

論文2001-38CI-6-7

## 지역 분할과 다중 라이트 빔을 이용한 3차원 얼굴 형상 모델링 기법

## (A 3D Face Modeling Method Using Region Segmentation and Multiple light beams)

李耀翰\*, 趙宙顯\*, 宋泰庚\*

(Yo Han Lee, Joo Hyun Cho, and Tai Kyong Song)

## 요약

본 논문에서는 한 개의 카메라와 한 대의 환등기(LCD 환등기 혹은 슬라이드 환등기)를 이용하여 2차원 얼굴 영상으로부터 3차원 얼굴 형상을 모델링하는 방법을 제안한다. 환등기를 이용하여 사람 얼굴에 라이트 빔을 투영하고 이를 조금씩 이동시키며 영상을 획득한 뒤 각 2차원 영상의 지역적 정보와 영상들 사이의 시간적 정보를 함께 이용하여 3차원 형상을 복원하는 방법을 채택하였다. 제안된 방법에서는 특징이 서로 다른 영역들의 효과적인 3차원 좌표 모델링을 위해 영상을 그림자 부분, 얼굴 부분 그리고 머리카락 부분으로 나누어 처리하는 지역 분할(region segmentation) 기법을 도입하였고, 2차원 얼굴 영상 획득 시간을 줄이고 고속 3차원 스캔을 위하여 한 영상 안에 다수의 라이트 빔(multiple light beams)을 이용하였다. 또한 라이트 빔의 경계를 정확하게 검출하기 위하여 라이트 빔 캘리브레이션(light beam calibration) 기법을 제안하여 사용하였다. 실험 결과 제안한 방법을 통해서 머리카락 부분을 포함한 전체 얼굴 영역에서 향상된 3차원 모델링 결과를 얻을 수 있었다.

## Abstract

This paper presents a 3D face modeling method using a CCD camera and a projector (LCD projector or Slide projector). The camera faces the human face and the projector casts white stripe patterns on the human face. The 3D shape of the face is extracted from spatial and temporal locations of the white stripe patterns on a series of image frames. The proposed method employs region segmentation and multi-beam techniques for efficient 3D modeling of hair region and faster 3D scanning respectively. In the proposed method, each image is segmented into face, hair, and shadow regions, which are independently processed to obtain the optimum results for each region. The multi-beam method, which uses a number of equally spaced stripe patterns, reduces the total number of image frames and consequently the overall data acquisition time. Light beam calibration is adopted for efficient light plane measurement, which is not influenced by the direction (vertical or horizontal) of the stripe patterns. Experimental results show that the proposed method provides a favorable 3D face modeling results, including the hair region.

\* 正會員, 西江大學校 電子工學科

(Department of Electronic Engineering Sogang University)

接受日字:2001年5月10日, 수정완료일:2001年8月24日

## I. 서론

3차원 형상 복원 기술은 애니메이션, 산업 디자인, 가상 현실, 인터넷 상의 상품 카탈로그 등 그 적용 범위

가 날로 확대되고 있다. 3차원 형상 복원 시스템을 설계하는데 있어 고려하여야 하는 중요 척도로는 비용, 정확도, 사용의 편리성, 처리 속도 등을 들 수 있다. 기존의 상용화된 3차원 스캐너들은 일반적으로 정확도가 매우 높은 대신 상대적으로 가격이 비싸고 부피가 큰 문제를 지니고 있다<sup>[1,2]</sup>. 이에 반하여 가격이 저렴하고 사용하기 편리한 데스크탑 비전 시스템(Desktop Vision System)에 관한 연구가 최근 활발하게 이루어지고 있다<sup>[3]</sup>.

이러한 데스크 탑 비전 시스템은 대부분 2차원 영상으로부터 3차원 형상 좌표를 계산하는 방법을 사용하며 크게 수동적 방법(passive method)과 능동적 방법(active method)으로 분류된다. 수동적 방법은 자연광을 이용하여 얻은 2차원 영상 안에 포함된 정보(두 영상 간 대응점의 변위, 텍스처, 포커스, 그림자 등)로부터 3차원 형상을 복원하는 것이다<sup>[4]</sup>. 대표적인 수동적 방법중 하나인 스테레오 비전은 서로 다른 위치에 있는 두 개의 카메라로부터 얻은 두 영상 사이에 각 대응점의 변위(disparity) 정보를 이용하여 3차원 정보를 추출한다. 스테레오 비전은 수동적 방법중 상대적으로 정확한 3차원 복원이 가능하지만 표면에 텍스처(texture)를 가지지 않는 물체에 대해서는 적용하기 어렵다는 단점이 있으며 카메라가 두 개 필요하므로 시스템의 복잡성이 증가하게 된다.

능동적 방법은 레이저나 환등기와 같은 능동 광원을 이용하여 물체에 빔을 투사하고 카메라를 통해 획득한 영상 내 화소의 사영 광선(projection optical ray)과 그 화소와 대응되는 광 평면(light plane)의 교차점을 구하는 능동적 삼각 측량법(active triangulation)을 적용하여 3차원 형상 좌표를 계산하게 된다<sup>[1]</sup>. 능동적 삼각 측량법은 표면에 텍스처를 갖지 않는 대상에 대해서도 적용할 수 있으며 또한 수동적 방법에 비해 상대적으로 정확한 3차원 형상 좌표 복원이 가능하다는 장점이 있다.

능동적 방법에서는 점 패턴(spot pattern), 줄무늬 패턴(stripe pattern), 코드화된 패턴(coded pattern)등과 같은 다양한 종류의 라이트 패턴을 이용하고 있다<sup>[1]</sup>. 점 패턴의 경우는 카메라 한 대보다 두 대를 이용하는 스테레오 비전에 적합한 패턴이며 카메라 한 대를 사용하는 경우는 보통 줄무늬 패턴이나 코드화된 패턴을 사용하는 것이 일반적이다. 줄무늬 패턴이나 코드화된 패턴을 사용하는 경우 빔의 경계를 검출하기 위해서

다양한 방법들이 이용되고 있는데 기존에 많이 사용되고 있는 방법은 영상 내 화소들의 위치에 따른 밝기 변화의 차이를 이용하여 빔의 경계를 결정하는 공간적(spatial) 방법을 들 수 있다<sup>[2,5]</sup>. 이에 반해 영상 내 화소들의 지역적 밝기 정보뿐만 아니라 빔 패턴을 이동시키며 생기는 시간에 따른 영상 간의 밝기 변화 정보도 함께 이용하는 시공간적(spatio-temporal) 방법이 있다<sup>[6]</sup>. 시공간적 방법을 이용하는 경우 심한 굴곡이 있는 표면이나 불연속적인 경계등에서도 3차원 복원 좌표값의 왜곡(distortion)이 공간적 방법만을 사용할 경우보다 감소한다. 또한 시공간적인 방법을 이용하여 영상 내 모든 화소에 대해 광 평면과 만나는 시점을 결정할 수 있기 때문에 영상 간 라이트 패턴 움직임 사이에 존재하는 화소에 대해서도 정확하게 3차원 좌표를 계산할 수 있는 장점이 있다<sup>[7]</sup>.

