

일반논문-08-13-3-06

가상 복사조도 반구와 반사계수에 근거한 얼굴 재조명

한 희 철^{a),b)}, 손 광 훈^{a)‡}

Face Relighting Based on Virtual Irradiance Sphere and Reflection Coefficients

Hee Chul Han^{a),b)}, and Kwang Hoon Sohn^{a)‡}

요 약

본 논문에서는 임의의 알려지지 않은 조명 상황 하에서 3차원 객체의 텍스처 영상 한 장을 이용하여 광원의 위치를 추정하고 이를 이용해 조명에 의해 왜곡되어 있는 얼굴 영상을 재조명하는 기법을 제안한다. 우선 주어진 텍스처 영상으로부터 광원의 위치를 추정하기 위해 법선 벡터와 가중 양선형 보간을 이용하여 가상 복사조도 반구를 만들었다. 이를 이용해 추정된 주변광과 확산광 계수로 재조명 방정식을 도출하였다. 얼굴 텍스처 영상에서의 그림자와 음영을 원색으로 복원하는 알고리즘의 효율성과 정확성을 보이기 위해 광원의 위치 추정, 재조명, 얼굴 인식 등의 다양한 실험 결과를 보였다. 실험결과에 의하여 제안한 알고리즘은 조명에 강인한 얼굴 인식 시스템뿐만 아니라 3차원 디스플레이에서의 작업 시 시각적 피로감을 줄이고 작업 효율을 높일 수 있음을 확인하였다.

Abstract

We present a novel method to estimate the light source direction and relight a face texture image of a single 3D model under arbitrary unknown illumination conditions. We create a virtual irradiance sphere to detect the light source direction from a given illuminated texture image using both normal vector mapping and weighted bilinear interpolation. We then induce a relighting equation with estimated ambient and diffuse coefficients. We provide the result of a series of experiments on light source estimation, relighting and face recognition to show the efficiency and accuracy of the proposed method in restoring the shading and shadows areas of a face texture image. Our approach for face relighting can be used for not only illuminant invariant face recognition applications but also reducing visual load and improving visual performance in tasks using 3D displays.

Keywords : image restoration , relighting, face recognition

1. 서 론

얼굴 인식 시스템에 있어 조명의 밝기뿐만 아니라 광

원의 위치에 따라서 얼굴 영상 정보가 손실 또는 왜곡되기 쉽다. 이러한 임의의 조명 상황에 따른 얼굴 인식 문제를 해결하기 위해 illumination cones^[1], spherical harmonics^[2, 3], 3D object geometry^[4] 같은 방법들이 기존에 제안되어졌다. 그러나 이러한 방법들은 각각의 사람에 대해 여러 장의 미리 훈련된 영상 데이터베이스를 구축하거나 3차원 객체의 데이터베이스가 미리 구축되어야 한다. 즉 운전면허증의 사진이나, 여권 사진, 주민등록증 사진같이 한 장의

a) 연세대학교 전기전자공학과

School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University

b) 삼성전자 디지털미디어연구소

Digital Media R&D Center, Samsung Electronics

‡ 교신저자 : 손광훈(khsohn@yonsei.ac.kr)

* 본 연구는 한국과학재단 지정 생체인식연구센터의 지원을 받아 이루어졌습니다.

영상을 담고 있는 현재의 영상 데이터베이스를 그대로 이용하기가 힘들다.

본 논문에서는 이러한 기존의 영상 데이터베이스를 그대로 이용하면서 조명에 강인한 얼굴 인식을 위해 3차원 거리 스캐너(3D Range Scanner)를 통해 얻어진 얼굴 텍스처 영상을 재조명하고자 한다. 얼굴의 재조명 기술은 선행 연구자들에 의해 여러 방법들이 제시되었다. Wen^[5]은 최소자승법에 의해 9개의 harmonic 계수를 추정한 후 이를 이용하여 radiance environment map을 획득한 후 영상을 역렌더링하였다. 그러나 원하는 재조명 효과를 얻기 위해서 각각의 광원의 색깔과 광량을 harmonic 계수와 연결시키는 것이 어려운 문제였다. Lee^[6]는 2차원 얼굴 영상에 맞게끔 변형 가능한 3차원 얼굴 객체를 수정하는 방법을 이용하여 이중선형 조명 모델을 소개하였다. 임의의 조명 상황과 얼굴의 복잡한 반사계수를 추정하여 얼굴을 재조명하였는데 광량에 대한 정보가 없을 때에는 그림자와 음영을 재조명하지 못하는 단점이 있다.

본 논문에서는 가상 복사조도 반구를 이용하여 광원의 위치를 추정하고 이를 통해 반사계수를 정의한 후, 얼굴을 재조명하는 방법을 제안한다. 따라서 영상에서 광원을 추정하는 방법이 아주 중요하다. 광원 추정은 광원의 위치로 3차원 데이터를 얻어내는 Shape from shading이나 자연스러운 영상합성을 위한 증강 현실 같은 컴퓨터 비전 분야에서 활발한 연구가 진행되었다. Zhang^[7]은 표면의 법선벡터가 광원과 수직일 때 임계점과 단절곡선을 검출하여 광원의 위치를 검출하였다. Wang^[8]은 Zhang의 방법을 확장하여 임의의 물체에 대해서도 광원 추정을 시도하였다. Okabe^[9]는 음영 부분을 복원하기 위해 Haar wavelets에 spherical harmonics를 적용하였다. Bouganis^[10]는 Zhang과 Yang^[11]이 제안한 방법의 정확성을 증대시켰다. Kenji^[12]는 여러 개의 광원과 물체의 3차원 정보를 이용하여 조명과 반사요소 등을 추정하였다.

이러한 광원 추정 방법들은 대부분 다음을 가정하고 있다.^[13]

- 물체의 3차원 기하 정보는 알려져 있다.
- 그림자는 확일한 광선반사율(albedo)과 완전 확산면

(Lambertian surface)에 존재한다.

- 광원은 멀리 떨어져 있다.
- 표면 간에 난반사는 없다.
- 텍스처 영상의 구조는 간단하다.

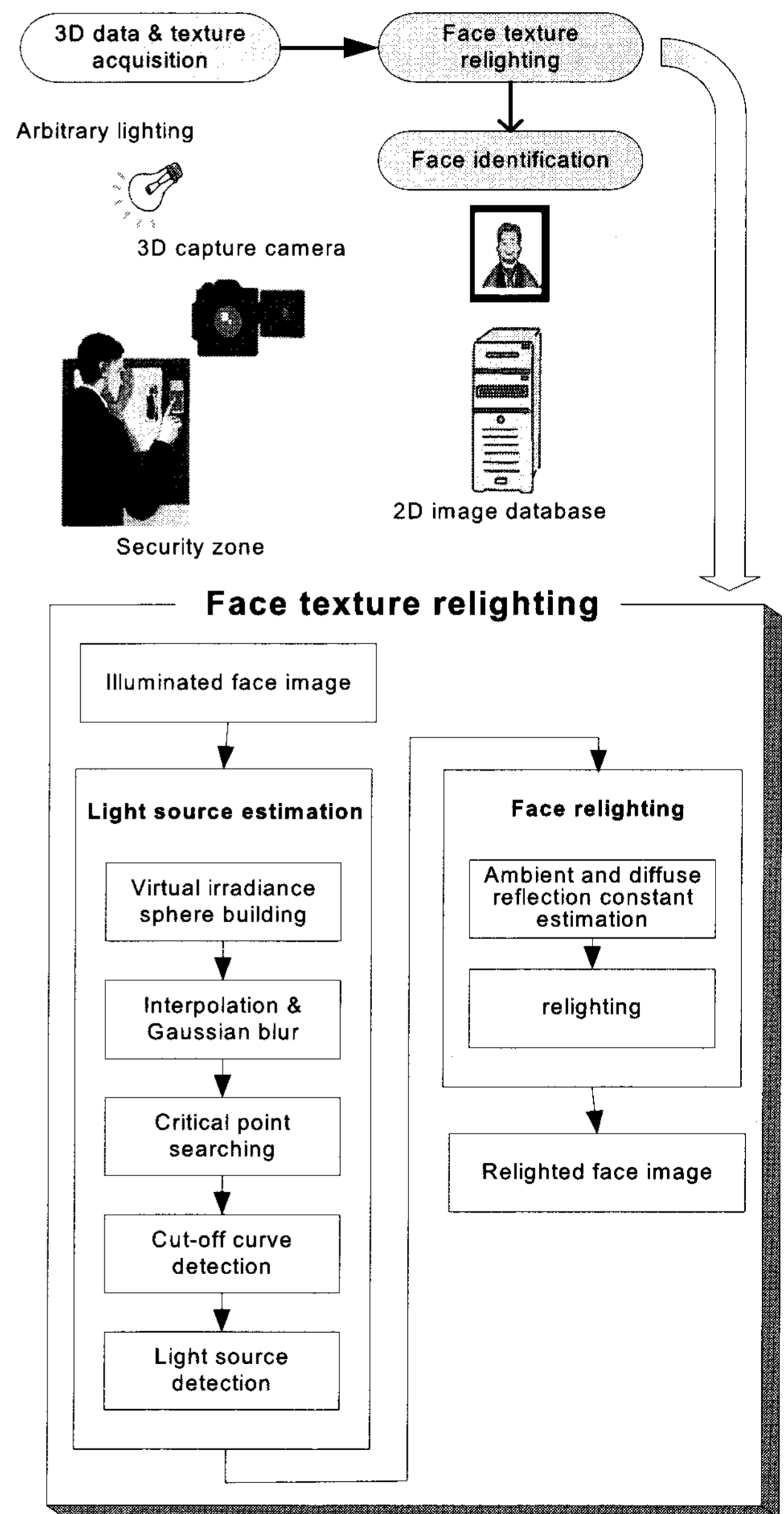


그림 1. 제안된 얼굴 인식 시스템의 전반적인 구성
Fig. 1. Overall configuration of the face identification system

본 논문에서는 다소 복잡한 텍스처를 사용한다는 점 이외에는 광원 추정을 위하여 위에서 제시된 가정과 동일한 가정을 설정하고 있다. 얼굴의 텍스처 영상은 눈썹, 입술, 눈 등이 서로 다른 색상과 모양을 가지고 있기 때문에 복잡하다고 말할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 복잡성을 극복하기 위하여 가상 복사조도 반구를 제안한다.

