

## 하늘빛 분포 추정을 이용한 야외 광도 스테레오

정지영<sup>0</sup>, 이준영, 권인소

KAIST 전기 및 전자공학과

{jyjung, jylee}@rcv.kaist.ac.kr, iskweon77@kaist.ac.kr

### 요 약

우리는 본 논문에서 정지한 카메라로 하루 동안 야외 풍경을 찍은 사진을 이용한 야외 광도 스테레오 방법을 소개한다. 사진이 찍힌 정확한 시간과 장소(GPS) 정보를 통하여 천구의 빛 분포를 추정하고, 이를 태양광과 나머지 하늘빛으로 나누어 태양광은 가우시안 분포로, 나머지 하늘빛은 이차분포로 가정하여 매개 변수로 표현한다. 기존의 야외 광도 스테레오 관련 연구들은 야외 조명을 점 조명과 상수값의 주변광으로 모델링하는데 반해 제안하는 방법은 컴퓨터 그래픽스 분야에서 이미 검증된 하늘빛 모델을 이용하여 자연 조명으로 모델링한다. 장면을 복원하는 최적화 문제를 해결하는데 있어서 자연 조명이 제공하는 제한 조건이 더 풍부하기 때문에 기존의 방법들이 여러 개월 동안 촬영한 수백 장의 영상을 사용하는데 비하여 제안하는 방법은 단 하루 동안 촬영한 스무 장 이하의 영상을 이용하여 더 나은 복원 결과를 보인다.

### 1. 서론

사진에 촬영된 장면의 3 차원 복원은 컴퓨터 비전 분야에서 수십 년간 많은 연구자들이 연구해온 분야이다. 2 장 이상의 영상을 이용하여 촬영된 장면의 3 차원 정보를 복원하는 방법은 여러 가지가 있다. 다시점 스테레오는 서로 다른 시점에서 찍은 영상을 사용하고, 광도 스테레오는 같은 시점에서 서로 다른 방향의 빛을 받은 장면을 촬영한 영상을 사용한다. 시점과 조명의 조건이 같을지라도 서로 다른 초점거리로 촬영한 영상을 사용하여 3 차원 정보를 복원하는 depth from focus/ defocus 방법도 있으며 적절한 가정과 제한 조건이 충족되었을 때는 단 한장의 영상으로 3 차원을 복원할 수 있는 shape from shading 방법도 있다.

이 중 광도 측정 스테레오(photometric stereo)를 통하여 장면의 3 차원을 복원하려면 까다로운 실험 환경 조건을 만족시켜야 했다. 전통적인 광도 측정 스테레오는 단위구에서 비평면 조건을 만족하는 서로 다른 방향성을 가진 점 조명 아래서 찍은 3 장 이상의 영상을 필요로 한다. 야외 풍경 영상은 이런 조명 조건을 만족시키지 못하기 때문에 전통적인 광도 측정 스테레오 방법을 적용하기 어렵다. 야외 풍경의 조명은 사람이 임의로 조절하는 것이 불가능하며 하루 중 어떤 시각에 촬영하느냐에 따라, 혹은 날씨에 따라 같은 풍경이더라도 아주 다르게 보이기도 한다. 하지만 그렇다 하더라도 맑은 날 하루 중 어떤 시간에 촬영한 야외 풍경 영상에서 나타나

는 일반적인 모습이 있다. 예를 들어, 해가 뜬 직후나 해가 지기 직전의 풍경은 해가 중천에 떠 있을 때의 풍경보다 다소 어둡고, 어떤 부분이 해를 정면으로 받는 때에는 아주 밝지만 시간이 지나면 어두워진다. 야외의 조명은 일반적으로 태양과 하늘의 빛에 의해서 결정된다는 점이 작은 공간에서 다양한 조명으로 그 모습이 크게 달라질 수 있는 실내 환경에 비하여 광도 측정 스테레오의 조명 모델링에 유리함으로 작용할 수 있는 것이다.

우리는 본 논문에서 정지한 카메라로 하루 동안 촬영한 영상을 이용한 야외 광도 스테레오 방법을 소개한다. 제안한 방법은 야외 조명이 주로 태양과 맑은 하늘의 빛 분포로 구성되어 있으므로 이를 일반화하여 자연 조명으로 모델링 할 수 있다는 동기에 기반한다.

### 2. 하늘빛 분포 추정과 매개 변수화

하늘은 조명의 세기와 각 분포가 일사량에 따라 변하는 비균일 광역 조명원이다. 따라서 한낮의 야외 조명은 기존 연구의 점 조명과 상수값의 주변광의 합보다 훨씬 복잡하다. 그림 1(a)의 좌표와 같이 반구의 하늘 중 어느 한 부분의 상대밝기  $l$ 은 그 부분이 천정(zenith)과 이루는 각도  $\theta$ 와 태양과 이루는 각도  $\gamma$ 의 함수다.[4]

$$l = f(\theta, \gamma) = \left(1 + ae^{\frac{b}{\cos(\theta)}}\right) (1 + ce^{d\gamma} + e\cos^2(\gamma))$$

계수  $a, b, c, d, e$ 는 대기의 상태에 따라 결정된다.

