

논문 2013-08-14

광원 방향에 대한 제한조건을 이용한 Photometric Stereo Calibration

(Photometric Stereo Calibration using Constraint on Light Source Directions)

정 성 철, Nguyen Viet Hung, 원 상 철*

(Seong-Cheol Jeong, Viet Hung Nguyen, Sang-Chul Won)

Abstract : This paper proposes one method on photometric stereo calibration using the constraint on light source directions in which the light sources have the unknown tilt and slant angles but the slant angles are the same. First, the constraint is analyzed based on the equation of linear ambiguity which leads to the conclusion that another constraint should be added to solve the calibration completely. Later, the combination of constraint on light source directions and the constraint that there exists at least six surface patches having known albedos is exploited to resolve the linear ambiguity up to an accurate and close-form solution. The effective performance of the proposed method is demonstrated through experiment results.

Keywords : Computer vision, Photometric stereo calibration, Light source constraint, Inspection system.

1. 서 론

컴퓨터 비전에 있어서 가장 확연한 문제 중 하나는 주어진 이미지 데이터들이 다른 설정조건하에서 얻어졌을 때 대상 표면의 기하학적 구조를 복원하는 것이다. Photometric stereo는 광원조건들이 변화되지만 조망 방향을 유지될 때 사용되는 기술 중 하나이다 [1]. 광원방향, 강도 정보, 그리고 불필요하게 사용되는 측정 장비를 줄이는 요구들 때문에 광원보정 (light source calibration) 기술은 photometric stereo의 가장 큰 해결과제로 여겨져 오고 있다. 게다가 광원보정 기술은 앞으로 계속 발전해 나갈 스마트 폰에 탑재되는 고성능 카메라와 함께 대상을 3차원 이미지로 복원하는 기술에 널리 사용될 것으로 전망된다. 이를 위해 여러 연구들이 진행되었다. 몇몇 연구에서는 어떠한 제한 조건 없는 오직 3×3 모호 행렬 (ambiguity matrix)만을

보정결과로 만들어 낼 수 있다는 것을 보였고, 이는 제한조건은 모호성(ambiguity)을 풀기 위해서 제한조건이 필수적으로 적용되어야 함을 보였다 [2]. 일반적으로, 이러한 제한조건들은 표면 형태, 표면 반사율, 광원 강도 및 광원방향을 포함하고 있다.

표면 형태와 관련해서 가장 널리 알려진 제한조건은 모호성을 Generalized Bas-Relief(GBR)로 줄이는 적분가능 조건이다 [3]. 표면 반사율을 고려했을 때 일반적인 제한조건은 몇몇 표면 패치들에서의 알려진 알베도(albedo)들에 대한 조건이나 특정한 특징을 가지는 알베도들의 분포에 대한 조건이다. 광원과 관련해 널리 쓰이는 제한조건은 광원 강도들은 서로 일정한 비율로 알 수 있다는 가정이다. 대부분의 가정들은 하나의 유일한 해를 풀기 위해서 하나로 통합되어 사용된다.

몇몇 연구들은 적분가능(integrability) 제한조건을 보정문제를 풀기위해서 다른 제한조건들과 함께 접목시켜서 사용해오고 있다. 적용가능성과 광원 강도 제한조건과의 조합은 Lambertian 표면뿐만 아니라 주변배경정보가 포함된 상황에서도 보정결과를 알아내는데 도움을 준다 [4, 5]. 하지만 그 적용된 알고리즘은 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 적어

*Corresponding Author(won@postech.ac.kr)

Received: 03 Sep. 2012, Revised: 28 Sep. 2012,

Accepted 04 Oct. 2012.

S.C. Jeong, V.H. Nguyen, S.C. Won: POSTECH

도 6개의 알려진 albedo를 가지는 패치나 nominal 강도를 가지는 광원에 대한 가정을 이용하여서 보정문제는 로테이션 행렬을 이용해서 얻어진다 [2]. 게다가, 만약 적어도 3개의 법선 벡터(normal vector)나 광원 방향이 주어진다면, 그 로테이션 행렬은 [6]에서 개발된 방법을 기초하여 closed-form 솔루션으로 알아낼 수 있다. 그리고 대상 반사율이 오직 작은 수의 다른 albedo값을 가지고 있을 때는 albedo 분포의 엔트로피(entropy)는 낮아지고 그 결과 GBR 파라미터들은 엔트로피 함수를 최소화시킴으로써 정의될 수 있다 [7].

더 많은 제한조건을 개발하기 위해 Lambertian과 반사 항들의 합으로 표현되는 표면 반사율이 고려되었다 [8]. 동일 관점 제한조건은 convex 대상의 선형 변환을 줄이기 위해서 사용되었다. 그것은 등방성 스케일링, 관점 벡터주변의 로테이션, 그리고 좌표 프레임으로 구성된다. 이 제한 조건은 적분 가능 제한조건과 결합하면서 변환의 단일해를 제공한다. [9]의 연구에 기반하여, 반사는 일반적인 non-convex 표면에 대한 GBR을 풀기 위한 하나의 소스이다. 하지만 표면들에 대한 모호성이 여전히 존재할 때에는 안 좋은 상황이 된다.