본 논문은 입사 조명의 교정이나 사전 설정 없이 3차원 객체의 기하 정보와 한 장의 얼굴 텍스처 영상을 이용하여 조명에 의해 왜곡된 영상을 조명의 영향이 없는 원래의 영상으로 복원하는 것을 목적으로 한다. 제안된 방법은 물체에 대한 빛의 반사를 역추적 하여 영상을 직접 복원하므로 왜곡된 얼굴 영상에 존재하는 그림자와 음영을 제거하는데 효과적이다.

제안된 알고리즘은 크게 광원 추정과 얼굴 재조명의 두 부분으로 나눌 수 있다. 먼저 가상 복사조도 반구 상에 존재하는 임계점(critical point)과 단절곡선(cutoff curve)을 이용하여 광원을 추정한다. 가상 복사조도 반구는 3차원 단위 반구와 3차원 얼굴의 법선벡터 그리고 3차원 얼굴상의 텍스처 정보로 생성된다. 추정된 광원을 이용하여 반사계수를 예측한 후, 원 영상의 밝기, 3차원 상의 대칭점의 밝기로서 얼굴 재조명 방정식을 만들어낸다.

본 논문에서 기여하는 바는 다음과 같다. 보다 정교한 광원 추정을 위하여 가중 양선형 보간법(weighted bilinear interpolation)과 가우시안 블러(Gaussian blur)를 이용하여 3차원 얼굴 객체의 기하정보로 가상 복사조도 반구를 생성한다. 또한 얼굴 재조명 방정식을 생성하는데 필수적인 반사 계수들을 결정하는 방법을 제안하며, 그 얼굴 재조명 방정식을 이용하여 조명에 의해 왜곡된 얼굴상의 그림자와 음영부분을 재조명하는 방법을 제안한다.

2장에서는 가상 복사조도 반구를 이용한 광원 추정 방법을 설명하고, 3장에서는 추정된 광원을 이용하여 3차원 얼굴 객체를 재조명하는 방법에 대해서 설명한다. 4장에서는 다양한 실험을 통하여 제안된 알고리즘을 정성적, 정량적 방법으로 검증하고, 5장에서 남겨진 문제점을 이야기하며 결론을 맺는다.

II. 광원 추정

1. 가상 복사조도 반구

Wang^[8]은 물체의 기하 정보가 있을 때 임의의 물체에도 적용할 수 있도록 Yang^[11]의 음영기반 광원 추정 알고리즘을 확장시켰다. 물체의 법선벡터와 단위반구의 가장 근접한 법선벡터를 연결시킴으로써 식 (1)에 의해 물체에 입사된 모든 광선량을 광원의 방향을 알 수 있는 새로운 가상 복사조도 반구로 변환시켰다.

$$I = pf(N \cdot L), \tag{1}$$

영상의 한 점의 밝기 I 는 법선벡터 N , 광원의 방향 L , 광원의 강도 f , 물체 표면의 반사계수 p (0과 1사이의 상수)로 나타낼 수 있다.

Wang은 좀 더 다양한 형태의 객체와 복잡한 텍스처에서의 광원 추정을 위해, 물체의 표면을 서로 다른 광원이 영향을 끼치는 영역에 따라 가상적으로 분할한 후 각 영역에서 실제 광원을 찾아가는 virtual light patch를 제안하였다. 하지만 Wang이 제안한 방법은 재조명 되어야 할 개체가 서로 다른 방향으로의 법선 벡터를 충분히 확보해야 하고 단순한 형태의 텍스처를 가지고 있어야만 하므로 Wang은 화병을 대상으로만 그 실험을 수행하였다. 본 논문에서는 제안된 가상 복사 조도를 이용하여 조금 더 복잡한 형태의 텍스처와 불충분한 법선벡터를 가진 객체를 대상으로 광원을 추정한다.

3차원 구상의 한 점의 z 좌표점은 2차원 원상의 x, y 좌표점과 반지름 r 로 나타내어진다. 여기서 $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ 이다.

$$z = \sqrt{r^2 - (x^2 + y^2)}, \tag{2}$$

먼저 식 (2)에 따라 그림 2의 (b)와 같은 2차원 원을 이용하여 (c)와 같은 3차원의 단위 구를 생성한 후 (a)와 같은

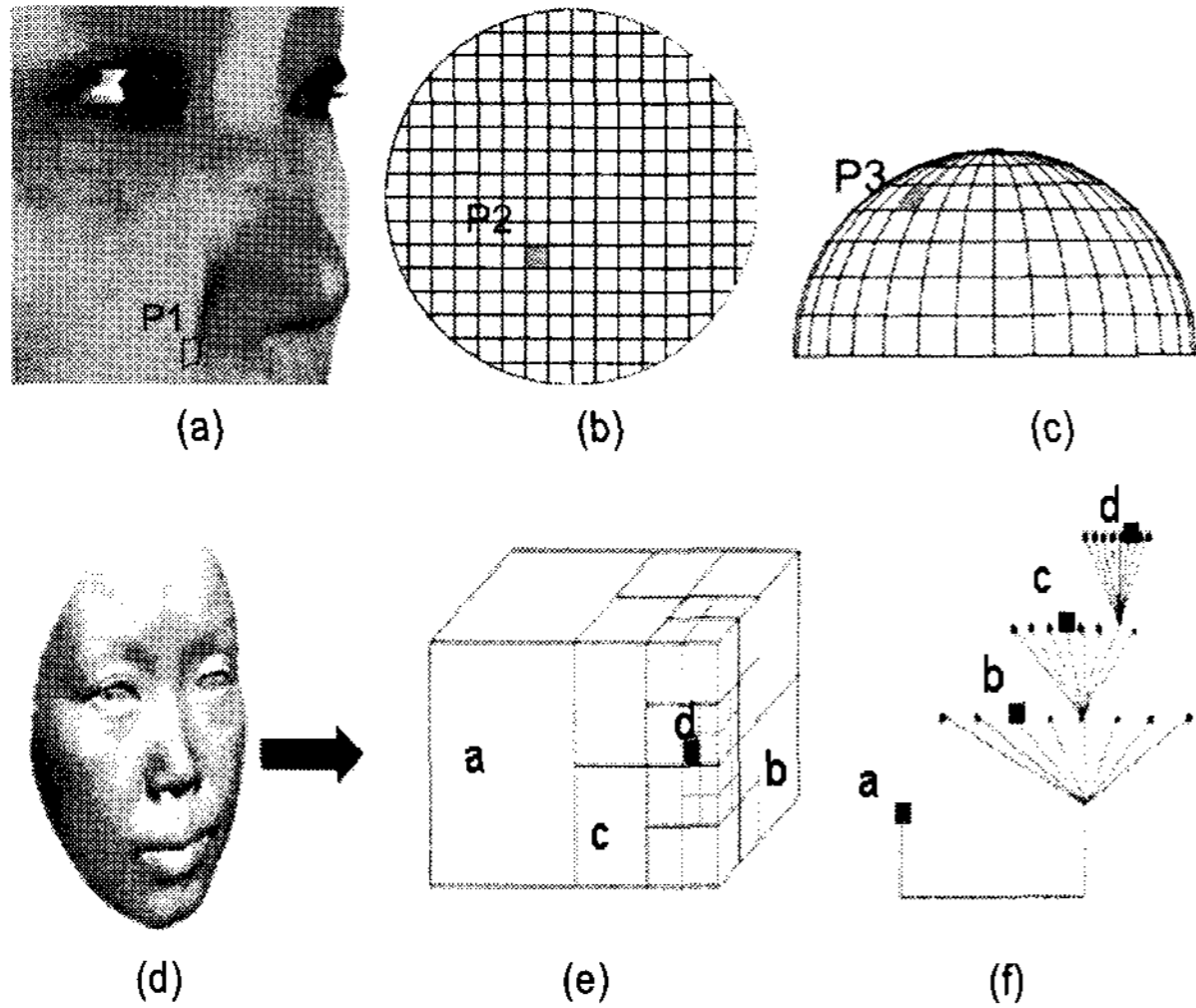


그림 2. 3차원 단위구와 3차원 얼굴 객체의 각 점의 연결 (a)3차원 객체 (b) 2차원 원 (c) 단위 3차원 구 (d)3차원 입력영상 (e) 3차원 구를 이용한 Kd-tree의 작성 (f)Kd-tree의 결과
 Fig. 2. Mapping points within a 3D face model to points in a 3D unit sphere (a) 3D object (b) 2D circle (c) unit 3D sphere (d) 3d vertex data (e) Building Kd-tree with 3D sphere (f) Result of Kd-tree