최근에 Bouguet와 Perona는 하나의 카메라와 간단한 도구를 이용하여 일반 PC 사용자도 쉽게 3차원 형상을 복원할 수 있는 데스크탑 비전 시스템을 개발하였다<sup>[4]</sup>. 이 방법에서는 일반 램프를 광원으로 사용하고 막대기를 이용하여 물체에 투영된 그림자의 경계를 시공간적 처리로 구한 후 3차원 좌표를 계산하였다. 이 방법은 장소에 구애받지 않고 간단한 도구만 이용하여 쉽게 3차원 형상 복원을 할 수 있는 장점이 있지만 검은 머리카락의 사람을 대상으로 하여 3차원 얼굴 형상 모델링을 할 경우 머리카락 영역에서 그림자의 경계를 검출하기 어려운 단점이 있다. 본 논문에서는 한 개의 카메라만을 사용하고 간단한 광원장치를 이용하여 가격이 저렴하며, 고속으로 정확한 3차원 데이터 획득이 가능한 상업용 3차원 얼굴조각기를 위한 3차원 얼굴 형상 모델링 방법을 제안한다. 환등기로 검은 바탕에 흰 라이트 빔을 사람 얼굴에 투사하여 검은 머리카락 부분에서도 흰 줄무늬 패턴의 밝기 변화를 이용할 수 있도록 하였다. 라이트 빔 경계에 속하는 화소를 찾기 위해 각 영상 내에 라이트 빔 경계의 지역적인 정보뿐만 아니라 각 영상 간 시간적인 정보도 함께 이용하여 동적 범위(dynamic range)가 작은 머리카락 부분에서도 가능한 많은 수의 3차원 좌표 값을 복원할 수 있도록 하였다. 또한 빔 경계 측정을 위해서 영상 내 임의의 화소가 빔의 경계와 마주치는 시점을 결정하기 위한 기준으로 Bouguet와 Perona가 제안한 방법을 이용하였다<sup>[4]</sup>. Bouguet의 경우 능동 광원으로 환등기가 아닌 일반 램프와 막대기를 사용하였기 때문에 빔의 경계부분

에서의 밝기 변화의 기울어진 정도가 상대적으로 완만하였다. 하지만 우리의 경우 환등기를 사용하기 때문에 빔의 경계 부분에서의 밝기 변화가 급격하게 이루어진다. 이러한 경우 빔의 한쪽 면만 이용하여 3차원 복원 좌표값을 결정하는 것보다 빔의 양쪽 경계를 모두 이용하여 3차원 좌표값을 계산한 뒤 평균을 취하는 것이 3차원 복원 후 좀더 자연스러운 얼굴 모델링 결과를 얻을 수 있었다.

능동 광원으로 LCD 환등기를 이용하여 라이트 빔을 대상에 투사하는 경우 빔의 움직임은 컴퓨터의 의해 정확하게 제어될 수 있다. 이 경우 각 영상 내 빔의 움직임은 시간 불변(time invariant)이므로 앞에서 기술한 시공간적 방법은 시간적 처리와 공간적 처리로 분리될 수 있다. 본 논문에서는 이러한 빔의 시간 불변속 성질을 이용하여 빔의 공간적 정보를 계산함으로써 빔의 형태(수직 또는 수평 빔)에 관계없이 정확하게 라이트 빔의 경계를 미리 측정할 수 있는 라이트 빔 캘리브레이션(light beam calibration) 방법을 제안하였다.

각 화소(pixel)가 겪는 밝기 변화의 동적 범위를 기준으로 영상을 나누어 처리하는 지역 분할 기법을 도입하여 머리카락 부분과 얼굴 부분에서 서로 다른 반사 특성을 고려하였고 또한 다중 빔(multi-beam)을 도입하여 3차원 형상 복원에 필요한 2차원 영상의 수를 줄였으며 이를 통해 고속 3차원 스캔이 가능하도록 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 II장에서는 본 논문에서 제안하는 3차원 얼굴 형상 모델링 방법의 전체적인 시스템 구성을 살펴보고 지역적 정보와 시간적 정보를 함께 이용하여 라이트 빔의 경계를 검출하는 시공간적 경계 검출 방법과 라이트 빔 캘리브레이션에 대해 기술한다. III장에서는 본 논문에서 제안하는 다중 빔과 지역 분할 기법에 관해 기술한다. IV장에서는 본 논문에서 제안한 방법을 실제 사람 얼굴 실험에 적용하고 그 결과를 분석함으로써 제안한 방법의 타당성을 검증하고 V장에서는 토의와 결론을 맺는다.

## II. 3차원 얼굴 형상 모델링 시스템 구성

본 논문에서 제안하는 3차원 얼굴 형상 모델링을 위한 시스템 구성도가 그림 1에 나타나 있다. 3차원 얼굴 형상 모델링 시스템을 구성하고 있는 각 블록 별 기능은 다음과 같다.

카메라 캘리브레이션은 카메라 내부의 특성을 규정

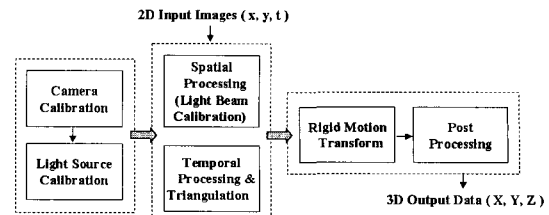


그림 1. 3차원 얼굴 형상 모델링을 위한 시스템 구성도  
Fig. 1. System block diagram for 3-D face modeling.

짓는 변수(intrinsic parameter)와 카메라 기준 좌표계와 기준 평면(reference plane)을 기술하는 기준 좌표계 사이의 관계(rotation matrix, translation matrix)를 규정짓는 외부적 파라미터(extrinsic parameter)를 구하는 과정이다<sup>[8]</sup>. 광원 캘리브레이션(light source calibration)은 환등기의 광원의 위치 좌표를 계산하는 과정으로써 기준 평면 위에 적당한 크기의 막대를 수직으로 세운 뒤 이때 생기는 그림자를 이용하여 구한다<sup>[4]</sup>. 이 캘리브레이션 과정은 카메라, 환등기, 기준 평면이 결정된 후 한번만 수행된다.

환등기를 이용하여 획득한 2차원 영상 내 각 화소들에 대해 시공간적인 라이트 빔 경계 측정을 적용하여 각 화소들이 만나게 되는 광 평면을 결정한다. 이 때 본 논문에서 제안하는 지역 분할 기법을 이용하여 잘못된 시점에서 광 평면과 만날 수 있는 화소들을 검출한 뒤 이를 제외한 나머지 화소들에 대해서만 능동적 삼각 측량법을 적용하여 3차원 좌표값을 계산하게 된다.

이렇게 계산된 3차원 좌표값들은 카메라 기준 좌표계에 의한 좌표값을 갖게 된다. 이들 좌표값에 대해 기준 평면 좌표계를 기준으로 한 좌표값을 얻기 위해서 앞선 카메라 캘리브레이션 과정에서 구한 외부적 파라미터를 이용하여 강체 변환(rigid motion transform)과정을 거치게 된다.

강체 변환 후 기준 평면 좌표계로 변환된 각 3차원 좌표값에 대해서 후처리를 하게 된다. 후처리는 지역 분할 정보를 이용하여 잘못된 광 평면과 만나는 화소와 3차원 좌표값을 갖지 못하는 화소에 대해 근접하는 3차원 좌표값을 이용하여 선형 보간 하는 과정과 잡음에 의해 발생할 수 있는 z축으로의 오차를 보상하기 위한 메디안 필터링 과정으로 이루어진다.

다음은 라이트 빔 경계 측정을 위해 사용된 시공간적인 방법과 LCD 환등기를 사용하는 경우 빔의 공간적인 정보를 미리 계산할 수 있는 라이트 빔 캘리브레

이선 과정에 대해서 기술한다.

1. 라이트 빔 경계 측정

본 논문에서 사용한 라이트 빔 경계 측정은 2차원 영상의 각 화소(pixel)가 시간적으로 몇 번째 영상의 광 평면상에 존재하는 지를 결정하는 시간적 처리(temporal processing)와 영상 내 라이트 빔 패턴의 경계를 검출하여 이로부터 광 평면의 방정식을 구하는 공간적 처리(spatial processing)로 이루어진다.