개발된 방법들 가운데, 광원방향에 대한 제한조건을 적용한 연구는 아직 없었다. 이것은 그것이 모르는 조명 조건의 보수성(conservative)에 영향을 준다는 사실 때문이다. 하지만, 몇몇 실제적인 경우에 있어서, 광원들이 동일한 slant 각도를 가진다는 제한조건은 동작에 있어서 실현 가능한 일이다. 하나의 사례는 광원들이 동일 slant 각의 원 둘레에 임의로 분포되어 있을 때이다. 또 다른 예는 다른 높이의 다양한 물체에 대해서 동작하는 시스템을 요구하는 표면 검사 공정이다. 이와 같은 필요에 의해, 심지어 알려진 광원 위치임에도 그 보정은 반드시 slant 각도에 의해서만 이루어져야 한다. 따라서 하나의 합리적인 설계는 모든 광원을 같은 slant 각을 가지도록 만들어서 보정과정에서 오로지 하나의 slant 변수에 의해서 이루어지도록 하는 것이다. 결과적으로, 이 제한조건이 어떻게 동작하는지에 대한 연구가 행하여져야 한다. 이러한 연구는 보정과정에서 발생하는 계산을 간략화시켜 줄 수 있기 때문에 스마트폰과 같은 모바일 디바이스에 쉽게 적용될 수 있다.

본 논문은 다름과 같이 구성되었다. 2장에서는 grayness photometric stereo의 기본지식과 보정의 모호성에 대해서 언급된다. 이 모호성을 광원 방향 제한조건을 이용하여 모호성을 해결하는 방법은

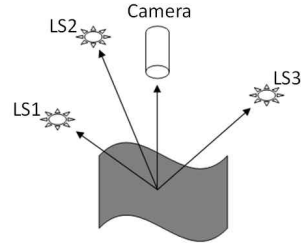


그림 1. 전형적인 photometric stereo system

Fig. 1 Typical photometric stereo system

3장에서 제안된다. Jerry's Taurus Studio [10] 데이터베이스를 기반으로한 실험결과는 4장에서 보이고 5장에서는 본 논문의 결론을 나타낸다.

II. GRAYNESS PHOTOMETRIC STEREO와 UNKNOWN 광원들의 보정에 있어서의 모호성

1. Grayness Photometric Stereo

Photometric stereo는 고정된 카메라와 다른 조건의 광원 하에서 얻어진 이미지로부터 대상들의 기하학적 표면과 반사 특성을 복구하는 방법이다. 일반적으로 3개의 동일 평면상이 아닌 광원으로부터 적어도 3개의 이미지가 취하여 진다 (Fig. 1).

전통적인 photometric stereo method에서, Lambertian 표면의 세 개의 주어진 이미지는 동일한 빛의 파장을 가지고 일정 거리를 가지고 위치한 광원에 의해 밝혀진다. 게다가, 조망거리와 연관이 적은 대상에 대해서는, 그 이미지 투영은 직각투영(orthographic projection)으로 고려될 수 있다. 결과적으로, 그 방사 방정식은

$$I_{i,j} = (l_i \cdot n_i) \int E_j(\lambda) R_i(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (1.1)$$

$$I_{i,j} = (l_i \cdot n_i) \sigma_j \int E(\lambda) R_i(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (1.2)$$

$$I_{i,j} = (l_i \cdot n_i) \sigma_j \rho_i = (\rho_i n_i) \cdot (\sigma_j l_j) = b_i \cdot s_j \quad (1.3)$$

여기서 λ 는 파장이고 $E_j(\lambda)$, l_j , s_j 은 각각 분광 분포 함수, 정규화 된 방향 벡터, 그리고 j번째 광원의 광량이다. 명확하게 σ_j 은 j번째 광원 파동 스펙트럼의 크기를 가리킨다. $R_j(\lambda)$, ρ_i , n_i 은 반사률 함수, (1.2)내의 적분값인 albedo, i번째 픽셀로 투사하는 패치 표면의 정규화 된 normal 벡터를 뜻한다. 마지막으로, $S(\lambda)$ 은 카메라 센서의 응답함수이다. 만약 그 광원 방향들과 광량들을 알고 있다면 albedo와 표면 normal 벡터는 쉽게 풀어진다.

$$[I_1 I_2 I_3]^T = [l_1 l_2 l_3]^T \rho n \text{ or } I = L^T \rho n \quad (2)$$

Albedo와 normal 벡터는 $\rho = |L^{-1}I|$ 와 $n = L^{-T}I/\rho$ 처럼 찾아진다.

일반적으로 f개의 광원 방향에서 얻어진 f개의 이미지가 있을 때, 대상의 그 albedo와 normal 벡터는 least square 방법으로 얻어진다: $\rho = |(LL^T)^{-1}LI|$, 그리고 $n = (LL^T)^{-1}LI/\rho$.

2. Photometric Stereo 보정과 모호성

f개의 광원이 사용되는 photometric stereo 문제를 고려해보자. 각 이미지마다 p개의 픽셀이 있다고 가정하고 p×f 행렬 I로 이미지 강도 데이터를 정의하자:

$$I = \begin{bmatrix} I_{11} & \dots & I_{1f} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{p1} & \dots & I_{pf} \end{bmatrix} \\ = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_p]^T [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_f] = B_{3 \times p}^T S_{3 \times f} \quad (3)$$

여기서 모호성은 어떤 역행렬이 존재하는 3×3 행렬 A에 대해서 만약 $B^* = A^{-T}B$, $S^* = AS$ 이면 $I = B^T S = B^{*T} S^*$ 이라고 밝혀진다.