3차원 얼굴 객체의 정점의 법선벡터와 가장 인접한 3차원 단위 구의 법선벡터를 찾아서 연결 지어 둔다. 3차원 얼굴 객체상의 모든 정점들을 3차원 단위 구로 연결시키는 것은 엄청난 데이터양 때문에 시간이 많이 걸리는 작업이다. 따라서 본 논문에서는 임의의 다차원 상에서 가장 인접하다고 추정되는 값을 찾아내는 K-dimensional tree(Kd-tree)^[14]에 근거한 추정 최단 인접 검색 (approximate nearest neighbor, ANN)^[15,16] 방법을 사용한다. Kd-tree는 다차원 상에 각 점을 표현하기 위해 입력된 자료들을 공간 분할한다. 먼저 3차원 단위 구상의 각 점의 법선벡터로 Kd-tree를 생성한 후 3차원 얼굴 객체의 각 정점의 법선벡터와 가장 인접한 점을 찾아서 연결한다. 그림 2의 (a)에 있는 3차원 얼굴 객체상의 정점 P1은 (b)상의 P2와 (c)상의 P3로 연결되어진다.

그림 3의 (c)는 입력 3차원 얼굴 데이터로부터 구로의 연결된 결과를 보여주고 있다. (b)와 같이 법선 벡터 연결 후 2차원 투영방법에 비해 제안된 방법이 더 많은 정보를 표현하고 있음을 볼 수 있다. 얼굴은 다소 평면적이므로 2차원 원의 한 점은 몇 백 개의 3차원 정점과 연결되는 편중화

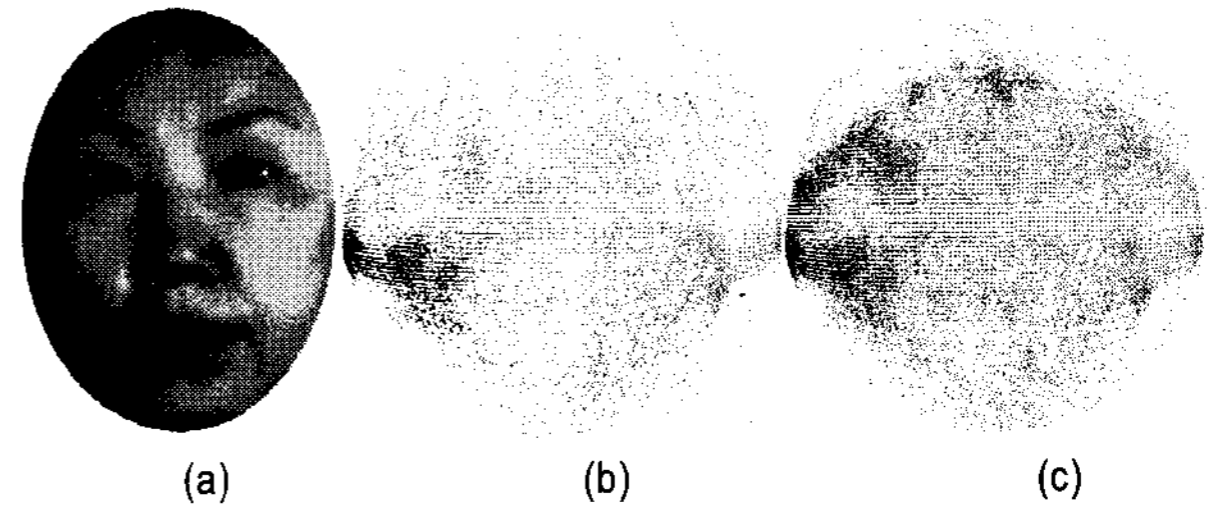


그림 3. 3차원 얼굴 객체의 점과 3차원 단위 구의 연결의 비교 (a) 입력 3차원 얼굴 데이터 (b) 법선벡터의 연결 후 2차원 투영 (c) 제안된 방법
 Fig. 3. Comparison of the results of mapping points in a 3D face model to points within a sphere model (a) captured face data (b) 2D projection of normal vectors (c) result of sphere mapping

현상이 생긴다. 원래의 3차원 물체의 편평한 부분이 많을수록 이러한 편중화 경향이 심해져 2차원 원의 어떤 부분에서는 하나의 점도 연결되지 못한 틈이 생기기도 한다. 그림 3의 (c)에 있는 흰 점은 연결된 3차원상의 정점이 하나도 없다는 것을 나타내고 있다. 그림 3의 (c)에서와 같이 2차원 원상에 여러 개의 3차원상의 점이 연결되었을 때에는 평균 값으로 표현한다. 그러나 그림 (c)에서 보이는 바와 같이 원의 상단과 하단부분에는 얼굴 객체의 특성상 정점의 분포가 너무 희박하기 때문에 광원을 추정하는데 있어 에러를 발생시킬 수 있다. 따라서 원의 중심에서 전체 데이터의 80% 수준만 실험에서는 사용한다. 여전히 존재하는 틈을 채우기 위하여 식 (3)에서와 같이 가중 양선형 보간법을 사용한다.

$$p = \frac{1}{t} \sum_{m \in \alpha(p)} e^{-\frac{d(p,m)}{\tau}} m, \tag{3}$$

$$t = \sum_{m \in \alpha(p)} e^{-\frac{d(p,m)}{\tau}},$$

여기에서 p 는 채워져야 할 점, α 는 인접 점의 집합, d 는 p 와 m 사이의 거리, τ 는 상수이다. 광원을 추정하는데 있어 에러를 제거하기 위해서 가우시안 블러로 원에 존재하는 노이즈를 그림 4의 (b)와 같이 제거하였다.

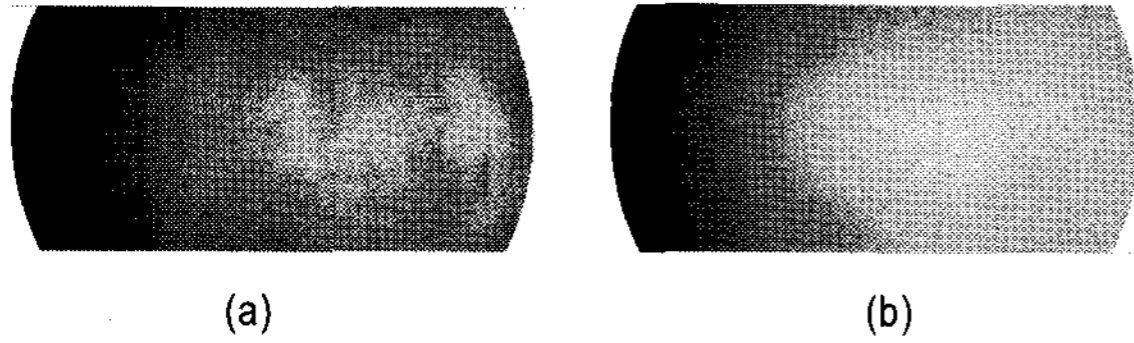


그림 4. (a) 보간 후의 결과 (b)가우시안 블러의 결과
Fig. 4. Results of (a) interpolation (b) Gaussian blur

2. 광원의 방향 추정

본 논문에서는 광원의 방향을 추정하기 위해서 Zhang et al.^[7]과 Wang et al.^[8]이 제안한 방법을 사용하였다. 구에 하나의 광원이 빛을 비출 때 광원의 영향을 받을 수 없기 시작하는 지점의 표면에 있는 점들을 연결하여 단절곡선이라고 하고 이 단절곡선으로 광원을 추정하였다. 이러한 단절곡선은 구를 직교투영 시키면 2차원 원상에서 타원의 한 부분으로 표현되어진다. 단절곡선 상에 존재하는 법선벡터는 광원의 위치와 수직을 이루게 되기 때문에 식 (4)에 의해 쉽게 광원의 위치를 추정할 수 있다.

$$\sum i = \{P \mid L \cdot N_p = 0\}, \quad (4)$$

여기에서 P 는 영상상의 점, N_p 는 법선벡터를 의미한다. 또한 각 단절곡선은 구의 중심점을 관통하는 횡단면에 위치한다. 따라서 Wang은 곡선 상에 존재하는 임계점을 찾고 허프공간상의 쌍의 각 (ζ, θ) 변수를 구하여 허프변환을 한 후 그 임계점들을 연결함으로써 단절곡선을 정의하였다. 횡단면 방정식은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있는데,

$$x \cdot n_x + y \cdot n_y + z \cdot n_z = 0, \quad (5)$$

$$n_x = r \cos \theta, n_y = r \sin \theta \cos \zeta, n_z = r \sin \theta \sin \zeta,$$

(x, y, z) 는 각 임계점의 위치, (n_x, n_y, n_z) 는 횡단면의 법선벡터, r 은 구의 반지름을 나타내고 $\zeta, \theta \in [0, 180]$ 이다.