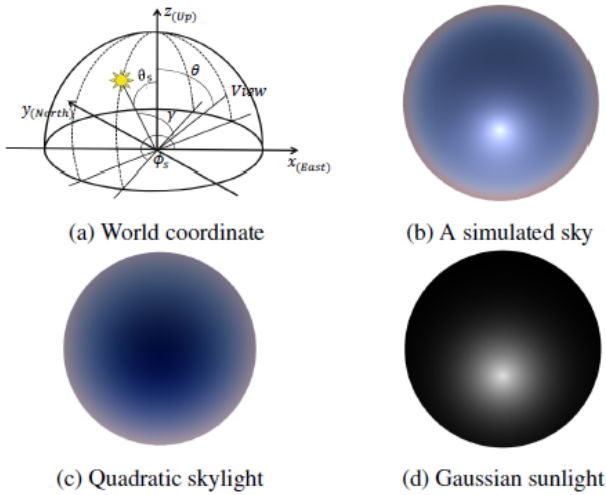


그림 1. 태양을 포함한 천구의 좌표와 추정된 하늘 영상, 그리고 이를 나누어 매개변수화한 하늘 빛 분포와 태양빛 분포.

Preetham *et al.*[5]이 제안한 하늘 모델은 이 다섯 개의 분포 계수를 하나의 매개 변수 흐림도(turbidity)  $T$ 에 대한 일차함수로 근사한다. 또한, 하늘 중 한 부분의 절대밝기  $Y$ 와 색도  $x, y$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$Y = \frac{f(\theta, \gamma)}{f(0, \theta_s)} Y_z, \quad x = \frac{f(\theta, \gamma)}{f(0, \theta_s)} x_z, \quad y = \frac{f(\theta, \gamma)}{f(0, \theta_s)} y_z$$

$\theta_s$ 는 태양과 천정 간의 각도이며,  $x_z, y_z$ 는 천정의 색도로 이 또한 흐림도의 함수로 나타낸다. 예를 들어, CIE 기준 맑은 하늘을 추정하기 위한 계수들은 흐림도  $T = 2.2$ 로 근사 가능하다.

Kawakami *et al.*[3]은 위의 수식에 보여진 밝기의 비율에 대한 규칙이 천정 뿐 아니라 하늘의 어떤 부분과도 적용됨을 제안한다. 또한, 카메라 감마 함수가 선형일 때, 추정된 하늘 영상 속의 임의의 두 픽셀 값의 비율은 해당 부분의 하늘의 밝기의 비율과 같음을 보인다. 이는 과장에 따른 카메라 센서 감도와 화이트 밸런스과 무관하다.

$$\frac{f(\theta, \gamma)}{f(\theta_{ref}, \gamma_{ref})} = \frac{Y}{Y_{ref}} = \frac{J}{J_{ref}}$$

$J$ 는 추정된 하늘 영상 속 한 픽셀의 세 채널 값의 합계이다.

따라서 0에서 1 사이의 값을 가지는 하늘 영상을 추정하기 위해서는 가장 밝은 픽셀(주로 태양의 중심)의 세 채널 값의 합계가 3이 되도록 전체 영상의 밝기를 조정한다.

그림 1(b)는 주어진 시간과 장소에 따른 맑은 하늘을 추정한 하늘 영상의 예시이다. 우리는 풍경 속에서 그늘진 부분과 그렇지 않은 부분을 구분하여 모델링하기 위해 이 하늘 영상을 분산된 하늘빛과 태양빛으로 나누어 각각 이차 분포(그림 1(c))와 가우시안 분포(그림 1(d))로 모델링한다.

### 3. 영상 형성 모델

픽셀  $x$ 의 값  $I(x)$ 는 표면 방향 벡터  $n_x$ 에 따라 결정된다. 표면 방향 벡터는 입사하는 모든 빛의 방향의 합인 반구를 결정하며 입사한 모든 빛은 표면의 재질에 따라 통합되어 반사된다. 이 반사광과 영상의 픽셀 값이 선형적 관계를 가진다고 가정할 때 영상 형성 모델은 다음과 같다.