그림 2에서 알 수 있듯이 기준 평면 위에 x축으로 고정된 관찰선(ref\_left, ref\_right)을 따라 화소의 밝기 변화를 이용하여 라이트 빔 경계의 x, y 위치 정보를 알아 낼 수 있다. 일단 왼쪽 관찰선(ref\_left)과 오른쪽 관찰선(ref\_right)상의 경계의 위치 정보를 알아내면 두 점을 연결하는 직선( $\lambda$ )의 방정식을 구할 수 있다. 카메라 캘리브레이션 과정을 통해 구한 기준 평면의 방정식과 광원 캘리브레이션을 통해 계산된 광원의 위치 좌표를 이용하면 각각의 라이트 빔의 경계를 포함하는 광 평면의 방정식을 구할 수 있다<sup>[4]</sup>.

관찰선을 따라 각 화소의 밝기 변화 추이를 이용하여 라이트 빔의 경계를 검출하기 위한 기준값(threshold)은 다음과 같다.

$$\begin{cases} I_{\min}(x, y) = \min_t \{I(x, y, t)\} \\ I_{\max}(x, y) = \max_t \{I(x, y, t)\} \end{cases} \quad (1)$$

$$I_{\text{threshold}}(x, y) = \frac{1}{2} (I_{\max}(x, y) + I_{\min}(x, y)) \quad (2)$$

$$\Delta I(x, y, t) = I(x, y, t) - I_{\text{threshold}}(x, y) \quad (3)$$

식 (1)은 주어진 화소 좌표(x, y)에 대해 그 화소가 영상 간(inter frame)에 시간적으로 겪는 밝기 변화 중 최대값과 최소값을 나타낸다. 식 (2)는 각각의 화소에 대해 앞에서 구한 최대 밝기값과 최소 밝기값의 평균 값을 그 화소의 문턱값(threshold value)으로 정의한다.

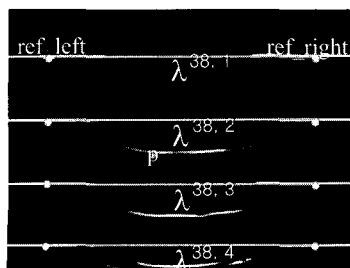


그림 2. 라이트 빔 경계 측정  
Fig. 2. Detection of light beam boundaries.

식 (3)은 각 영상의 (x, y) 좌표상에 존재하는 화소의 밝기 값과 문턱값과의 차이를 나타낸다. 이때  $\Delta I(x, y, t) = 0$ 이 되는 영상 내의 위치를 라이트 빔의 경계로 정의한다.

영상 내 임의의 화소 p가  $t_0$  프레임과  $t_0+1$  프레임 사이의 시점에서 문턱값을 가로지르는 경우 다음의 관계를 만족시킨다.

$$t_0 < t_s(\overline{x_c} = p) < t_0 + 1 \quad (4)$$

여기서  $t_s(\overline{x_c})$ 는 영상 내에 임의의 화소  $\overline{x_c}$ 가 광 평면과 만나는 시점을 나타낸다. 식 (4)에서  $t_s(\overline{x_c})$ 는 sub-integer 단위이며 이는 다음의 관계식에 의해 결정된다.

$$t_s(\overline{x_c}) = t_0 + \delta t \quad (5)$$

여기서

$$\delta t = \frac{\Delta I(x_c, y_c, t_0)}{\Delta I(x_c, y_c, t_0) - \Delta I(x_c, y_c, t_0 + 1)} \quad (6)$$

이다. 이때 화소  $\overline{x_c}$ 를 포함하는 광 평면의 방정식은 선형 보간을 이용하여 다음의 식으로 주어진다<sup>[7]</sup>.

$$\Pi_L(t_s(\overline{x_c})) = (1 - \delta t)\Pi_L(t_0) + \delta t\Pi_L(t_0 + 1) \quad (7)$$

2. 라이트 빔 캘리브레이션

카메라와 환등기의 위치가 고정된 상태에서 컴퓨터를 이용하여 LCD 환등기를 제어하는 경우 각 영상간 빔의 움직임은 시간 불변(time invariant)의 특징을 갖는다. 즉, 빔을 항상 일정한 방식으로 움직여서 획득한 영상 내 각 빔의 위치는 획득 시간과 대상에 관계없이 항상 일정하게 보존될 것이다. 다음 그림 3은 빔의 시간 불변성을 보여준다.

그림 3의 (a)와 (b)는 대상이 없는 경우 빔을 일정한 간격으로 오른쪽으로 움직이며 획득한 처음 영상과 끝 영상을 나타내며 그림 3의 (c)와 (d)는 대상이 있는 경우 획득한 처음 영상과 끝 영상을 나타낸다. (a)와 (c), (b)와 (d)에서 서로 대응되는 각 빔의 위치는 동일함을 알 수 있다. 즉 빔의 시불변성이 성립함을 알 수 있다. 그림 3의 (c)와 (d)에서 볼 수 있는 것과 같이 수직빔의 경우에는 수평빔과는 달리 빔이 기준 평면 위에 투영되는 부분이 사람 목에 의해 가리기 때문에 라이트 빔 경계 검출을 위한 관찰선을 정하기가 쉽지 않다.

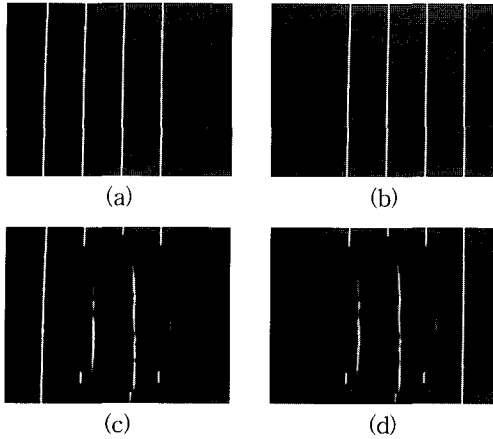


그림 3. 빔의 시간 불변성. 대상 없이 기준 평면상에 빔을 이동시키며 획득한 (a) 첫 번째 영상과 (b) 마지막 영상, 대상이 존재하는 경우 빔을 이동시키며 획득한 (c) 첫 번째 영상과 (d) 마지막 영상

Fig. 3. Time invariant property of light beam patterns. Images obtained with no target: (a) the first frame and (b) the last frame. Image with target : (a) the first frame and (b) the last frame.

하지만 앞에서 언급한 빔의 시불변성을 이용하면 대상이 없는 상태에서 빔을 기준 평면 위에 투영(그림 3의 (a)와 (b)하여 빔의 경계 정보를 미리 계산(공간적 프로세싱)할 수 있다. 즉, 모든 영상에 대하여 빔 캘리브레이션을 적용하는 일반적인 방법과는 달리 본 논문에서 사용한 라이트 빔 캘리브레이션은 실험 환경이 결정되면 실제 대상을 포함하는 영상을 획득하기 이전에 한번만 수행하면 된다. 그 후 실제 영상에 대해서는 시간적 프로세싱만 적용하여 3차원 형상좌표를 계산할 수 있다.

이러한 라이트 빔 캘리브레이션을 적용할 경우 관찰선의 위치는 대상에 의해 영향을 받지 않으므로 다수의 관찰선을 이용하여 빔 경계를 추출한 뒤 이것을 이용하여 빔의 직선의 방정식을 계산(최소 자승 오차 관점)한다면 더욱 정확한 광 평면의 방정식을 얻을 수 있다.

### Ⅲ. 다중 빔과 지역 분할 기법

이제 본 논문에서 제안하는 3차원 얼굴 형상 모델링 기법에서 주사 속도와 정확도를 향상시키기 위하여 사용한 다중 빔(multi-beam) 방법과 지역 분할 기법(region-segmentation)을 이용한 3차원 얼굴 형상 모델

링 방법에 대해 기술하도록 하겠다. 다중 빔은 한 영상 내에 다수의 라이트 빔 패턴을 투영하여 한 영상 당 복원할 수 있는 3차원 데이터량을 증가시키는데 그 목적이 있다. 이를 통해 고속 3차원 스캔이 가능하다. 지역 분할 기법은 3차원 복원 대상 표면의 반사 특성을 고려하여 영상의 화소를 지역적으로 나누어 처리하는 방법이다. 이를 통해 동적 범위(dynamic range)가 상대적으로 낮은 머리카락 부분에서도 효과적으로 3차원 좌표를 복원하고 모델링 할 수 있다.