Wang은 자신의 논문에서 다수의 광원을 추정할 수 있는 방법을 제시하였으나 본 논문에서는 하나의 광원만을 대상으로 실험하였다. 따라서 가능한 단절영역(critical boundary)들로 (ζ, θ) 를 검출한 후 허프변환상에 가장 많은 지지(voting)를 얻은 원을 최종 단절곡선으로 선택하였다.

그러나 원래의 3차원 객체의 법선벡터가 모든 2차원 원을 채울 만큼 충분하지 못한 경우 임계점들의 위치가 부정확하게 검출될 수 있고 단절 곡선의 위치 또한 다르게 검출될 수 있다. 이러한 에러를 발생시킬 수 있는 요소를 없애기 위해 본 논문에서는 식 (6)과 같은 최소자승법을 이용하여 검출된 광원의 위치를 검증한다.

$$E(P_j) = \sum_{i \in \Lambda} \max(e_i L_i \cdot N_j, 0) + L_v \cdot N_j, \quad 1 \leq j \leq k \quad (6)$$

$$\Lambda = \{i \mid L \cdot N_p = 0\},$$

여기에서 이미 검출된 광원의 위치가 $L_i, i \in \Lambda$ 와 같고 L_v 는 검출되지 못한 가상적인 광원의 위치라고 가정한다. 단절영역 상에서 점들이 선택되므로 광원의 위치 검출이 에러에 강인할 수 있다. $i \in \Lambda, \text{ if } e_i < 0$ 일 경우에는 이미 검출된 광원의 위치와 반대의 위치가 선택되지만 이와 다를 경우는 같은 위치가 광원의 위치로 선택된다. 마지막으로 e_i 값이 가장 큰 경우를 광원의 위치라고 선택한다.

그림 5는 단절곡선을 검출한 결과를 보여준다. 점선은 검출된 단절곡선이며 실선이 원래의 광원으로서 만든 단절곡선을 표현하고 있다.

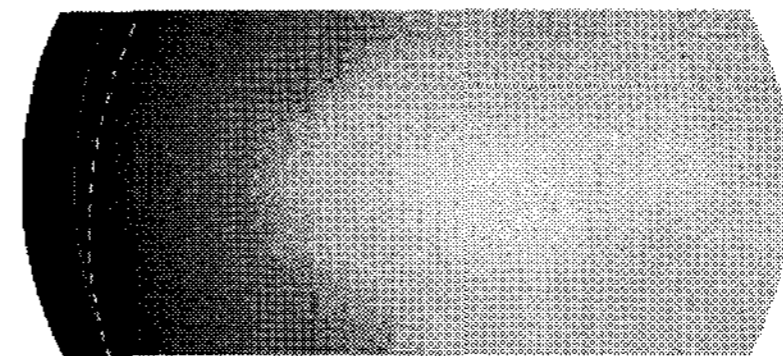


그림 5. 단절 곡선 검출의 결과
Fig. 5. Result of detected cutoff curve

II. 얼굴 재조명

입력된 얼굴 영상의 밝기는 표면이 경면 반사(specular reflection)가 존재하지 않는다는 가정 하에 완전확산면일 때 주변광 반사 계수(ambient reflection coefficient) k_a 와 확산광 반사 계수(diffuse reflection coefficient) k_d 로 이루어진 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$I = k_a i_a + k_d (L \cdot N) i_d, \quad (7)$$

여기에서 i_a 는 주변광의 밝기, i_d 는 확산광의 밝기를 각각 의미한다. 이 식에서의 밝기는 광원의 위치와 법선벡터와의 내적으로 구해지기 때문에 어느 점에서는 0보다 작은 음수가 될 수도 있다. 이러한 밝기의 변화를 그림 6의 (a)에서 보듯이 구의 오른쪽 부분은 밝기가 양수로 표현되고 구의 왼쪽 부분은 음수로 표현하였다. 그러나 실제 세계에서는 음수의 밝기는 존재하지 않기 때문에 이 값은 (b)에서의 구의 왼쪽부분과 같이 0으로 수렴한다. 이 부분의 밝기가 낮아질수록 원래의 색으로 복원하기가 힘들어진다. 본 논문은 제안된 재조명 방정식을 이용하여 이렇게 왜곡된 부분을 원래의 색으로 복원하는 것을 목적으로 하고 있다.

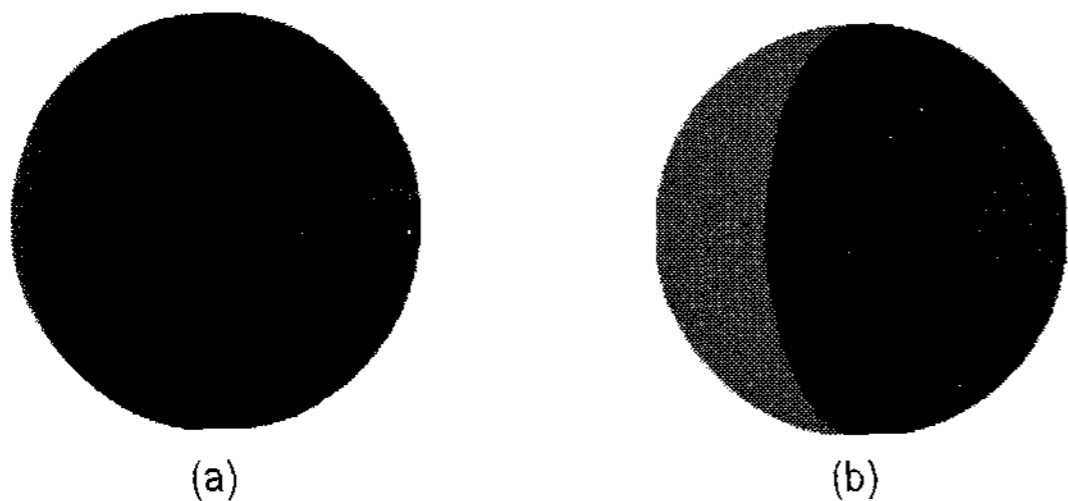


그림 6. 검출된 광원에 의한 참조 법선맵 (a)음수정보 표현 (b)음수정보를 0으로 수렴

Fig. 6. Reference normal map determined by the detected light source (a) with negative information (b) with no negative information

3차원 입력 객체의 얼굴 영상 각 점마다 광원의 방향과 법선벡터를 얻을 수 있기 때문에 반사 계수, 입력영상의 색, 대칭점의 색 등을 이용하여 식 (8)과 같은 새로운 재조명 식을 설정하면 다음과 같다.

$$C_{re(x,y)} = \sigma C_{I(x,y)} + \tau C_{I(-x,y)} + (1 - \sigma - \tau) \frac{C_{I(x,y)}}{k_a i_a + k_d i_d (LN)}, \quad (8)$$

$$\sigma = L \cdot N_{(x,y)}, \quad \tau = (1 - \sigma) |L \cdot N_{(x,y)} - L \cdot N_{(-x,y)}|,$$

$C_{I(x,y)}$ 는 입력값, L 은 검출된 광원의 위치, N 은 각 점의 법선 벡터, σ , τ , $1 - \sigma - \tau$ 는 각 부분의 가중값을 나타낸다. 예를 들어 재조명된 값 $c_{re(x,y)}$ 가 입력값 $c_{I(x,y)}$ 와 같을 때 σ 가 1이 된다. 사람의 얼굴은 대칭하다고 가정할 수 있기 때문에 광원의 방향이 얼굴을 따라 좌우로 변해갈 때 이러한 대칭적인 요소에 의해 변해가는 밝기를 이용한다. 반사 계수는 식 (9)와 (10)으로 계산되어진다. 그러나 입력영상만으로는 $k_a i_a$ 와 $k_d i_d$ 를 정확하게 알 수는 없기 때문에 $k_a i_a$ 와 $k_d i_d$ 를 상수로 가정한 후 회귀방정식을 이용한다. 식 (7)을 이용하여 $(L \cdot N) = 1$ 일때 주변광의 영향을 제거하고 확산광의 영향만을 가지고 있는 c_t 와 $(L \cdot N) \leq 0$ 일때 주변광의 영향만을 가지고 있는 c_e 를 이용하여 식 (9)와 같이 $k_a i_a$ 를 추정한다.

$$A = \begin{bmatrix} C_{e_1} \\ C_{e_2} \\ \vdots \\ C_{e_n} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} C_{t_1} \\ C_{t_2} \\ \vdots \\ C_{t_n} \end{bmatrix}, x = \frac{1}{k_a i_a}, \quad (9)$$

$$Ax = B,$$

여기에서 c_t 와 c_e 는 다음과 같다.

$$C_t = \frac{1}{n_1} \sum_{i \in N_1} C_{In}(i) - \frac{1}{n_2} \sum_{i \in N_2} C_{In}(i),$$

$$C_e = \frac{1}{n_1} \cdot \sum_{i \in N_1} C_{In}(i),$$

N_1 은 $(L \cdot N) = 1$ 일 때의 N_2 는 $(L \cdot N) \leq 0$ 일 때의 픽셀값, n_1 , n_2 는 각각의 픽셀값들의 개수를 나타낸다.

$$x = (A^T A)^{-1} A^T \begin{bmatrix} C_{t_1} \\ C_{t_2} \\ \vdots \\ C_{t_n} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

이로서 가장 가능성이 높은 x 의 값은 식 (10)으로 구할 수 있다.