따라서 광원들을 보정하기 위해서 그 방정식 어떻게 유일무이한 행렬 B, S, 그리고 A를 찾을 것인가에 대한 문제가 된다. 행렬 I의 3,4번째 큰 특이값들 사이의 비율이 충분히 크다는 조건하에서 행렬 B와 S내의 이미지 강도데이터는 분해하는 하나의 방법은 [2]에서 제공되었다. 행렬 A와 관련해서는 [3]에서 논의된 것처럼 균등한 그림자는 선형 변환을 알아내는 충분한 정보를 제공해주지 않는다. 따라서 제한조건들은 반드시 밝혀져야만 한다.

III. 광원 방향에 대한 제한조건을 이용한 보정기법

1. 이미지 강도 데이터의 특이해 분해 (Singular-Value Decomposition)

앞서 언급한 것과 같이, 이미지 강도 행렬은 B와 S의 곱으로 나타난다. 반면 B는 3×p 표면 행렬이고 S는 3×f 광원 행렬이다. 때문에, I의 rank는 3이어야 한다. 하지만 실제로 얻어진 이미지들은 3보다 큰 rank를 가지는 I 행렬을 만들어낸다. 그 이유는 노이즈의 영향이다. [2]에서 밝혀진 것과 같이, B와 S행렬은 SVD방법으로 추정되어 질수 있다. 그것은 행렬 I가 다음 $U_{p \times f}$, $\Sigma_{f \times f}$, 그리고

$V_{f \times f}$ 와 같은 3개의 행렬들로 분해되어 진다는 의미이다.

$$I = U_{p \times f} \Sigma_{f \times f} V_{f \times f} \quad (4)$$

여기서 Σ 은 공분산행렬 $I^T I$ 의 고유값의 제곱근을 대각성분으로 가지는 행렬이고, U는 열(column)들이 $I^T I$ 의 정규화 된 고유벡터들인 행렬이고, 그리고 V는 행(row)들이 $I^T I$ 의 정규화 된 고유벡터들인 행렬이다.

행렬 U의 처음 3개의 열들과 Σ 의 좌측상단 3×3 부분, 그리고 V의 처음 3개의 행들을, 즉, $U'_{p \times 3}$, $\Sigma'_{3 \times 3}$, $V'_{f \times f}$ 을 고려하자. 만약 $\Sigma'_{3 \times 3}$ 이 노이즈의 레벨보다 충분히 큰 특이점을 가지고 있다면, least square방법으로 이상적인 이미지 강도 행렬은:

$$\bar{I} = U' \Sigma' V' \quad (5)$$

결국, 행렬 B와 S를 찾기 위해서 Σ' 은 다음 조건 $\Sigma' = \Sigma'_1 \Sigma'_2$ 을 만족하는 두 개의 3×3 임의의 행렬들 Σ'_1 과 Σ'_2 로 분해되어진다. 일반성의 저해 없이, $\Sigma'_1 = \Sigma'_2 = (\Sigma')^{1/2}$ 을 선택하면, B와 S는 다음과 같이 찾아진다.

$$\bar{I} = (U'(\Sigma')^{1/2})(\Sigma')^{1/2}V' = \bar{B}^T \bar{S}, \quad (6) \\ \bar{B} = (U'(\Sigma')^{1/2})^T, \bar{S} = (\Sigma')^{1/2}V', \\ B = A^{-T} \bar{B}, S = A \bar{S}$$

\bar{B} 와 \bar{S} 는 각각 모조 표면행렬(pseudo surface matrix)과 모조 광원행렬(pseudo light source matrix)라고 불린다. 선형 모호성 때문에, 그 제한 조건은 행렬 A를 찾기 위해 사용되어야 한다. 그 다음은 어떻게 그 광원 방향에 대한 제한조건이 적용되는지를 나타낸다.

2. 광원방향 제한 조건

광원들의 모호성 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \sin(\alpha_1) \cos(\beta_1) & \sigma_2 \sin(\alpha_2) \cos(\beta_2) & \dots \\ \sigma_1 \sin(\alpha_1) \cos(\beta_1) & \sigma_2 \sin(\alpha_2) \cos(\beta_2) & \dots \\ \sigma_1 \cos(\alpha_1) & \sigma_2 \cos(\alpha_2) & \dots \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \sigma_f \sin(\alpha_f) \cos(\beta_f) \\ \sigma_f \sin(\alpha_f) \cos(\beta_f) \\ \sigma_f \cos(\alpha_f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{s}_{1x} & \bar{s}_{2x} & \dots & \bar{s}_{fx} \\ \bar{s}_{1y} & \bar{s}_{2y} & \dots & \bar{s}_{fy} \\ \bar{s}_{1z} & \bar{s}_{2z} & \dots & \bar{s}_{fz} \end{bmatrix} \quad (7)$$

σ_k , $0 < \alpha_k < 90$, $0 < \beta_k < 360$ 은 각각 k번째 광원의 강도, slant 각, 그리고 tilt 각도이다.

3개의 방정식이 있지만 (3f+9)개의 변수가 존재한다. 이것은 어떠한 제한조건 없이는 보정이 불가능하다는 것을 의미한다.