#### 1. 다중 빔을 이용한 주사법

3차원 형상 복원을 위한 2차원 데이터를 얻는 경우 카메라 가시 영역 내에서 빔을 일정한 간격으로 조금씩 이동시키며 그때마다 영상을 얻게 된다. 빔의 너비를  $d$ , 영상간 빔이 움직이는 폭을  $\omega$ (LCD 환등기를 사용하는 경우 모니터를 기준으로 한 화소단위), 처음과 마지막 영상간 빔의 전체 움직임 폭을  $W$ (모니터를 기준으로 한 화소 단위), 한 영상 안에서 사용한 빔의 개수를  $B$ 라 하면  $B = 1$ 인 경우 전체 영상 수  $N$ 은 다음의 관계를 만족한다.

$$N = \frac{W}{\omega}, \quad (d > \omega) \quad (8)$$

$B \geq 2$ 인 빔들 사이의 간격이 일정한 다중 빔을 사용하는 경우 전체 영상 수  $N_m$ 은 다음의 관계를 만족한다.

$$N_m = \frac{N}{B} + \alpha \quad (9)$$

참고로 그림 3은  $B=4$ 인 경우이며,  $B=1$ 인 경우에 비하여 4배 빠른 속도로 전체 영역을 주사할 수 있다. 라이트 빔 경계 검출을 위해 시공간적 방법을 사용하는 경우 식 (8)에  $\alpha$ 항이 없다면 처음 영상 내에  $i+1$ 번째 빔과 마지막 영상 내에  $i$ 번째 빔 사이에 불연속 영역이 발생하게 된다. 여기서  $1 \leq i \leq N_m - 1$ 이다.  $\alpha$ 는 1 이상의 정수이며  $\alpha$ 가 증가할수록 경계에서 중첩되는 빔의 수는 증가하게 된다.

식 (8)과 식 (9)로부터 다중 빔의 경우 처음과 마지막 영상간 빔의 전체 움직임 폭  $W_m$ (화소 단위)은 다음과 같다.

$$W_m = \frac{W}{B} + \alpha \omega \quad (10)$$

#### 2. 지역 분할 기법

다중 라이트 빔을 이용하여 얻은 영상으로부터 각

화소의 3차원 좌표값을 복원하기 위해서는 각 화소가 어느 광 평면과 만나는지를 찾는 과정이 필요하며 이는 공간적 처리와 시간적 처리로 구성되어 있다. 앞에서 언급하였듯이 공간적 처리는 각 영상 내에 고정된 관찰선을 따라 화소의 밝기 변화를 관찰하여 빔의 경계를 검출한 뒤 그 경계를 포함하는 광 평면의 방정식을 구하는 과정이다. 한편, 시간적 처리는 영상 내 각 화소들이 앞의 공간적 처리에서 구한 광 평면 중 어디에 포함되는 지를 결정하는 과정이며 이 경우 각 화소가 시간적으로 겪는 밝기 변화를 이용하여 광 평면을 결정하게 된다. 본 논문에서는 영상내 각 화소에 시간적 처리를 적용한 후 각 화소들을 다음과 같은 두 가지 그룹으로 분류하였다.

- A) 활동적 화소들(active pixel)
- B) 고아 화소들(orphan pixel) 혹은 소극적 화소들(passive pixel)

활동적 화소는 시간적 처리를 통해 어느 광 평면에 속하는지가 결정되는 화소를 말한다. 반면 고아 화소는 시간적 처리 후에 어느 광 평면에 속하는지 결정할 수 없는 화소이다. 따라서 고아 화소의 경우 정확한 3차원 좌표를 복원할 수 없다.

고아 화소의 경우 상대적으로 동적 범위가 작은 값을 가지며 이는 공간상에서 상대적으로 빔이 잘 와 닿지 않는 곳에 위치하거나 반사 특성이 좋지 않은 곳에 위치하는 것을 의미하는 것으로 볼 수 있다.

본 논문에서는 고아 화소와 활동적 화소를 구분하기 위한 기준으로 시간적 프로세싱을 할 때 각 화소의  $\Delta I(x, y, t)$ 가 0을 가로지르는 횟수를 이용하는 방법을 제안한다. 정상적인 활동적 화소라면 -에서 +로 0을 가로지르는 경우가 한 번 발생하게 된다. 만약 활동적 화소 중  $\alpha$  항에 의해 빔이 중첩되는 위치에 존재하는 화소라면 -에서 +로 0을 가로지르는 시점이 두 번까지 발생할 수 있다. 하지만 세 번 이상 -에서 +로 0을 가로지르는 경우가 발생한다면 최대 두 가지 경우를 제외한 나머지 제로 교차(zero crossing)는 잘못된 시점에서 화소가 광 평면과 만나는 것을 의미하며 본 논문에서는 이러한 특성을 가지는 화소를 고아 화소라고 정의한다. 영상 내 임의의 화소  $p(x, y)$ 의  $\Delta I(x, y, t)$ 가 -에서 +로 0을 가로지르는 횟수를  $\#ZC(p)$ 라 하면 고아 화소의 집합  $OP$ 를 다음과 같이 정의된다.

$$OP = \{p(x, y) \mid \#ZC(p) \geq 3\} \quad (11)$$

이때 고아 화소들이 가지는 동적 범위 중 최대값( $\beta$ )을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\beta = \max_p \{I_{dynamic}(p)\}, \quad p \in OP \quad (12)$$

그림 4는 -에서 +로 제로 교차가 한번 발생하는 활동적 화소, 두 번 발생하는 빔의 중첩 지역에 위치하는 활동적 화소, 세 번 이상 발생하는 고아 화소의  $\Delta I(x, y, t)$ 를 나타낸다. 횡단기를 이용하여 라이트 빔 패턴을 얼굴에 비추어 영상을 얻는 경우 각 영역별 화소들의 동적 범위( $I_{max}(x, y) - I_{min}(x, y)$ )는 그 영역의 반사 특성과 상대적인 위치에 따라 다른 값을 가진다.

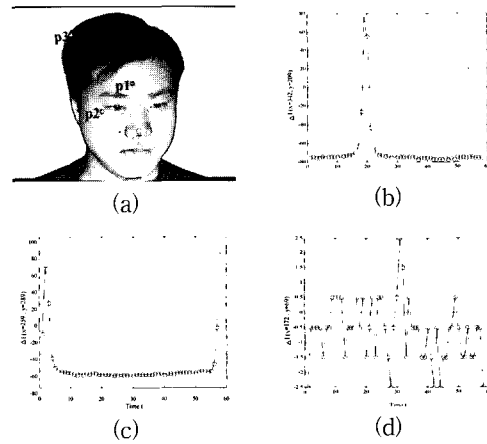


그림 4. 활동적 화소와 고아 화소의 특성. (a) 활동적 화소 p1, p2와 고아 화소 p3. (b) p1의  $\Delta I(x, y, t)$ . (c) p2의  $\Delta I(x, y, t)$ , (d) p3의  $\Delta I(x, y, t)$ .

Fig. 4. Properties of active and orphan pixels. (a) Active pixels p1 and p2 and an orphan pixel p3. (b)  $\Delta I(x, y, t)$  for p1. (c)  $\Delta I(x, y, t)$  for p2. (d)  $\Delta I(x, y, t)$  for p3.