이미 $k_a i_a$ 를 추정하여 알고 있으므로 $0 < (L \cdot N) < 1$ 일 때 확산광의 영향만을 가지고 있는 c_e 를 이용하여 식 (11)과 같이 $k_d i_d$ 를 추정한다.

$$A = \begin{bmatrix} C_{e_1} \\ C_{e_2} \\ \vdots \\ C_{e_n} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} C_{t_1} \\ C_{t_2} \\ \vdots \\ C_{t_n} \end{bmatrix}, x = \frac{1}{k_a i_a + k_d i_d (L \cdot N)}, \quad (11)$$

$$Ax = B$$

여기에서 c_t 와 c_e 는 다음과 같다.

$$C_t = \frac{1}{n_1} \sum_{i \in N_1} C_{In}(i) - \frac{1}{n_2} \sum_{i \in N_2} C_{In}(i),$$

$$C_e = \frac{1}{n_3} \sum_{i \in N_3} C_{In}(i),$$

N_3 는 $0 < (L \cdot N) < 1$ 일 때의 픽셀값, n_3 는 그 픽셀값들의 개수를 나타낸다.

이로서 $k_a i_a$ 와 $k_d i_d$ 를 이용하여 식 (8)을 이용하여 입력된 영상을 재조명한다.

IV. 실험결과

이 장에서는 조명에 의해 왜곡된 얼굴 영상을 재조명한

다양한 실험 결과를 보인다. 먼저 그림 7의 (b)와 같이 연세대학교 생체인식연구센터에 있는 Cyberware Model 3030 PS/RGB 레이저 스캐너로 얻어진 3차원 얼굴 영상 데이터 베이스(정점수 : 20000-30000, 텍스처 영상 크기 : 457x348)를 이용하여 왜곡된 얼굴영상을 생성하였다. 제안된 방법의 성능을 검증하기 위하여 다양한 방향의 광원 하에 실험을 수행하였다. 실험에서 가상 복사조도 반구의 반지름은 200으로 하였다.

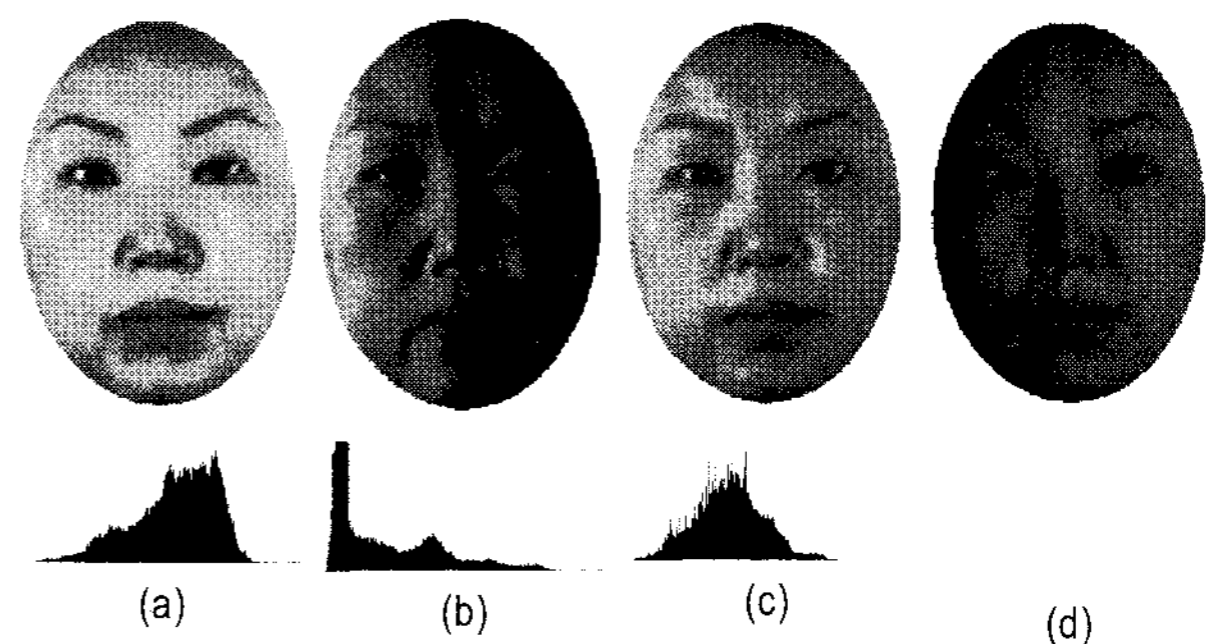


그림 7. 히스토그램 비교 (a)원본 영상 (b)조명에 의해 왜곡된 영상 (c) 재조명된 영상 (d) 에러영상

Fig. 7. Histogram comparison (a) original texture image (b) illuminated texture image (c) relighted texture image (d) error image

그림 7은 재조명된 영상의 히스토그램이 원래 영상의 히스토그램과 정확하게 일치하진 않더라도 그림자와 음영에 의해 심하게 왜곡된 부분의 밝기를 적절하게 복원하는 것을 보여준다. (d)에서와 같이 그림자와 음영부분의 에러값이 다른 부분에 비해서 높음을 알 수 있다.

조명의 방향이 얼굴의 가로방향(slant)으로 변해갈 때 원래의 광원의 방향과 검출된 광원의 방향을 제곱평균제곱근(root mean square error)을 계산함으로써 비교하였다. 그림 8에서 보이듯이 제안된 방법으로 가상복사조도 반구를 생성한 방법이 wang의 방법에 비해 성능이 향상됨을 알 수 있다. 에러는 각도가 증가될수록 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 얼굴의 법선벡터가 대부분 정면을 향하고 있기 때문이다. 표 1에서는 원래의 광원의 방향과 검출된 광원을 방향을 비교하여 도시하고 있다. 그러나 조명의 방향이 세로방향(tilt)으로 변해갈 때에는 에러가 많아서 이는 앞으로

해결해야할 문제이다. 얼굴의 특성상 위, 아래 부분의 정보가 너무나 희박하기 때문이다.

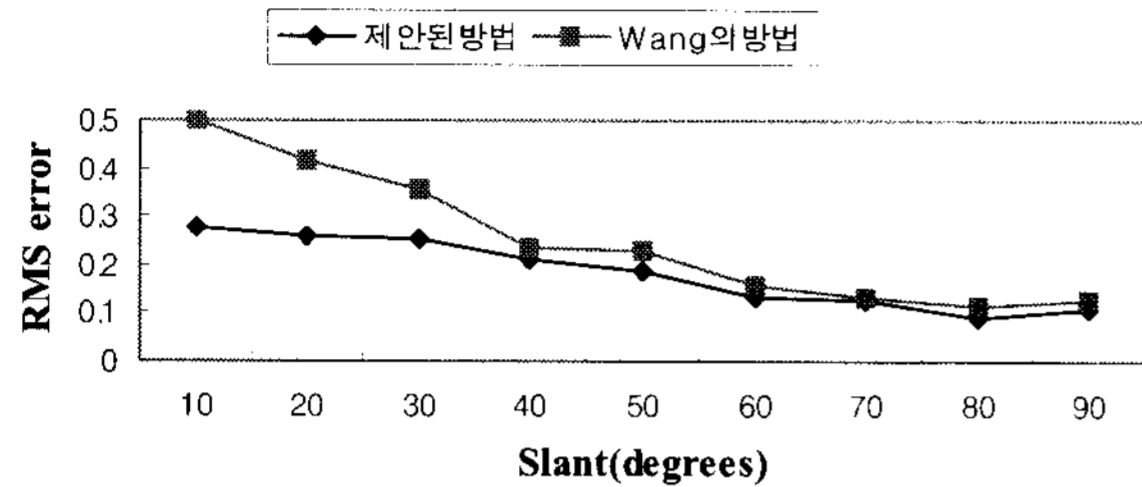


그림 8. 검출된 광원과 실제 광원의 위치 에러
Fig. 8. Error between the detected light source direction and the real light source direction

표 1. 검출된 광원의 위치 비교

Table 1. Result of detected light source direction (unit vectors)

slant	검출된 광원의 위치			실제 광원의 위치		
	x	y	z	x	y	z
10	0.359193	-0.0578	0.827018	0.173648	0	0.984808
20	0.493422	0	0.829038	0.34202	0	0.939693
30	0.559193	0.172367	0.810921	0.5	0	0.866025
40	0.653912	0.172641	0.702582	0.642788	0	0.766044
50	0.788011	0.169888	0.613353	0.766044	0	0.642788
60	0.848048	0.128199	0.514178	0.866025	0	0.5
70	0.927184	0.100792	0.286965	0.939693	0	0.34202
80	0.978148	-0.0778	0.192772	0.984808	0	0.173648
90	0.997564	0.028373	0.063726	1	0	0

그림 9에서는 조명에 의해 왜곡된 영상과 재조명된 영상과의 신호대잡음비(PSNR)를 비교하였는데 조명의 각도가 커질수록 의미 있는 증가를 보여주고 있다. 조명의 상황이 악화될수록 제안된 방법이 효과적임을 보이고 있으나 재조명된 영상의 신호대잡음비가 만족스럽지는 않다. 신호대잡음비 계산 자체가 각각의 픽셀값의 차이에 민감한데 재조명을 하더라도 원본과 똑같은 값을 복원하기는 힘들기 때문이다.