$$R(n_x, L) = \int L(\omega_i) \max(0, n_x \cdot \omega_i) d\omega_i$$

$$I(x) = I_{sky}(x) + S(x)I_{sun}(x)$$

$$I_c(x) = \rho_c(x) (R(n_x, L_{sky}) + S(x)R(n_x, L_{sun}))$$

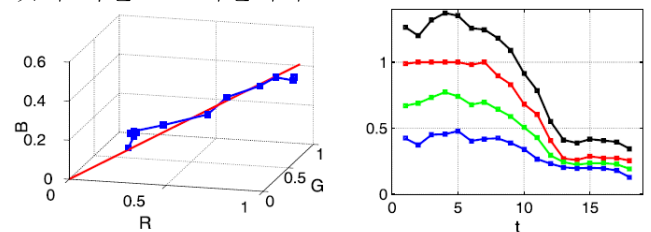
$\omega_i$ 는 입사광의 입사각이고  $S(x)$ 는 픽셀  $x$ 가 그늘에 있는지 여부를 나타낸다.  $c$ 는 RGB 컬러 채널 중 하나이며  $\rho_c$ 는 각 컬러 채널 별 반사율(albedo)이다.

### 4. 반사율(albedo)과 표면 방향 추정

하늘빛과 태양빛 분포로 이루어진 자연 조명을 이용하여 야외 광도 스테레오를 수행한다. 우선, 그늘진 픽셀과 그렇지 않은 픽셀을 구분하고, 각 픽셀당 RGB 값 간의 비율을 계산하여 상대 반사율을 추정한다. 단위구의 표면에서 균등하게 단위 벡터를 샘플링하여 각 단위 벡터를 영상 형성 모델에 적용, 샘플 프로파일을 구하여 이를 실제 픽셀 프로파일과 비교한다. 샘플 프로파일 중 실제 픽셀 프로파일과 가장 큰 상관 계수를 가지는 샘플 벡터를 해당 픽셀의 표면 방향 벡터로 추정한다. 마지막으로, 추정된 표면 방향 벡터로 절대 반사율을 추정한다.

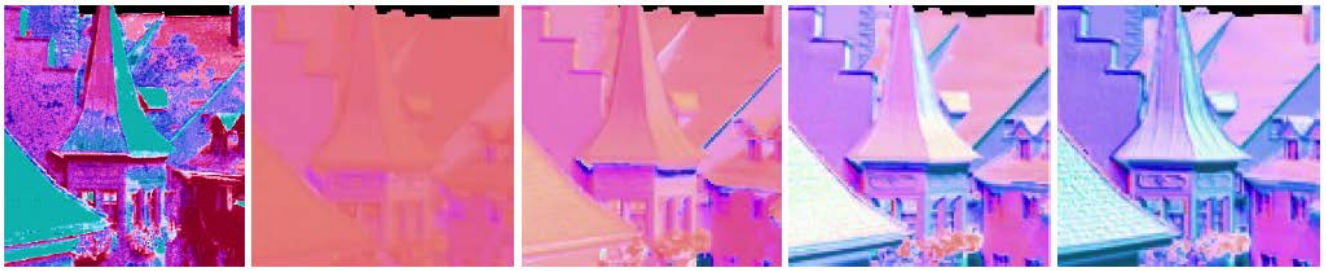
그늘진 픽셀과 그렇지 않은 픽셀의 구분은 기존의 그림자 감지 방법[2]을 사용한다. 각 영상당 픽셀  $x$ 의 그림자 여부  $S(x)$ 는 해당 픽셀이 그늘에 있을 때 0, 그렇지 않을 때 1이다.

광도 스테레오를 위한 영상  $m$ 장에서 같은 픽셀 위치에 해당하는 RGB 컬러 값의 행렬( $3 \times m$ )을 컬러 프로파일이라 한다. 선형 카메라를 가정하면 이 컬러비로써 곧 상대 반사율( $\rho_r: \rho_g: \rho_b$ )을 추정할 수 있다. 컬러 프로파일을 특이값 분해(SVD)하여 첫 번째 고유벡터를 상대 반사율로 추정한다. 이는 3차원 컬러 공간에 컬러 프로파일에 해당하는  $m$ 개의 점을 원점을 지나는 직선으로 근사한 것과 같은데, 각 컬러 프로파일을 이 상대 반사율 직선에 투사한 것이 픽셀 프로파일이다.



