press. 1989.
 [2] B.K.P. Horn, "Understanding image intensity". *Artif. Intell.* vol. 8, no. 11, pp. 201-231, 1977.
 [3] B.K.P. Horn, *Robot Vision*. Cambridge, MA. and New York, M.I.T. Press. 1986.
 [4] W.M. Silver, "Determining shape and reflectance using multiple images".

S.M Thesis, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, M.I.T. Cambridge, Mass., June, 1980.
 [5] R.J. Woodham, "Photometric method for determining surface orientation from multiple images". *Optical Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 139-144, Jan./Feb. 1980.
 [6] R. Ray, J. Birk and R.B. Kelley, "Error analysis of surface normals determined by radiometry". *IEEE Trans. PAMI.*, vol. 5, no. 6, pp. 631-645, 1983.
 [7] X.Y. Jiang and H. Bunke, "On error analysis for surface normals determined by photometric stereo". *Signal Processing*, vol. 23, pp. 221-226, 1991.
 [8] IWA. Yuji, SUG. Hidezumi and ISH. Naohiro, "Photometric stereo under illumination from unknown zenith angles". *The Transaction of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers*, vol. J74-D-II, no. 3, pp. 321-329, 1991.
 [9] K. Ikeuchi, B.K.P. Horn, "An application of the photometric stereo method", in *Proc. IJCAI-79*, Tokyo, Japan, pp. 413-415, 1979.
 [10] K. Ikeuchi, "Recognition of 3-D objects using the Extended Gaussian Image". in *Proc. 7th Int. Joint Conf. on Artif. Intell.* pp. 595-600, 1981.
 [11] B.K.P. Horn, "Extended Gaussian Image", *Proc. of the IEEE*, vol. 72, no. 12, pp. 1671-1686, Dec. 1984.

著者紹介



金泰銀(正會員)

1964年 1月 29日生. 1989年 8月
중앙대학교 전기공학과 졸업(공학
사). 1992年 2月 중앙대학교 대학
원 전자공학과 졸업(공학석사).
1993年 ~ 현재 중앙대학교 대학
원 박사과정 재학중. 주관심 분야
는 컴퓨터비전, 패턴인식, 신호처리 등임.



張泰奎(正會員)

1955年 11月 13日生. 1979年 서
울대학교 전기공학과 졸업(공학
사). 1981年 한국과학기술원 전기
및 전자공학과 졸업(공학석사).
1981年 ~ 1984年 현대엔지니어
링(주), 현대전자산업(주) 근무.
1987年 University of Florida 전기공학과 졸업(공
학박사). 1987年 ~ 1990年 Tennessee State
University 조교수. 1990年 ~ 현재 중앙대학교 제
어계측공학과 부교수. 주관심 분야는 계측제어, 신호
처리, 패턴인식 등임.

崔宗秀(正會員) 第28卷 B編 第5號 參照

현재 중앙대학교 전자공학과 교수