그림 5는 다중 빔( $B = 4, \omega = 2$  화소 간격,  $N_m = 58$ 장)을 이용하여 사람을 대상으로 얻은 크기가  $640 \times 480$ 인 2차원 영상들의  $I_{max}(x, y)$ 와  $I_{min}(x, y)$ 를 구한 뒤 8 bit로 표시한 영상이다. 영상 내에  $y = 100, 200, 300, 400$ 로 각각 고정된 수평선 상에 존재하는 화소들의 동적 범위를 그림 6에 나타내었다. 머리카락, 볼, 입술, 이마 등 각 얼굴 영역에 따라 서로 다른 동적 범위를 갖는 것을 확인할 수 있다.

그림 6에서 보는 바와 같이 영상 내 각 화소들이 지역마다 서로 다른 동적 범위를 갖는다는 사실을 바탕으로 다음과 같은 평균 동적 범위 ( $I_{mean\_dynamic}$ )와 앞

에서 정의한  $\beta$ 를 이용한 지역 분할 조건을 다음과 같이 제안한다.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Shadow zone} \\ \text{Hair zone} \\ \text{Active zone} \end{array} \right. \begin{array}{l} R_d(x, y) < \beta \\ \beta \leq R_h(x, y) < I_{\text{mean\_dynamic}}/\gamma \\ R_a(x, y) \geq I_{\text{mean\_dynamic}}/\gamma, (\gamma \geq 1.0) \end{array}$$

$$I_{\text{min\_dynamic}} = \sum_{y=1}^{N_y} \sum_{x=1}^{N_x} I_{\text{dynamic}}(x, y) / N_x N_y \quad (13)$$

여기서  $N_x$ 와  $N_y$ 는 영상의 크기를 나타낸다. 즉,  $N_x$ 는 열(column)의 개수,  $N_y$ 는 행(row)의 수를 나타낸다.  $\beta$ 는 앞에서 정의한 고이화소들 중 최대 동적 범위를 나타내며  $\gamma$ 는 머리카락 영역(hair zone)과 활성 영역(active zone)을 구분하기 위한 문턱값을 결정하기 위한 계수이다. 그림 5에 나타난 영상에 대해서  $\beta = 6$ ,  $\gamma = 1.8$  그리고  $\beta = 6$ ,  $\gamma = 3.0$ 인 경우 지역을 분할한 결과를 그림 7에 각각 나타내었다.

그림 7은 동적 범위가 작은 그림자 영역(검은색)과 상대적으로 동적 범위가 큰 얼굴, 목, 뒤 기준 평면 흰색)등의 활성 영역 그리고 그림자 영역과 활성 영역의 중간 동적 범위를 갖는 머리카락 영역(회색)을 나타낸다.  $\gamma$ 가 1.8에서 3.0으로 증가하는 경우 그림 7(b)과 같

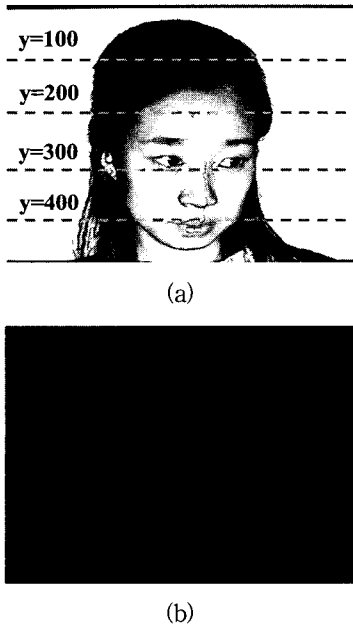


그림 5. 화소밝기에 따른 분류 (a) 최대화소 밝기 (b) 최소 화소 밝기  
Fig. 5. Classification of pixels based on brightness. (a) Maximum brightness image. (b) Minimum brightness image.

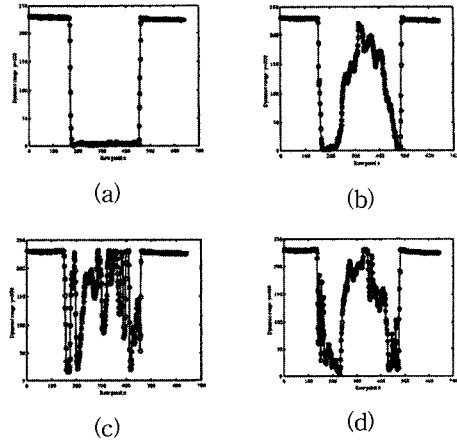


그림 6. 각 영역별 동적 범위의 변화. (a)  $y = 100$ , (b)  $y = 200$ , (c)  $y = 300$ , (d)  $y = 400$ 인 수평선상에 존재하는 화소들의 동적 범위 변화  
Fig. 6. Dynamic ranges of different regions. Dynamic range plots of pixels on the horizontal lines along (a)  $y=100$  (b)  $y=200$ , (c)  $y=300$  and (d)  $y=400$ .

이 활성 영역이 증가함을 볼 수 있다.

3. 지역 분할 정보를 이용한 3차원 얼굴 형상 모델링  
사람 얼굴을 대상으로 한 3차원 얼굴 형상 복원에

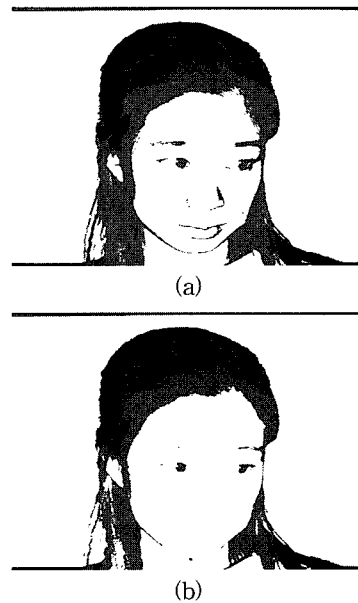


그림 7. 지역 분할 결과 (a)  $\beta = 6$ ,  $\gamma = 1.8$ . (b)  $\beta = 6$ ,  $\gamma = 3.0$ .  
Fig. 7. Region segmentation results. (a)  $\beta=6$  and  $\gamma=1.8$ . (b)  $\beta=6$  and  $\gamma=3.0$

있어 마주치게 되는 문제 중 하나는 머리카락 부분에서 얼마나 많은 데이터를 정확하게 복원할 수 있는가에 있다. 앞선 실험에서 알 수 있듯이 머리카락 부분에서의 동적 범위는 얼굴 부분에 비해 상대적으로 낮다.

각 영상에 대해 공간적인 방법으로만 머리카락 부분의 경계를 검출하여 3차원 복원을 한다면 머리카락 부분에서 화소들의 동적 범위가 작기 때문에 검출할 수 있는 경계수가 제한되며 따라서 복원할 수 있는 3차원 데이터 양은 적을 것이라 생각된다. 반면 앞에서 설명한 시공간적인 방식으로 각 화소의 광 평면을 결정하는 경우는 상대적으로 작은 동적 범위를 가지는 머리카락 부분에서도 많은 데이터를 복원할 수 있다. 영상 내 각 화소는 식 (13)에 의해서 세 가지 영역 중 하나에 속하게 된다. 그림자 영역에 속하는 화소는 동적 범위가 매우 작으며 따라서 앞서 보았듯이 고아 화소가 될 확률이 매우 크다. 따라서 그림자 영역에 속하는 화소는 능동적 삼각 측량(active triangulation) 과정에서 제외되며 따라서 3차원 복원값을 갖지 못한다. 이에 반해 동적 범위가  $\beta$  보다 큰 머리카락 영역과 활성 영역에 속하는 화소들의 경우 유일하게 광 평면을 결정할 수 있으므로 이 영역에 속하는 모든 화소들에 대해서 3차원 복원값을 구할 수 있다. 즉, 앞서 정의한 지역 분할 기법을 이용할 경우 고아 화소는 그림자 영역에 포함되며 활동적 화소는 머리카락 영역과 활성 영역에 포함됨을 알 수 있다. 일단 머리카락 영역과 활성 영역에 속하는 화소들의 3차원 복원값이 결정되면 이를 바탕으로 그림자 영역에 속하는 화소의 좌표값을 3차원 선형 보간을 할 수 있다.