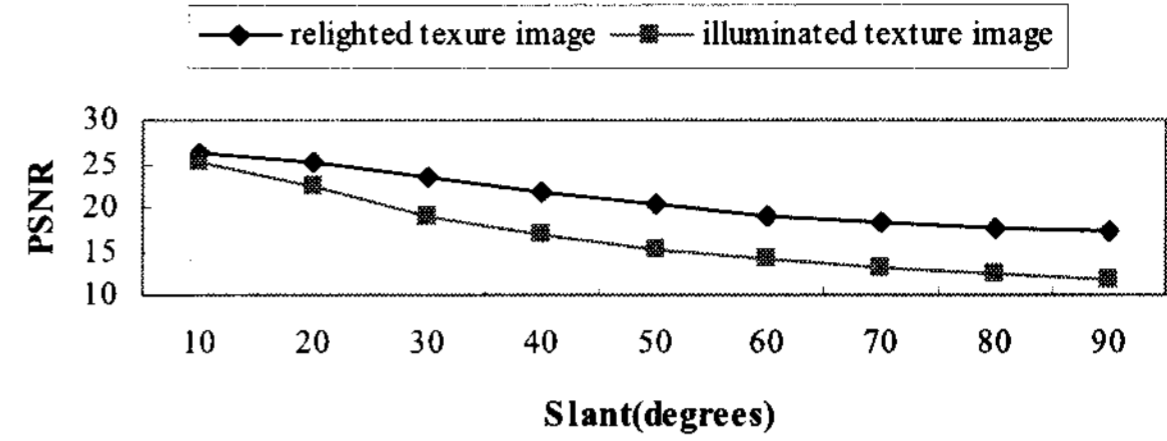


그림 9. 재조명된 영상과 조명에 의해 왜곡된 영상의 PSNR 비교
Fig. 9. PSNR comparison of relighted texture image and illuminated texture image

제안된 방법을 이용하여 주성분 분석법(Principal component analysis)^[17] 기반의 얼굴인식을 수행하였다. 주성분 분석법은 차원의 감소와 그 간단함 때문에 분석, 압축, 모델링 그리고 물체의 인식 등에 널리 사용된다. 특히 얼굴인식분야^[18]에 유용하게 활용되고 있다. 본 실험에서는 얼굴 부분 공간(face subspace)를 생성하기 위해 얼굴 56명으로부터 얼굴 영상을 획득 후 224장의 조명에 의해 임의로 왜곡된 영상과 224장의 재조명된 영상을 준비하였다. 표 2에서는 조명의 방향으로 가로방향으로 바꾸어 갈 때 왜곡된 영상과 재조명된 영상의 얼굴인식률을 비교하였다.

표 2. 얼굴 인식률 비교

Table 2. Face recognition rate

	재조명된 영상	왜곡된 영상
20	100	98.214286
40	94.642857	58.928571
60	89.285714	42.857143
80	83.928571	21.428571
total	91.964286	55.357143

이러한 실험을 통하여 제안된 재조명 방법이 그림 10에서와 같이 조명의 상황이 열악할 때에도 얼굴 인식률의 급격한 증가를 보임을 알 수 있다. 각도가 80일 때 62.5%의 얼굴인식률 증가를 보인다.

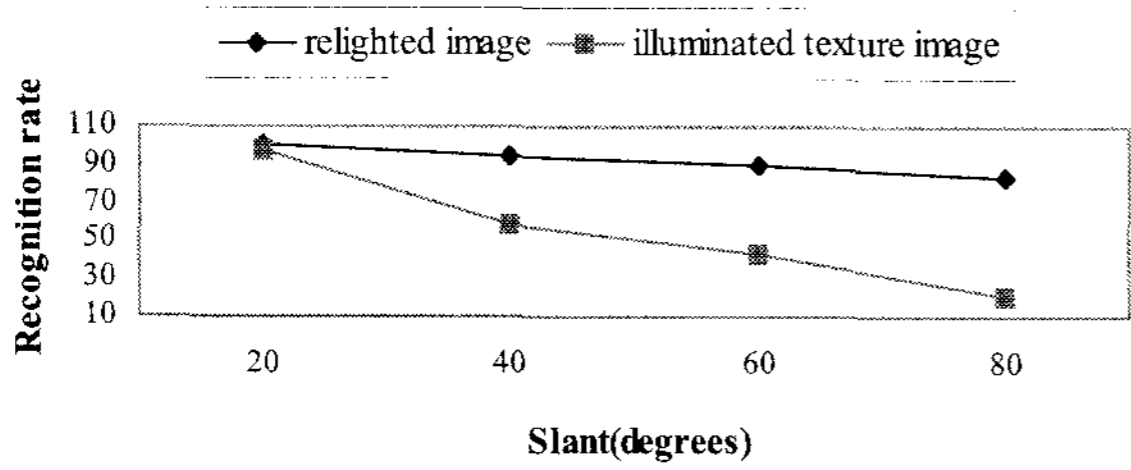


그림 10 . 얼굴 인식을 비교
Fig. 10. Face recognition rate comparison

그림 11에서는 다양한 조명 환경 상에서의 재조명 결과를 히스토그램과 함께 도시하였으며 그림 12에서는 다양한 사람들을 통해 제안된 방법을 실험하였다. 이를 통해 남녀 노소를 불문하고 본 논문이 효과적임을 알 수 있다

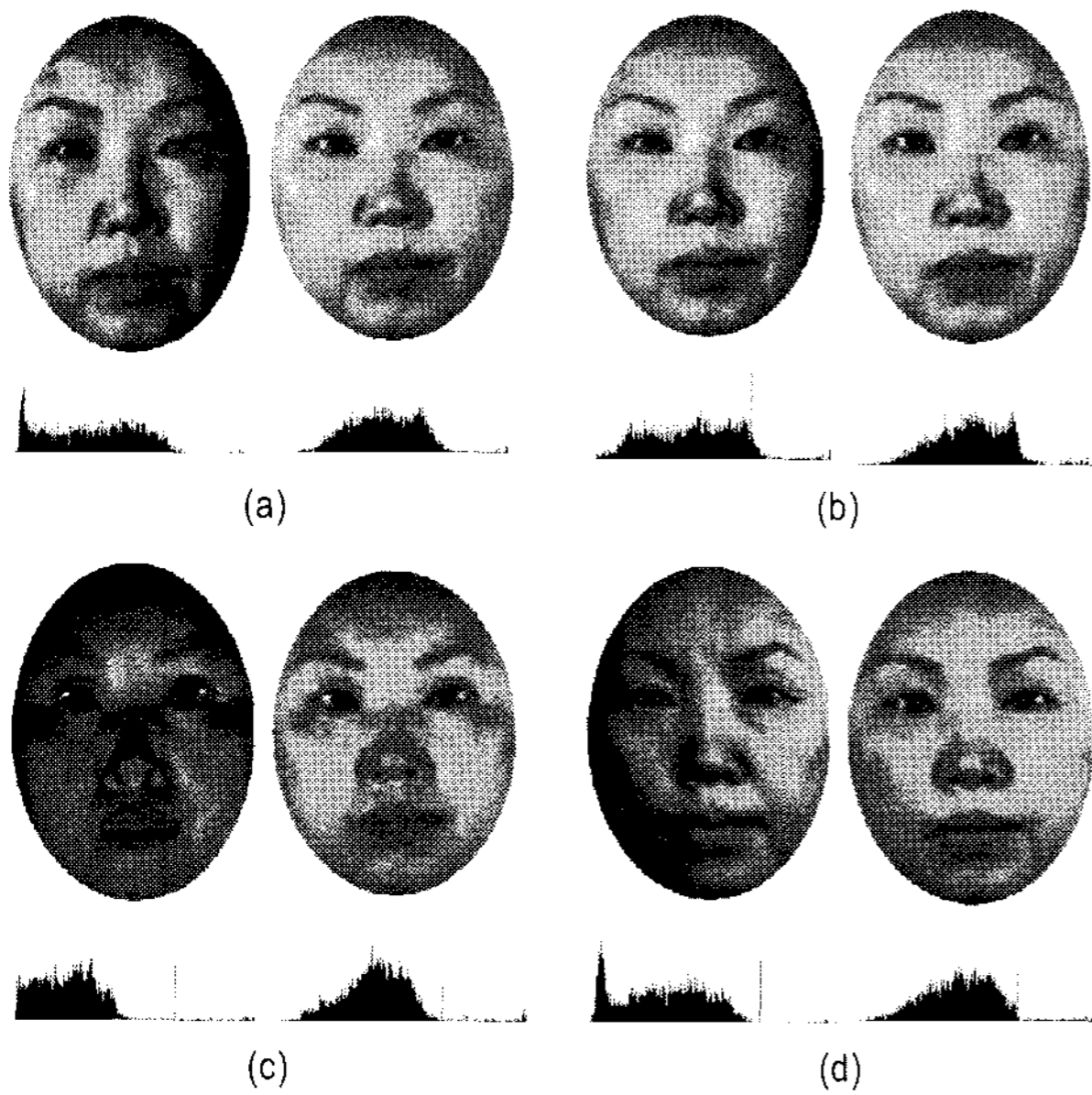


그림 11. 서로 다른 조명 조건(왼쪽 : 왜곡된 영상, 오른쪽 : 재조명된 영상)
Fig. 11. Different illumination conditions (left : illuminated texture image, right : relighted texture image)

식 3에서 거리뿐만 아니라 한 점에 연결된 3차원 상의 정점의 개수에 따라서도 가중 보간을 하고 식 (11)에서 $0 < (L \cdot N) < 1$ 일때 $L \cdot N$ 의 값에 따라 N_3 의 값을 상쇄 시킴으로써 그림 13과 같이 다양한 객체와 텍스처에 적용 시켜 보았다.