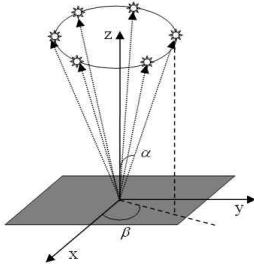


그림 2. 유사한 slant 각도들의 제한조건 하에서의 광원들 (α : slant 각도, β : tilt 각도)

Fig. 1. Light sources under constraint of similar slant angles (α : slant angle, β : tilt angle)

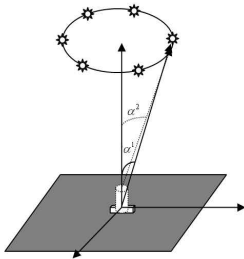


그림 3. 다른 높이의 두 개의 대상에 대한 다른 slant 각도를 가진 경우

Fig. 3. The illustration of different slant angles for two objects of different heights

광원 방향의 제한조건이 있는 경우를 고려하자. 그것은 모든 광원의 slant 각도들과 tilt 각도는 알 수 없지만, 동일한 slant 각도들을 가진다는 것을 의미한다 (Fig. 2). 이는 앞에서 논의한 바와 같이 여러 실제 시스템에 적용 가능한 제한조건이다. 하나의 예는 다른 높이의 다양한 대상들과 함께 작동하는 표면 검사 프로세스이다 (Fig. 3). 일반적으로 이 가정은 광원들이 임의의 convex가 원점이고 축은 z축인 원뿔의 표면에 분포되어 있다는 사실과 동일하다.

이런 관점에서 행렬 S는

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_1 \sin(\alpha_1) \cos(\beta_1) & \sigma_2 \sin(\alpha_2) \cos(\beta_2) & \dots \\ \sigma_1 \sin(\alpha_1) \cos(\beta_1) & \sigma_2 \sin(\alpha_2) \cos(\beta_2) & \dots \\ \sigma_1 \cos(\alpha_1) & \sigma_2 \cos(\alpha_2) & \dots \\ \sigma_f \sin(\alpha_f) \cos(\beta_f) \\ \sigma_f \sin(\alpha_f) \cos(\beta_f) \\ \sigma_f \cos(\alpha_f) \end{bmatrix} \quad (8)$$

3f개의 방정식과 $(2f+10)$ 개의 변수가 있다. 결

과적으로,

- i) 만약 ($f < 10$)이면, 변수들의 수가 방정식의 수보다 크고, 그러면 보정문제를 풀기위한 다른 제한조건이 반드시 존재하여야 한다.
- ii) 만약 ($f \geq 10$)이면, 변수의 수가 방정식의 수보다 작다. 하지만 그들은 비선형이고 따라서 해결하기 어렵다. 그러므로 일반적으로 다른 제한조건들이 적용되게 된다. 본 논문에서, 우리의 제한조건은 적어도 여섯 개의 간단한 closed-form의 해를 제공해주는 알고 있는 표면 패치의 제한 조건과 함께 적용된다.

적어도 여섯 개의 아는 표면 패치들을 가진다는 제한조건은 실제적인 것이다. 이 제한조건을 얻어내는 효과적인 방법 중 하나는 대상표면에 대한 sample들의 albedo를 찾는 것이다. [2]에서 논의된 것과 같이, 그 albedo에 대한 가정은 선형 모호성을 회전 행렬로 줄여준다. 이 회전행렬을 찾기 위해서 그 저차는 적어도 3개의 normal 벡터들이나 광원방향의 가정을 제안했다. 이후에 [6]에서 제안된 방법은 그 회전행렬을 찾기 위해서 적용될 수 있다. 확실히, 신뢰할 수 있는 해를 얻기 위해서 그 normal 벡터들의 수는 가능한 많아야 한다. 광원 방향과 관련해서, 적어도 3개의 광원방향을 미리 알아야 한다는 가정은 실제적이지 못하다. 그 회전행렬을 찾는 또 다른 방법은 미분가능 제한조건을 사용하는 것이다. 하지만 그 제한조건은 closed-form의 해를 제공해 주지 못한다. 본 논문에서는 closed-form의 해로 그 회전행렬을 풀기 위해서 광원방향의 제한조건을 제안한다.

만약 적어도 여섯 개의 albedo를 아는 표면 패치들이 있다면, [2]의 결과에 따라서 행렬 A는 회전행렬과 알고 있는 행렬 A^* 를 이용하여 정의된다, 즉, $A = RA^*$ 이다. 회전행렬 R을 구하기 위해서 우리는 그것을 x, y, z축에 대한 세 개의 회전의 조합으로 나타낸다.

$$R = R_{z,\theta} R_{y,\phi} R_{x,\gamma} \quad (9)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\phi) & 0 & \sin(\phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\phi) & 0 & \cos(\phi) \end{bmatrix} \\ \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ 0 & \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix}$$