실험에서 사용하는 라이트 빔이 일정한 폭을 가지는 경우 경계에서 빔의 단절현상이 발생하기 때문에 그 단절면과 만나는 화소의 경우 잘못된 시점의 광 평면을 결정하게 되고 이는 3차원 복원값의 오차로 나타나게 된다. z축으로 오차를 가지는 3차원 복원값은 메디안 필터링(median filtering) 과정<sup>[9]</sup>을 통해서 교정할 수 있다. 본 논문에서 사용한 메디안 필터는 x축과 y축 방향으로 일정한 크기를 갖는 이차원 창이 아니라 x축과 y축 중 한 방향으로만 크기가 5인 일차원 창을 사용하였다.

#### IV. 실험 결과

실험에 사용된 카메라는 Pulnix사의 CCD 카메라이

고 환등기는 NEC사의 MultiSync MT830 LCD 환등기이다. 모니터를 통해 다중 라이트 빔 ( $B = 4, \omega = 2$  화소,  $\alpha = 2$  장,  $N_m = 58$  장)을 일정한 간격으로 생성시키면 프로젝터를 통해 다중 라이트 빔 패턴이 사람 얼굴에 비추게 된다. 이때 CCD 카메라가 각각의 라이트 빔 패턴과 동기가 되어  $N_m$  개의 영상을 메모리에 저장하게 된다.

1. 카메라 캘리브레이션과 광원 캘리브레이션 결과  
 카메라 캘리브레이션을 위하여 가로 세로가 각각 30mm인 정사각형의 체크 판(checkerboard)을 이용하여 모두 5장의 영상을 취득하였다. 첫 번째 영상은 체크 판이 기준 평면상에 위치하게 하고 나머지 4장의 영상은 체크 판을 상하 좌우로 기울여서 획득하였다. 광원 캘리브레이션을 위해서는 높이 138 mm인 12개의 막대기를 수직으로 세운 광원 캘리브레이션 용 판넬을 별도로 제작하여 사용하였다. 표 1은 이번 실험에 사용한 카메라와 광원 캘리브레이션 결과를 나타낸다. 표 1에 나타난 카메라 캘리브레이션 값을 이용하여 체크 판 상에 격자 점 좌표(5장의 영상에 대해 모두 적용)를 카메라 영상의 화소단위로 리프로젝션(reprojection)시킨 결과와 원래 영상과의 오차는 x방향으로 0.12667, y방향으로 0.10606의 표준 편차(화소 단위)를 나타내었다. 한편 예측값  $\bar{S}_c$ 의 정확도를 판단하는 기준으로 광원의 위치 좌표에 대한 표준편차는  $\delta\bar{S} = [6.1407 \ 11.4593 \ 3.9210]$  (단위 : mm) 이다.

표 1. 카메라 캘리브레이션과 광원 캘리브레이션 결과

Table 1. Result of camera calibration and light source calibration.

Parameters	Estimates
$f_c$	$f_x = 1888.616067, f_y = 1716.433176$
$c_c$	$c_x = 358.194963, c_y = 247.700610$
$k_c$	-0.108517
$R_c$	$\begin{bmatrix} 0.999960 & -0.001247 & 0.008838 \\ -0.000471 & 0.981425 & 0.191844 \\ -0.008913 & -0.191840 & 0.981386 \end{bmatrix}$
$T_c$	$\begin{bmatrix} -216.589586 \\ -149.622255 \\ 1148.630103 \end{bmatrix}$
$\bar{S}_c$ (mm)	$\begin{bmatrix} 88.280287 \\ 214.308386 \\ -261.929652 \end{bmatrix}$



## 2. 3차원 얼굴 형상 모델링 실험 결과

첫 번째 실험에서는 라이트 빔의 한쪽 경계선만 이용할 때와 양쪽 경계선 모두를 이용하여 3차원 형상 좌표값을 계산한 뒤 평균을 취하였을 때 결과를 비교하였다. 여자 모델의 경우 지역 분할 조건으로  $\beta = 6$ ,  $\gamma = 1.8$ , 남자 모델의 경우 지역 분할 조건으로  $\beta = 7$ ,  $\gamma = 3.0$ 을 사용하였다. 그림자 영역(shadow zone)에 속하는 화소들의 3차원 좌표값은 인접한 그림자 영역에 속하지 않는 화소들의 좌표값을 3차원 선형 보간하

여 구하였다. 머리카락 영역(hair zone)에 속하는 화소들의 3차원 좌표값에 대해서 창 크기가 3인 1차원 저역 통과 필터를 통해 smoothing 효과를 주었다. 또한 창 크기가 5인 1차원 메디안 필터를 이용하여 z축으로의 에러를 보상하였다.

그림 8과 그림 9에서 볼 수 있듯이 라이트 빔의 양쪽 경계를 사용한 경우((d), (f))가 라이트 빔의 한쪽 면만을 사용한 경우((c), (e))보다 전체적으로 얼굴 세세한 부분까지 자연스럽게 표현하고 있는 것을 볼 수 있다.

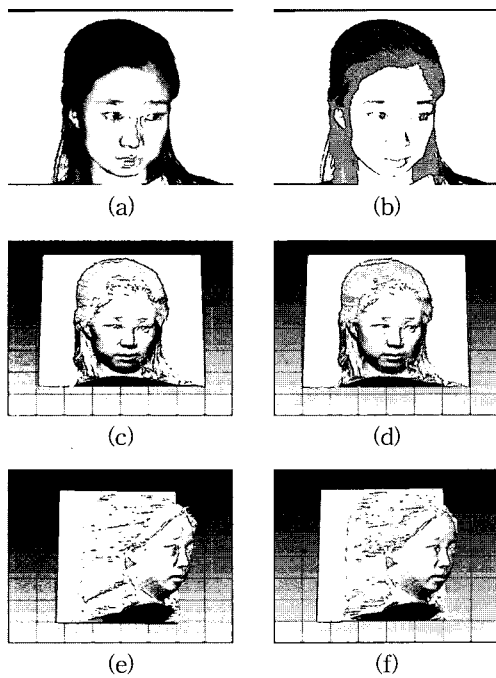


그림 8. 빔의 양쪽 경계를 이용한 경우와 빔의 한쪽 경계만을 이용한 경우의 실험 결과 비교(여자 모델). (a) 실험 대상, (b) 지역 분할 결과( $\beta = 6$ ,  $\gamma = 1.8$ ), (c) 라이트 빔의 한쪽 경계를 이용한 경우 정면에서 본 결과, (d) 라이트 빔의 양쪽 경계를 이용한 경우 정면에서 본 결과, (e) 한쪽 경계만 이용한 경우 왼쪽 측면에서 본 결과, (f) 양쪽 경계를 이용한 경우 왼쪽 측면에서 본 결과

Fig. 8. Experimental results for a female model with one and both beam boundaries being used : (a) picture of a lady model, (b) region segmentation result( $\beta = 6$ ,  $\gamma = 1.8$ ), 3D modeling results(front view) using (c) one boundary and (d) both boundaries of light beams, and 3D modeling results(side view) using (e) one boundary and (f) both boundaries of light beams.