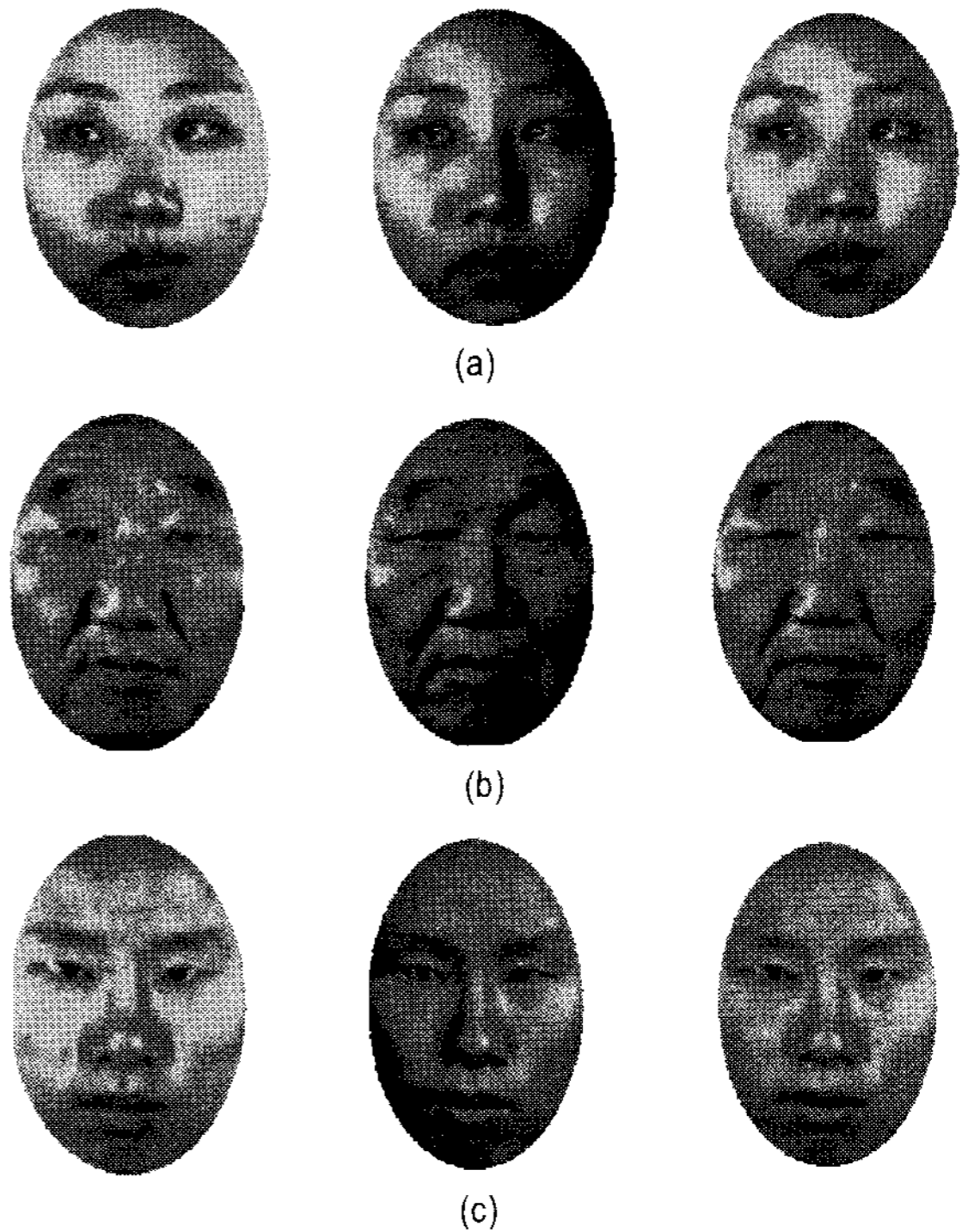


그림 12. 다양한 광원과 얼굴의 재조명 (왼쪽 : 원본영상, 중간: 왜곡된 영상, 오른쪽 : 재조명된 영상)
Fig. 12. Relighting of illuminated 3D face of different people and various light source directions (left : original texture image middle : illuminated texture image right : relighted texture image)

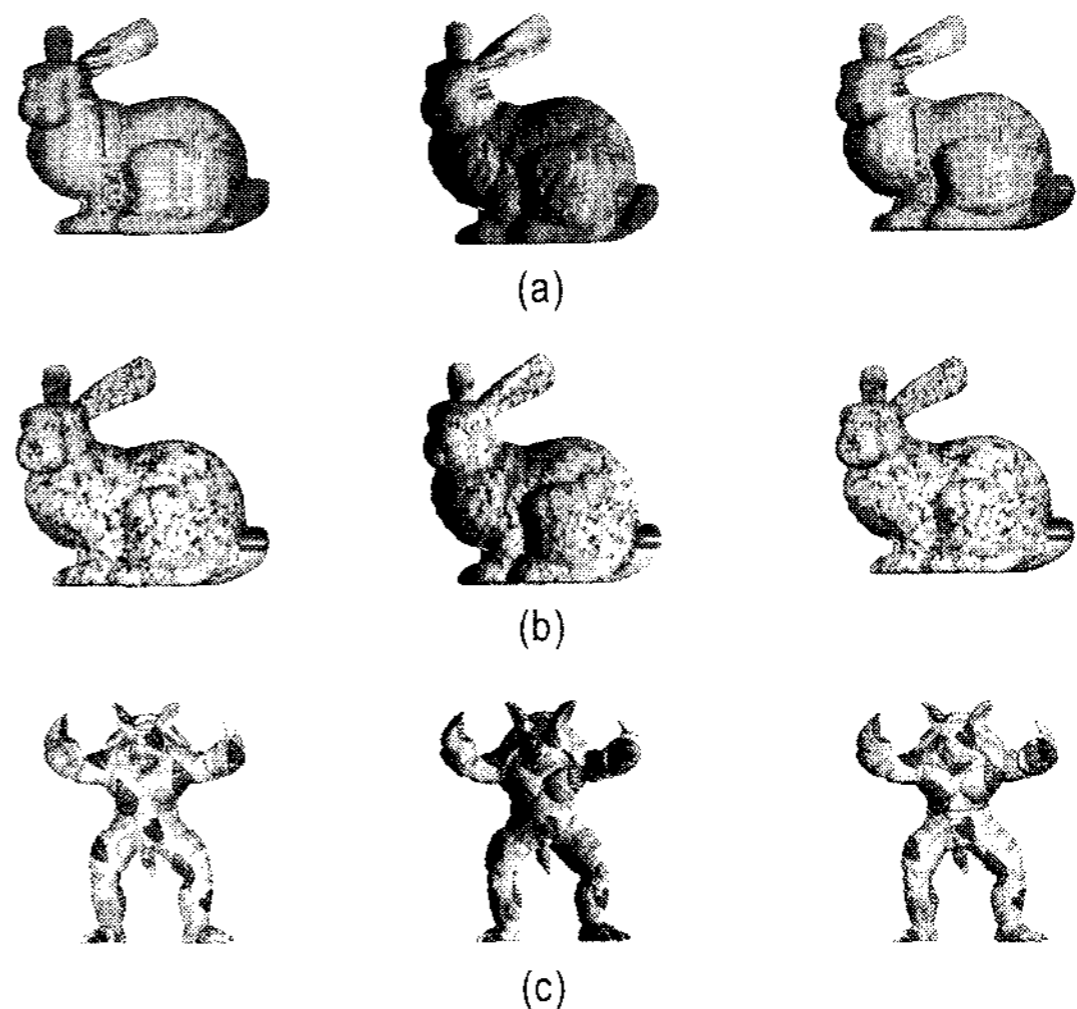


그림 13. 다양한 객체와 텍스처의 적용 (왼쪽: 원본영상, 중간: 왜곡된 영상, 오른쪽: 재조명된 영상)
Fig. 13. Relighting of various objects and textures