(a) Initial albedo estimation (b) Pixel profile generation

그림 2. 상대반사율 추정과 픽셀 프로파일 생성



(a) Ours, 1 day

(b) [1], 1 month

(c) [1], 1.5 months

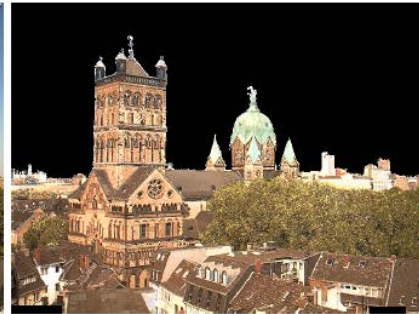
(d) [1], 2 months

(e) [1], 4 months

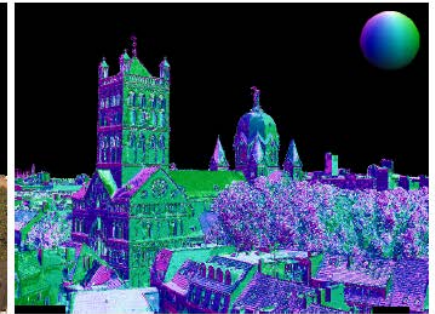
그림 3. 하루의 영상 18 장을 이용한 제안하는 방법(a)과 수 개월의 영상 수백 장을 이용한 기존의 방법[1] 결과 비교



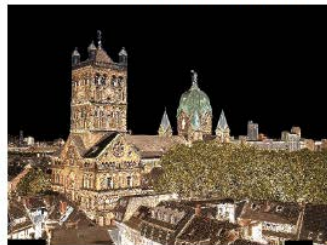
(a) Input (Düsseldorf dataset)



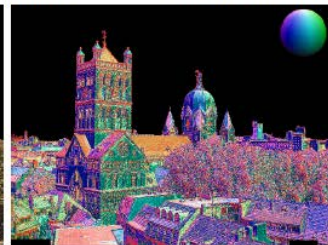
(b) Albedo estimation (Ours, 1 day)



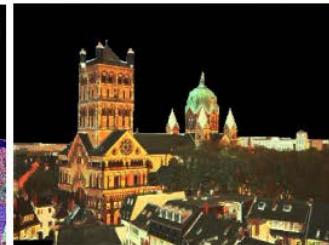
(c) Normal estimation (Ours, 1 day)



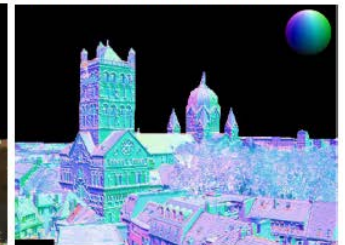
(d) Albedo est. ([2], 1 day)



(e) Normal est. ([2], 1 day)



(f) Albedo est. ([1], 4 months)



(g) Normal est. ([1], 4 months)

그림 4. 하루 동안의 영상 18 장(a)을 이용하여 제안하는 방법으로 반사율(b) 및 표면 방향 추정 결과(c)와 같은 입력 영상으로 비교한 기존의 방법[2]의 결과(d,e) 및 4 개월의 영상 수 백장을 이용한 기존의 방법[1]의 결과(f,g) 비교.

백 장의 영상을 이용한 기존의 방법들보다 더 좋거나 비슷한 결과를 도출함을 보였다.

## 5. 실험 결과

제안한 방법을 AMOS 웹캠 데이터셋[6]에 적용하였다. 수 개월 동안 촬영된 영상 중 맑은 날 하루를 골라 30 분 간격으로 촬영된 영상 18 장을 수동으로 선택하였다. 그림 3 은 제안하는 방법과 기존의 야외 광도 스테레오 방법[1]을 비교한 결과이다. 기존의 방법은 두 달 정도의 영상을 이용하여야만 복원 결과가 나오기 시작함을 확인할 수 있다. 그림 4 는 제안한 방법과 같은 입력 영상을 쓴 기존의 또 다른 방법[2] 결과와 4 개월 동안의 영상 수 백장을 사용한 기존의 방법[1] 결과를 비교하였다.

## 6. 결론

우리는 본 논문에서 하늘빛 분포 추정을 이용하는 야외 광도 스테레오 방법을 제안하였다. 기존의 방법과는 다르게 야외 조명 환경을 자연 조명으로 모델링하여 장면의 반사율 및 표면 방향을 추정할 때 더 많은 제약 조건이 제공되었다. 따라서 훨씬 적은 양의 영상을 이용한 제안된 방법의 결과가 수

## 감사의 글

본 연구는 2014 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0028680).

## 참고문헌

- [1] A.Abrams, C.Hawley, R.Pless, "Heliometric stereo: shape from sun position," ECCV 2012.
- [2] A.Abrams, K.Miskell, R.Pless, "The episolar constraint: Monocular shape from shadow correspondence," CVPR 2013.
- [3] R.Kawakami, H.Zhao, R.T.Tan, K.Ikeuchi, "Camera spectral sensitivity and white balance estimation from sky images," IJCV 105(3):187-204, 2013.
- [4] R.Perez, R.Seals, J.Michalsky, "All-weather model for sky luminance distribution-preliminary configuration and validation," Comm. of ACM, 50(3):235-245, 1993.
- [5] A.J.Preetham, P.Shirley, B.Smits, "A practical analytic model for daylight," ACM SIGGRAPH 1999.
- [6] AMOS. <http://amos.cse.wustl.edu/>