이제 모호성 방정식은 $S = RS^*$ 와 $S^* = A^* \bar{S}$ 이다. 양변에 $R_{z,\theta}^{-1}$ 을 곱하면 우리는 다음을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} \cos(\phi) & 0 & \sin(\phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\phi) & 0 & \cos(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ 0 & \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{kx}^* \\ s_{ky}^* \\ s_{kz}^* \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 &= \begin{bmatrix} \sigma_k \sin(\alpha) \cos(\beta_k - \theta) \\ \sigma_k \sin(\alpha) \sin(\beta_k - \theta) \\ \sigma_k \cos(\alpha) \end{bmatrix} \\
 &\Rightarrow \begin{bmatrix} \cos(\phi) s_{kx}^* + \sin(\phi) \sin(\gamma) s_{ky}^* + \sin(\phi) \cos(\gamma) s_{kz}^* \\ \cos(\gamma) s_{ky}^* - \sin(\gamma) s_{kz}^* \\ -\sin(\phi) s_{kx}^* + \cos(\phi) \sin(\gamma) s_{ky}^* + \cos(\phi) \cos(\gamma) s_{kz}^* \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \sigma_k \sin(\alpha) \cos(\eta_k) \\ \sigma_k \sin(\alpha) \sin(\eta_k) \\ \sigma_k \cos(\alpha) \end{bmatrix} \\
 &\Rightarrow \begin{bmatrix} \cos(\phi) s_{kx}^* + a_k \sin(\phi) \sin(\gamma + \tau_k) \\ a_k \cos(\gamma + \tau_k) \\ -\sin(\phi) s_{kx}^* + a_k \cos(\phi) \sin(\gamma + \tau_k) \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \sigma_k \sin(\alpha) \cos(\eta_k) \\ \sigma_k \sin(\alpha) \sin(\eta_k) \\ \sigma_k \cos(\alpha) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\eta_k = \beta_k - \theta, \quad a_k = \sqrt{s_{ky}^{*2} + s_{kz}^{*2}},$$

$$\sin(\tau_k) = s_{kz}^*/a_k, \quad \cos(\tau_k) = s_{ky}^*/a_k \quad (10)$$

이것은 그 제한조건들이 절대값 결정에 의존하면서 tilt 각도들을 동일거리로 해결한다는 것을 의미한다. 이것은 z축에 대한 회전이 있기 때문에 논리적이다. 그러면 식 (10)으로부터

$$s_{kx}^{*2} + a_k^2 = \sigma_k^2 \Rightarrow \sigma_k = \sqrt{s_{kx}^{*2} + a_k^2} \quad (11)$$

모든 광원들이 같은 slant 각도들을 가지는 점을 이용하면, f개의 방정식들이 존재하게 된다 (k=1:f):

$$\begin{aligned}
 &\frac{-\sin(\phi) s_{kx}^* + a_k \cos(\phi) \sin(\gamma + \tau_k)}{\sigma_k} = \cos \alpha \\
 &\Rightarrow \frac{-\sin(\phi) s_{(k+1)x}^* + a_{k+1} \cos(\phi) \sin(\gamma + \tau_{k+1})}{\sigma_k} \\
 &= \frac{-\sin(\phi) s_{kx}^* + a_k \cos(\phi) \sin(\gamma + \tau_k)}{\sigma_k} \quad (12)
 \end{aligned}$$

이런 방정식들은 (f-1)개의 방정식을 만들어낸다 (k=1:(f-1)):

$$\begin{aligned}
 \tan(\phi) &= \frac{(b_k \sin(\gamma + \tau_k) - b_{k+1} \sin(\gamma + \tau_{k+1}))}{(\bar{r}_{kx} - \bar{r}_{(k+1)x})}, \\
 b_k &= \frac{a_k}{\sigma_k}, \quad \bar{r}_{kx} = \frac{r_{kx}}{\sigma_k}. \quad (13)
 \end{aligned}$$

결과적으로 γ 의 (f-2)개의 방정식이 생긴다.

$$\begin{aligned}
 &\frac{(b_k \sin(\gamma + \tau_k) - b_{k+1} \sin(\gamma + \tau_{k+1}))}{(r_{kx} - r_{(k+1)x})} \\
 &= \frac{(b_{k+1} \sin(\gamma + \tau_{k+1}) - b_{k+2} \sin(\gamma + \tau_{k+2}))}{(r_{(k+1)x} - r_{(k+2)x})} \\
 &\Rightarrow \tan(\gamma) = \frac{\sin(\gamma)}{\cos(\gamma)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{(r_{(k+1)x} - r_{(k+2)x})(b_k \sin(\tau_k) - b_{k+1} \sin(\tau_{k+1}))}{(r_{kx} - r_{(k+1)x})(b_{k+1} \cos(\tau_{k+1}) - b_{k+2} \cos(\tau_{k+2}))} \\
 &\quad - \frac{(r_{kx} - r_{(k+1)x})(b_{k+1} \sin(\tau_{k+1}) - b_{k+2} \sin(\tau_{k+2}))}{(r_{(k+1)x} - r_{(k+2)x})(b_k \cos(\tau_k) - b_{k+1} \cos(\tau_{k+1}))} \quad (14)
 \end{aligned}$$

$\tan(\gamma)$ 의 (f-2)개의 방정식의 우변의 평균을 취함으로써 γ 는 얻어진다. ϕ 는 (13)과 같은 방법으로 구하여 진다. 결국, slant 각도들과 tilt 각도들은 (10), (11), 그리고 (12)에 의해서 구하여 진다.

이 해석방법에서 하나의 중요한 점은 그 제안된 방법은 closed-form의 해를 제공할 뿐만 아니라 노이즈에 강인하여 정확한 결과를 얻어 낼 수 있다.