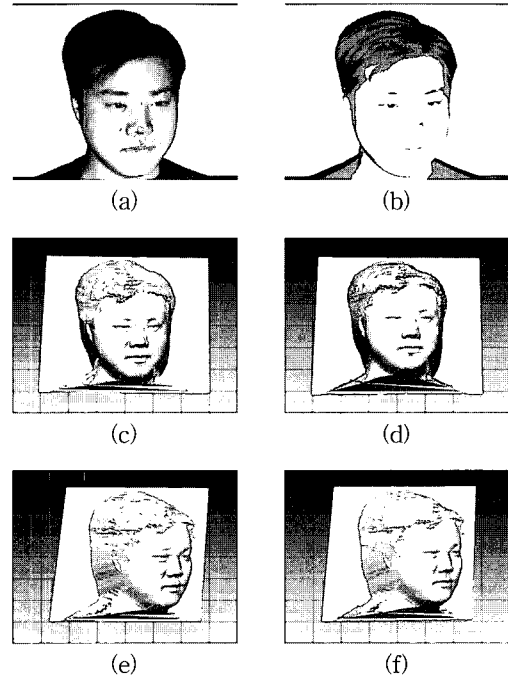


그림 9. 빔의 양쪽 경계를 이용한 경우와 빔의 한쪽 경계만을 이용한 경우의 실험 결과 비교(남자 모델). (a) 실험 대상, (b) 지역 분할 결과( $\beta = 7$ ,  $\gamma = 3.0$ ), (c) 라이트 빔의 한쪽 경계만 이용한 경우 정면에서 본 결과, (d) 라이트 빔의 양쪽 경계를 이용한 경우 정면에서 본 결과, (e) 한쪽 경계만 이용한 경우 왼쪽 측면에서 본 결과, (f) 양쪽 경계를 이용한 경우 왼쪽 측면에서 본 결과

Fig. 9. Experimental results for a male model with one and both beam boundaries being used : (a) picture of a male model, (b) region segmentation result( $\beta = 7$ ,  $\gamma = 3.0$ ), 3D modeling results(front view) using (c) one boundary and (d) both boundaries of light beams, and 3D modeling results(side view) using (e) one boundary and (f) both boundaries of light beams.

두 번째 실험(그림 10과 11)에서는 본 논문에서 제안한 지역 분할 기준에 의해 계산된  $\beta$ (여자 모델의 경우 = 10, 남자 모델의 경우 = 7)를 이용하여 지역 분할을 한 경우와 이보다 작은  $\beta$ (여자 모델의 경우 = 5, 남자 모델의 경우 = 3)를 이용하여 지역 분할을 한 경우에 3차원 형상 복원값을 얻는 지역 분할 조건으로 여자 모델의 경우  $\gamma = 1.8$ , 남자 모델의 경우  $\gamma = 3.0$ 을 이용하였으며 그림자 영역에 속하는 화소에 대해서는 인접한 머리카락 영역과 활성 영역에 속하는 화소들의 좌표값을 3차원 선형 보간 하여 계산하였다. 머리카락 영역(hair zone)에 속하는 화소들의 3차원 좌표값에 대해서 창 크기가 3인 1차원 저역 통과 필터를 통해 smoothing 효과를 주었으며 또한 창 크기가 5인 1차원 메디안 필터를 이용하여 z축으로의 오차를 보상하였다.

그림 10과 11에서 볼 수 있듯이 본 논문에서 제안한 지역 분할 기준을 이용하여 계산된  $\beta = 10$ (여자 모델),  $\beta = 7$ (남자 모델) 을 이용하여 지역 분할을 한 경우 이보다 작은  $\beta = 5$ (여자 모델),  $\beta = 3$ (남자 모델)을 이용하여 지역 분할을 한 경우보다 머리카락 경계 부분 등에서 z축으로의 오차가 적게 발생함을 알 수 있다.  $\beta$ 가 감소함에 따라 그림 10 (c)와 그림 11 (c)에서 알 수 있듯이 그림자 영역(검은색)은 감소하게 된다. 즉,  $\beta = 10$ (여자 모델),  $\beta = 7$ (남자 모델)인 경우 그림자 영역에 속하는 고아 화소들 중 일부가  $\beta = 5$ (여자 모델),  $\beta = 3$ (남자 모델)인 경우에는 머리카락 영역(회색)으로 포함되게 된다.  $\beta$ 가 감소함에 따라 머리카락 영역으로 새롭게 편입된 고아 화소에 대해서는 잘못된 시점에서 라이트 빔 경계 대응이 발생할 수 있고 이것

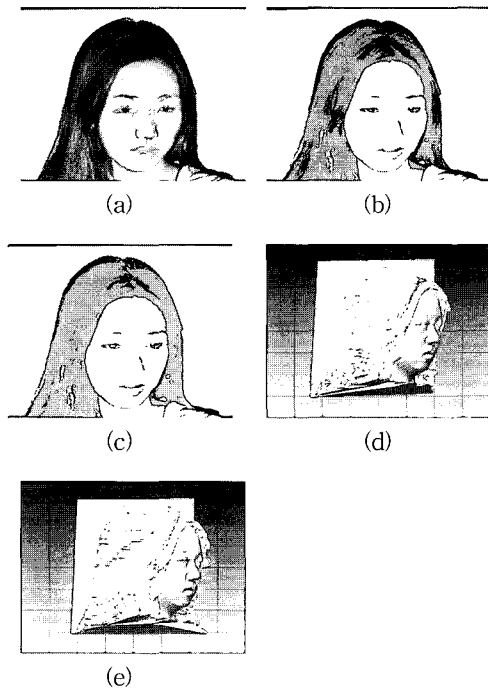


그림 10. 지역 분할 조건  $\beta$ 의 감소에 따른 3차원 형상 복원값의 비교(여자 모델) (a) 실험대상, (b)  $\beta=10$ 일 때 지역 분할 결과, (c)  $\beta=5$ 일 때 지역 분할 결과, (d)  $\beta=10$ 일 때 측면에서 본 결과, (e)  $\beta=5$ 일 때 측면에서 본 결과

Fig. 10. Comparison of 3D modeling results when decreasing  $\beta$  (female model case) : (a) picture of a model, region segmentation results for (b)  $\beta=10$  and (c)  $\beta=5$ , and 3D modeling results(side view) for (d)  $\beta=10$ , (e)  $\beta=5$ .

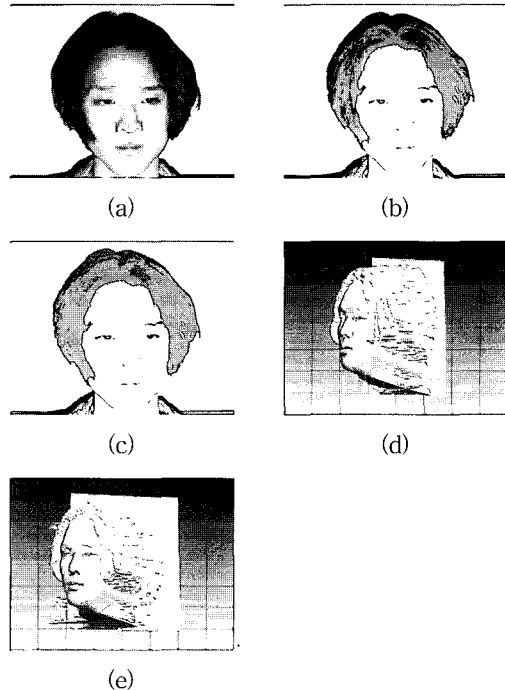


그림 11. 지역 분할 조건  $\beta$ 의 감소에 따른 3차원 형상 복원값의 결과 비교(남자 모델) (a) 실험 대상, (b)  $\beta = 7$ 일 때 지역 분할 결과, (c)  $\beta = 3$ 일 때 지역 분할 결과, (d)  $\beta = 7$ 일 때 측면에서 본 결과, (e)  $\beta = 3$ 일 때 측면에서 본 결과

Fig. 11. Comparison of 3D modeling results when decreasing  $\beta$ (male model case) : (a) picture of a model, region segmentation results for (b)  $\beta=7$  and (c)  $\beta=3$ , and 3D modeling results(side view) for (d)  $\beta=7$ , (e)  $\beta=3$ .