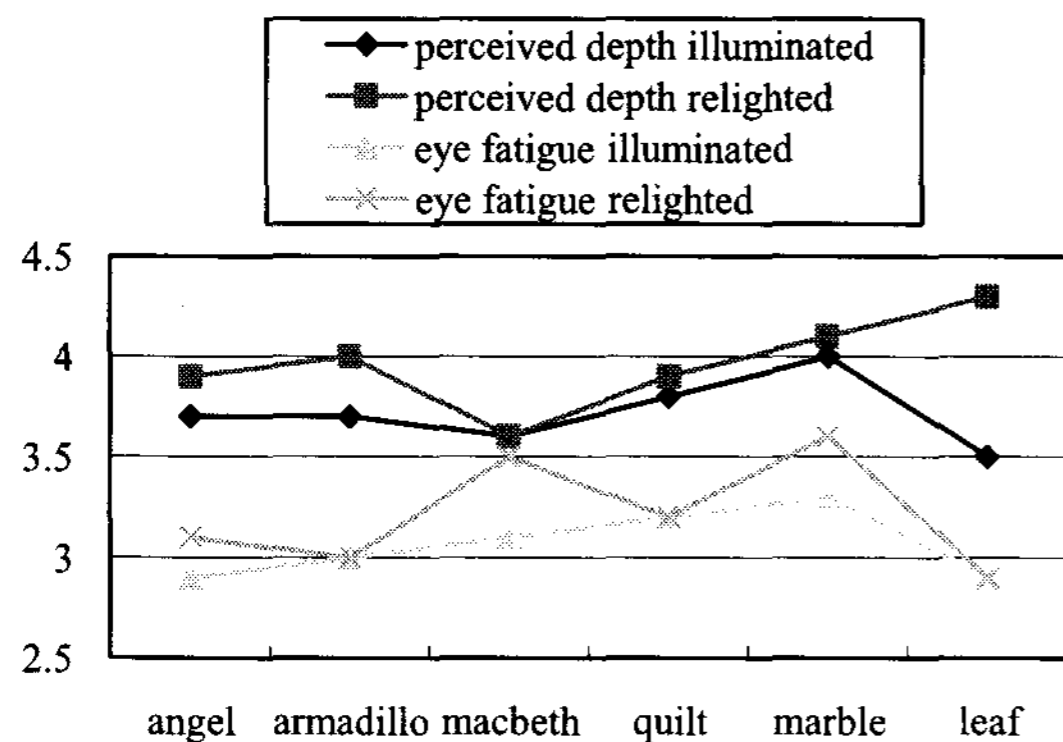


그림 14. 주관적 화질평가 결과

Fig. 14. Result of subjective evaluation

3차원 디스플레이 시청 시에 초점 및 주시 연동 관계 파괴, 혼신(crosstalk), 중첩과 시차 사이의 불일치, 과도한 시차의 존재 같은 다양한 시각적 불편감이 존재한다. 본 논문에서는 그림 14에서 보이듯이 재조명 기법을 이용하여 이러한 시각적 피로도를 줄일 뿐만 아니라 입체감을 증대시킬 수 있음을 주관적 화질 평가를 통해 보였다. 모든 항목에서 조명에 의해 왜곡된 3차원 객체보다 재조명된 3차원 객체가 높은 점수를 얻는 것을 볼 수 있다. 그러나 각 3차원 객체와 텍스처의 복잡도에 따라서 약간씩 점수의 차이를 보임을 알 수 있다.

본 실험은 12개의 서로 다른 모델과 텍스처 영상을 필립스 멀티뷰 렌티큘러 디스플레이(Philips multi-view lenticular display-20-3D2W02)상에서 15명을 대상으로 수행하였다. 랜덤하게 3차원 모델을 화면에 보여주고 시각적 피로도와 입체감을 두 부분에서 1에서 5점까지의 점수를 매기게끔 하였다. 본 실험을 통해 향후 3차원 TV에서 사용자가 임의로 조명의 복원 비율을 지정함으로써 적응적으로 시각적 피로도를 줄이고 입체감을 증대시킬 수 있을 것으로 기대한다.

IV. 결론

본 논문에서는 광원의 위치를 검출하기 위한 가상 복사조도 반구와 반사계수에 근거한 재조명 방정식을 이용하여

다양한 조명 상황에 의해 왜곡된 얼굴 영상을 재조명하는 기법을 제안하였다.

제안된 알고리즘은 실외에 설치된 3차원 거리 스캐너와 기존의 2차원 얼굴 영상 데이터베이스를 이용하여 조명의 영향에 상관없는 얼굴 인식 방법에 사용될 수 있다. 현재 정밀한 3차원 객체를 얻는 것이 어렵고 느린 속도가 문제이지만 3차원 거리 스캐너의 기술이 급속히 발달하고 있으므로 곧 실제 상황에서도 적용이 가능하리라 예상한다.

실험결과에서 오직 3차원 객체의 기하 정보와 조명에 의해 왜곡된 하나의 텍스처 영상만으로 얼굴의 그림자와 음영 부분을 효율적으로 복원하는 것을 보였다. 또한 극단적으로 좋지 않은 조명 상황에서도 얼굴 인식률을 높일 뿐만 아니라 3차원 디스플레이를 통해 입체감의 증대와 시각적 피로도를 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

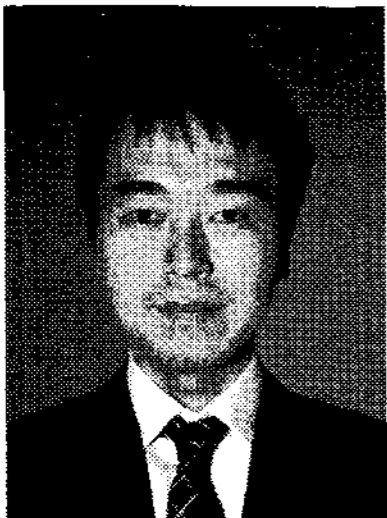
향후 명도차가 많은 텍스처 영상과 3차원 객체의 법선벡터가 아주 희박한 물체일 경우 생기는 높은 에러율을 줄이는 방법에 대해 제안된 알고리즘을 개선시키고자 한다. 또한 3차원 기하 정보가 없을 때의 재조명 방법에 대해서도 연구하고자 한다.

참고 문헌

- [1] A.S. Georghiades, P.N. Belhumeur, & D.J. Kriegman, "From few to many: illumination cone models for face recognition under differing pose and lighting", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 23(6), pp.643-660, 2001.
- [2] R. Basria & D. Jacobs, "Lambertian reflectance and linear subspaces", Proc. 8th IEEE Int. Conf. on Computer Vision, pp.383-390, 2001.
- [3] L. Zhang, S. Wang, & D. Samaras, "Face synthesis and recognition under arbitrary unknown lighting using a spherical harmonic basis morphable model", IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, II: pp.209-216, 2005.
- [4] G. Gordon, "Face recognition based on depth maps and surface curvature", SPIE Geom. Methods Computer Vision, 1570, pp.234-247, 1991.
- [5] Z. Wen, Z. Liu, & T. Huang, "Face relighting with radiance environment maps", Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.158-165, 2003.
- [6] J. Lee, H. Pfister, & B. Moghaddam, and R. Machiraju, "Estimation of 3D faces and illumination from single photographs using a bilinear illumination model", Proc. of Eurographics Symposium on Rendering, pp.73-82, 2005.

- [7] Y. Zhang & Y.-H. Yang, "Illuminant direction determination for multiple light sources", Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, I, pp.269-276, 2000.
- [8] Y. Wang & D. Samaras, "Estimation of multiple directional light sources for synthesis of mixed reality images", Proc. 10th Pacific Conf. on Computer Graphics and Applications, pp.38-47, 2002.
- [9] T. Okabe, I. Sato, & Y. Sato, "Spherical harmonics vs. Haar wavelets: basis for recovering illumination from cast shadows", Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, I, pp.50-57, 2004.
- [10] C.S. Bouganis & M. Brookes, "Multiple light source detection", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 26(4), pp.509-514, 2004.
- [11] Y. Zhang & Y.-H. Yang, "Multiple illuminant direction detection with application to image synthesis", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 23(8), pp.915-920, 2001.
- [12] K. Hara, K. Nishino, & K. Ikeuchi, "Multiple light sources and reflectance property estimation based on a mixture of spherical distributions", Proc. Intl. Conf. on Computer Vision, II: pp.1627-1634, 2005.
- [13] Nathan Funk, "Implementation of an illuminant detection algorithm", Project report for CMPUT 615 in University of Alberta, 2003.
- [14] J.L. Bentley, "Multidimensional binary search trees used for associative searching", Communications of the ACM, 19, pp.509-517, 1975.
- [15] S. Arya, D. Mount, N. Netanyahu, R Silverman, A. Wu, "An optimal algorithm for approximate nearest neighbor searching in fixed dimensions", Journal of the ACM, 45:6, pp.891-923, 1998.
- [16] D. Mount, S. Arya, "ANN: A library for approximate nearest neighbor searching", <http://www.cs.umd.edu/~mount/ANN>, 2006.
- [17] Turk M, Pentland A, "Eigenfaces for recognition", Journal of Cognitive Neuroscience, 3, pp.71-86, 1991.
- [18] Russ T, Boehnen C, Peters T, "3D Face Recognition Using 3D Alignment for PCA", CVPR, II, pp.1391-1398, 2006.

저 자 소 개



한 희 철

- 1999년 : 경상대학교 컴퓨터공학과 학사
- 2001년 : 경상대학교 멀티미디어응용학과 석사
- 2001년 ~ 현재 : 삼성전자 디지털미디어 연구소 연구원
- 2006년 ~ 현재 : 연세대학교 전기전자공학부 박사과정
- 주관심분야 : 컬러영상처리, 조명 복원



손 광 훈

- 1983년 : 연세대학교 전자공학과 공학사
- 1985년 : University of Minnesota, MSSE
- 1991년 : North Carolina State University, Ph.D
- 1993년 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 1994년 : Georgetown University, Post-doctor fellow
- 1995년 ~ 현재 : 연세대학교 전기전자공학부 교수
- 2002년 9월 ~ 2003년 8월 : Nanyang Technological University, Visiting Professor
- 주관심분야 : 3차원 영상처리, 영상 통신