IV. 실험 결과

우리가 제안하는 방법은 Jerry's Taurus Studio's database에 기초하여 실험될 것이다. 두 개의 다른 방법들이 비교를 위해서 함께 수행되었다. 그 첫 번째는 미분가능 제한조건을 이용하여 회전행렬을 푸는 방법이다. 두 번째 방법은 [2]에서 제안된 방법으로 [6]의 absolute orientation problem을 사용함으로써 3개의 아는 광원방향의 가정 하에서 회전행렬을 푸는 방법이다. 본 논문에서는 편의를 위해 첫 번째 방법과 두 번째 방법을 각각 IC와 Hideki-Horn 방법이라고 명명한다. 실험을 다음 3단계로 진행되었다.

- i) 같은 slant 각도들의 아는 광원들 하에서 얻어진 데이터베이스로부터의 이미지들이 albedo 데이터들을 찾기 위해서 사용되었다.
- ii) 대상의 찾아진 albedo들은 회전행렬에 대한 선형변환을 찾아내기 위해서 사용되었다.
- iii) 세 개의 아는 광원방향에 대한 가정 하에서 Hideki-Horn, IC, 그리고 우리의 방법에 의해서 회전행렬을 찾아질 것이다.

그 실험에서 데이터베이스로부터의 세 개의 대상(wpd1, wps1, bn1)이 다루어졌다 (Fig. 4). 그 대상들은 확실히 다른 표면 특징들을 가지고 있음을 볼 수 있다. 각 대상에 대한 12개의 이미지들은 0에서부터 3300단계로 균일하게 구분된 tilt 각도와 450에서부터 750으로 구분된 slant 각도들을 가지고 있다. 그 수치 450은 평범한 조건을 나타내기 위해 적절한 반면 750은 많은 그들이 있을때의 조건을 나타낸다 (큰 slant 각도).

확실히, [11]에서 제시된, 강도 이미지 데이터 행렬의 SVD내의 처음 몇 개 고유값들은 대상 표면의 Lambertian 반사율을 나타낸다는 중요한 결론은

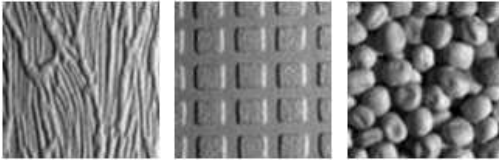


그림 4. Jerry's Taurus Studio로부터 조사된 세 개의 대상들 (wpd1, wps1, bn1)

Fig. 4 Three objects investigated from Jerry's Taurus Studio (wpd1, wps1, bn1)

표 1. 대상 wpd1에 대한 slant 각도들의 평균
Table 1. Average of slant angles of wpd1 object

slant 각들의 평균	slant 각 45°인 2가지 경우	
	6개 광원	12개 광원
데이터	45°	45°
IC	45.1044°	45.1002°
Hideki-Horn	45.8888°	45.3921°
Proposed	45.0158°	45.2277°

언급되어야 한다. 따라서 이미지 강도 데이터 행렬을 그들의 고유벡터 공간으로 투영시키는 사전처리 단계는 앞에서 언급된 단계들이 수행되기 전에 필수적으로 적용되어야 한다.

세 가지의 평가는 여기에 요약된다.

- i) 그 제안된 방법의 평균 특성의 효율성은 대상 wpd1에 대해서 6개의 광원(slant 각은 45, and tilt 각들은 00, 600, 1200, 1800, 2400, 3000)와 12개의 광원(slant 각은 450, tilt 각들은 00, 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2100, 2400, 2700, 3000, 3300)와 함께 평가된다. 그 결과는 표 1과 그림 5에 나타내었다.
- ii) 단일 slant 각도들의 원안의 균일 분포의 영향은 같은 slant 각도 450의 tilt 각들 00, 600, 1200, 1800, 2400, 3000과 00, 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800의 두 가지 경우에 대해서 조사된다. 그 두 가지 경우는 각각 대상 wpd1에 대하여 균일, 혹은 비균일한 분포를 나타낸다. 그 결과는 표 2와 그림 6에 나타내었다.
- iii) 그림자에 대하여 제안된 방법의 강인성은 대상 wps1과 bn1에 대해서 slant 각들 450과 750, 그리고 tilt 각들 00, 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2100, 2400, 2700, 3000, 3300가 적용되었을 때의 결과를 통해서 평가된다. 그 결과는 표 3-4와 그림 7-8에 나타내었다.

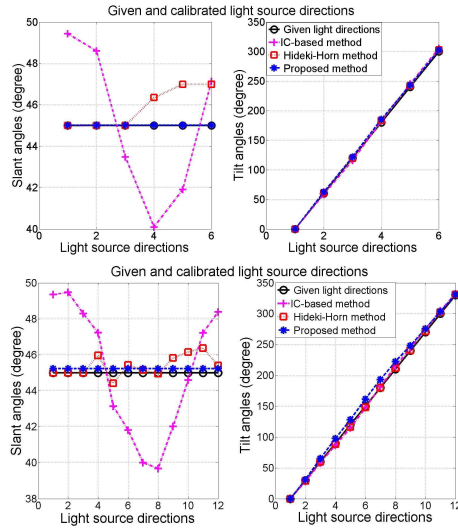


그림 5. 대상 wpd1에서 6개, 12개 광원에 대한 tilt 각도와 slant 각도 결과

Fig. 5. The tilt and slant angles for 6 and 12 light sources of object wpd1

표 2. 대상 wpd1에 대한 slant 각도들의 평균
Table 2. Average of slant angles of wpd1 object

slant 각들의 평균	slant 각 45°이고 균일, 비균일 분포를 가진 6개 광원인 경우	
	균일 분포	비균일 분포
데이터	45°	45°
IC	45.1044°	45.1102°
Hideki-Horn	45.8888°	44.7925°
Proposed	45.0158°	47.2475°