은 광학적 삼각 측량 후 3차원 좌표 복원값의 오차로 나타나게 된다.

세 번째 실험(그림 12)에서는 본 논문에서 제안한 지역 분할 기준에 의해 계산된  $\beta = 8$ 을 이용하여 지역 분할을 한 경우와 이보다 큰  $\beta = 12$ 를 이용하여 지역 분할을 한 경우에 3차원 형상 복원값을 비교해 보았다. 머리카락 영역과 활성화 영역을 나누는 지역 분할 조건으로  $\gamma = 3.0$ 을 이용하였으며 그림자 영역에 속하는 화소에 대해서는 인접한 머리카락 영역과 활성화 영역에 속하는 화소들의 좌표값을 3차원 선형 보간 하여 계산하였다. 머리카락 영역(hair zone)에 속하는 화소들의 3차원 좌표값에 대해서 창 크기 3인 1차원 저역 통과 필터를 통해 smoothing 효과를 주었으며 또한 창 크기가 5인 1차원 메디안 필터를 이용하여 z축으로의 에러를 보상하였다.

그림 12의 (b)와 (c)에서 볼 수 있듯이  $\beta$ 가 8에서 12로 증가함에 따라 머리카락 부분의 그림자 영역(검은색)이 증가함을 알 수 있다. 따라서  $\beta = 8$ 인 경우보다  $\beta = 12$ 인 경우, 머리카락에 속하는 화소들 중 시공간적인 처리를 이용하여 결정되는 3차원 복원 좌표값의 수는 감소하게 된다. 즉, 머리카락에 속하는 화소들에 대해서  $\beta = 8$ 인 경우보다  $\beta = 12$ 인 경우에 선형 보간을 하여 3차원 좌표값을 할당하게 되는 화소가 증가하게 되고 따라서 머리카락 영역에서 부자연스러운 3차원 형상 모델링 결과를 얻게 된다.

이상의 결과들로부터 본 논문에서 제안한 지역 분할 조건과 라이트 빔의 양쪽 경계를 모두 이용하는 방법을 사용함으로써 3차원 얼굴 형상 모델링의 성능을 향상시킬 수 있음을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

위 실험에서 사용된 다중 빔 ( $B = 4$ ,  $\alpha = 2$  장,  $N_m = 58$ )과 같은 빔 움직임 해상도(resolution) ( $\omega = 2$  화소)를 가지는 영상을 단일 빔으로 획득하기 위해서는 식 (9)에 의해서 모두  $N = 224$  장의 영상이 필요하다. 즉, 단일 빔을 사용하여 다중 빔과 동일한 해상도를 가지기 위해서 필요한 전체 영상 수는 다중 빔을 사용할 경우보다 증가하며 따라서 데이터 획득 시간도 증가하게 됨을 알 수 있다.

## V. 결론 및 추후 과제

본 논문에서는 지역 분할 정보와 다중 광 평면을 이용하여 3차원 얼굴 형상을 모델링 하는 방법을 제안하

였다. 지역 분할(활성 영역, 머리카락 영역, 그림자 영역)을 위한 기준으로 고아 화소와 평균 동적 범위를 이용한 방법을 제안하였다. 고아 화소들이 가지는 동적 범위 값 중 최대 동적 범위 값  $\beta$ 를 머리카락 영역과 그림자 영역을 나누는 기준으로 사용하는 경우 머리카락 부분에서 효과적으로 3차원 형상을 모델링 할 수 있음을 실험을 통해 검증할 수 있었다. 또한 라이트 빔의 한 쪽 경계만 이용하는 것보다 양쪽 경계를 모두 이용하는 경우 더욱 자연스러운 얼굴 형상을 복원할 수 있음을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

다중 광 평면을 이용하여 3차원 형상 모델링을 위해 필요한 전체 영상의 수를 줄일 수 있고 이를 통해 데이터 획득 시간도 줄일 수 있었다. 앞으로 한 영상 안에 다중 광 평면의 수를 가능한 많이 증가시킬 수 있다면 전체 필요한 영상의 수는 그만큼 감소하게 되고(이상적인 경우  $N_m = 2$ ) 이를 통해 고속 3차원 스캔이 가능할 것이다.

라이트 빔 캘리브레이션 과정을 도입하여 수직빔의 경우에도 대상의 위치에 관계없이 정확히 라이트 빔의 경계를 검출할 수 있도록 하였다.

결론적으로 본 논문에서 제안한 여러 가지 기법들(지역 분할 조건, 다중 빔, 양쪽 경계 이용 등)을 3차원 형상 복원에 적용할 경우 향상된 3차원 얼굴 형상 모델링 결과를 얻을 수 있음을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

현재의 실험에서 카메라는 하나의 고정된 위치에서 영상을 획득하기 때문에 한정된 카메라 가지 영역 외의 지역에서는 3차원 형상을 복원할 수 없었다. 전체 3차원 형상을 포함할 수 있도록 둘 이상의 위치에서 영상을 획득한 뒤 3차원 복원값을 합쳐 전 방향(omni-direction)의 3차원 얼굴 형상을 모델링 할 수 있는 연구가 앞으로 이루어져야 할 것이다. 또한 3차원 얼굴 형상 복원값의 오차에 대한 정량적인 분석과 함께  $\beta$ 와  $\gamma$ 와 같은 변수값들의 자동 추출을 위한 연구가 이루어져야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] R. Klette, K. Schlüns and A. Koschan, ComputerVision : Three-Dimensional Data from Images, Springer Verlag pp.347~376 ,1998.
- [2] M. Trobina, "Error model of coded-light range

- sensor”, Technical Report BIWTR-164, ETH-Zentrum, 1995.
- [3] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration”, Technical Report MSR-TR-98-71, Dec. 1998.
- [4] J.-Y. Bouguet and P. Perona, “3D photography on your Desk”, Proc. 6th Int. Conf. Computer Vision, pp. 43~50, Bombay, India, Jan. 1998.
- [5] J. F. Canny, “A computational approach to edge detection”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 8, no. 6, pp 679~698, 1986.
- [6] B. Curless and M. Levoy, “Better optical triangulation through spacetime analysis”, Proc. 5th Int. Cof. Computer Vision, pp. 987~993, MIT, Cambridge, MA, USA, June, 1995.
- [7] J.-Y. Bouguet, Visual Method for Three-Dimensional Modeling, Ph. D. thesis, California Institute of Technology, pp. 125~187, 1999.
- [8] J. Heikkila and O. silven. “A four-step camera calibration procedure with implicit image correction”, Proc. IEEE Computer Society Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1106~1112, 1997.
- [9] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital Image Processing, Addison-Wesley, pp. 191~195, 1992.

저 자 소 개



李 耀 翰(正會員)

1999년 2월 : 서강대학교 전자공학과 학사. 2001년 2월 : 서강대학교 전자공학과 석사. 2001년 2월~현재 : 락싸 기술 연구소에서 “USB를 이용한 생체 신호 계측용 다채널 베이스 시스템(Multi-Channel

Base System)” 개발 중



宋 泰 庚(正會員)

1984년 : 서강대학교 전자공학과 학사. 1985년 : 한국과학기술원(KAIST) 전기 및 전자공학과 석사과정 조기 졸업. 1990년 : 한국과학기술원(KAIST) 전기 및 전자공학과 박사. 1995년 6월~1997년 8

월 : Staff Scientist, Siemens Medical Systems, Inc., 1997년 9월~현재 : 서강대학교 전자공학과 부교수



趙 宙 顯(學生會員)

2000년 2월 : 서강대학교 전자공학과 학사. 2000년 3월 ~현재 : 서강대학교 전자공학과 석사과정