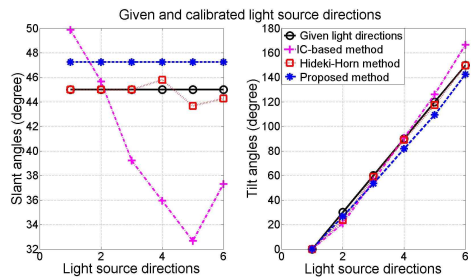


그림 6. 대상 wpd1에서 비균일 분포를 가진 경우 tilt와 slant 각도 (균일분포는 그림 5)

Fig. 6. The tilt and slant angles for wpd1 for not uniform distribution case (the uniform can is in Fig. 5)

표 3. 대상 wps1에 대한 slant 각도들의 평균
Table 3. Average of slant angles of wps1 object

slant 각들의 평균	slant 각 45°와 75°의 두 경우	
	slant 각: 45°	slant 각: 75°
데이터	45°	75°
IC	45.0580°	75.0789°
Hideki-Horn	43.2019°	73.8687°
Proposed	45.0092°	75.0151°

표 4. 대상 bn1에 대한 slant 각도들의 평균
Table 4. Average of slant angles of bn1 object

slant 각들의 평균	slant 각 45°와 75°의 두 경우	
	slant 각: 45°	slant 각: 75°
데이터	45°	75°
IC	45.4561°	75.0522°
Hideki-Horn	46.7733°	87.9243°
Proposed	45.0117°	74.9429°

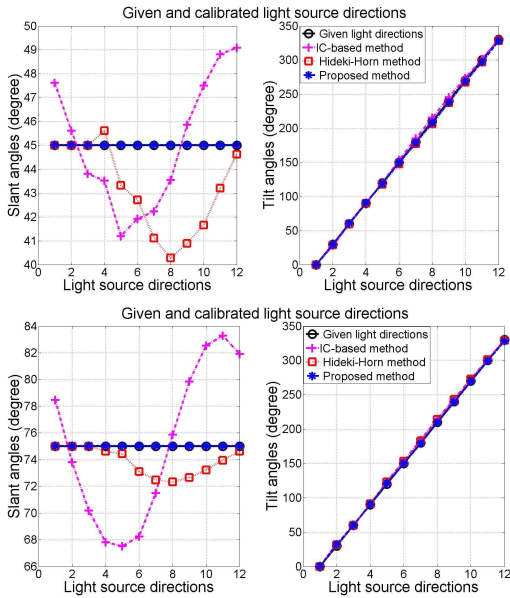


그림 7. 대상 wps1에서 tilt와 slant 각도 결과 (slant 각도는 45o와 75o)

Fig. 7. The tilt and slant angles for object wps1 (slant angles are 45o and 75o)

주어진 데이터의 Tilt와 slant 각도들, 그리고 IC, Hideki-Horn, and 본 논문에서 제안된 방법에 의해서 계산된 결과들은 절대값으로 변환하여 그림에서 그려질 것이다. slant 각에 대하여, 공정한 비교를 위해서, slant 각들이 균일하다는 제한조건들이 다른 논문에서는 적용되지 않기 때문에 평균값이 계산 될 것이다.

그림 5로부터, 만약 광원이 균일 분포되어 있다면, 그 결과는 오직 6개 광원의 경우에서만 정확하다. 하지만, 비균일분포에 대해서는 그 보정결과는 상당히 균일한 경우에 비해 좋지 않음을 볼 수 있다. 따라서 비균일 분포를 가지는 경우에 정확한 결과를 얻기 위해서는 많은 량의 광원이 필요하다.

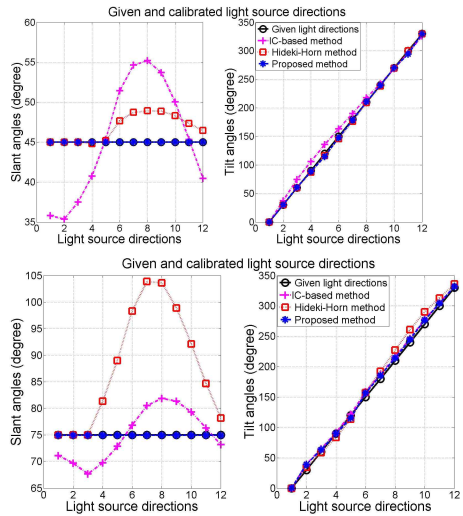


그림 8. 대상 bn1에서 tilt와 slant 각도 결과 (slant 각도는 45o와 75o)

Fig. 8. The tilt and slant angles for object bn1 (slant angles are 45o and 75o)

확실히 본 논문에서 제안된 방법은 다른 방법들에 비해서 더 정확하다. 그 이유는 우리의 방법은 slant 각도들이 광원방향이 같다는 제한조건을 사용하기 때문이다. 비교를 갈게 하기 위해서, slant 각도들의 평균값은 계산되었다. 심지어 평균값에 있어서도 제안된 방법은 여전히 모든 경우에 있어서 더 정확한 결과를 보인다. 게다가, 우리의 방법은 그림자에 대해서도 강인하다. 대상 bn1의 경우, 이미지에 확연한 그림자가 존재한다. Hideki-Horn method 방법의 경우는 slant 각도의 오차가 크게 나타나는 반면, 제안된 방법은 정확한 결과를 보인다. IC 방법의 경우, 평균값의 결과는 비교적 좋게 나타나지만, 여전히 각 광원의 대한 결과는 정확하지 못하다. 게다가 IC는 closed-form의 해를 제공해주지 못한다. 따라서 제안된 방법은 다른 방법들

에 비해서 더 정확하고 강인한 방법이라 할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서 실제적으로 적용될 수 있는 광원방향 제한조건 적용에 대한 연구가 진행되었다. 그 제한조건이 적어도 알고 있는 6개의 표면 패치에 대한 추가적인 제한조건과 함께 사용될 때, 그 해는 유일한 보정결과를 제공한다. 절대값의 결정에 따라서 tilt 각들은 서로 일정한 거리를 유지한다. 본 연구에서 하나의 주목할 만한 결론은 다른 요소와 함께 z축에 대한 회전의 곱인 어떤 제한조건은 tilt 각도를 상대적인 값으로 해결한다는 것이다. 그 실험은 제안된 방법의 정확성과 강인성을 나타낸다. 이 방법은 스마트폰에 탑재될 고성능 카메라와 함께 3차원 이미지의 복원기술에 널리 사용될 수 있다.

제안된 광원에 대한 제한조건을 가지는 가능한 시스템은 다른 높이의 다양한 대상에 대한 표면검사 시스템이다. 보정 프로세스의 정확하고 간단한 계산 때문에 그 제한조건은 만약 적용된다면 그 표면검사 시스템의 생산성을 높일 수 있을 것이다. 게다가, 모든 표면에 있어서 오직 하나의 높이의 확인한 변화를 가지는 시스템에 대해서도, 그 방법은 역시 효율적으로 적용될 수 있다. 그 대상의 높이를 찾은 다음, 그 표면은 높이 레벨에 따라서 다른 지역으로 분류되어 진다. 보정은 각 지역별로 더 좋은 결과를 얻게 될 것이다. 이와 같이, 제안된 방법은 노이즈에 대한 강인성과 계산의 간단함을 함께 제공할 수 있기 때문에 스마트폰과 같은 모바일 디바이스에 쉽게 적용이 가능하다.

참고문헌

- [1] R.J. Woodham, "Photometric method for determining surface orientation from multiple images," *Optical Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp.139 - 144, 1980.
- [2] H. Hayakawa, "Photometric stereo under a light source with arbitrary motion," *Journal of Optical Society of America A*, Vol. 11, No. 11, pp.3079 - 3089, 1994.
- [3] P. Belhumeur, D. Kriegman, A. Yuille, "The bas-relief ambiguity," *IJCV*, Vol. 35, No. 1, pp.33 - 44, 1999.
- [4] A. Yuille, D. Snow, "Shape and albedo from multiple images using integrability," *Proceedings on IEEE Conference of Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.158 - 164, 1997.
- [5] A. Yuille, D. Snow, R. Epstein, P. Belhumeur, "Determining generative models of objects under varying illumination: Shape and albedo from multiple images using SVD and integrability," *International Journal of Computer Vision*, Vol. 35, No. 3, pp.203-222, 1999.
- [6] B.K.P. Horn. "Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions," *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 4, pp.629-642, 1987.
- [7] N. Alldrin, S.P. Mallick, D.J. Kriegman, "Resolving the generalized bas-relief ambiguity by entropy minimization," *Proceedings on IEEE Conference of Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.1 - 7, 2007.
- [8] O. Drbohlav, R. Sara, "Specularities reduce ambiguity of uncalibrated photometric stereo," *Proceedings on ECCV*, pp.46-62, 2002.
- [9] M. Chandraker, F. Kahl, D. Kriegman, "Reflections on the Generalized Bas-Relief Ambiguity," *Proceedings on CVPR*, 2005.
- [10] Jerry's Taurus Studio Photometric Stereo Database, <http://www.taurusstudio.net/index.htm>
- [11] R. Epstein, P.W. Hallinan, A. Yuille, "±2 Eigenimages Suffice: An Empirical Investigation of Low-Dimensional Lighting Models," *Proceedings on IEEE Workshop of Physics-Based Modeling in Computer Vision*, pp.108-116, 1995.

저 자 소 개

정 성 철



2008년 부산대학교 전자
전기컴퓨터공학부 학사.
현재, POSTECH 전자전
기공학과 석박사통합과정.

관심분야: 임베디드 시스템 제어, 비선형 시스템
제어.

Email: somunza@postech.org

Nguyen Viet Hung



2007년 Hanoi Universi
ty of Technology 학사
2012년 POSTECH 철강
대학원 석사.

관심분야: 비전 시스템, 철강 시스템 제어.

Email: hungnv@postech.ac.kr

원 상 철



1974년 서울대 전자전기
공학과 학사.
1976년 서울대 전자전기
공학과 석사.
1985년 University of
Iowa 전자전기공학과 박
사.

현재, POSTECH 전자전기공학과 교수,
POSTECH 철강대학원 교수.

관심분야: 제어 이론, 동적 시스템 모델링, 강
인제어.

Email: won@postech.ac.kr