

## 구조화 조명(Structured Light)을 이용한 3차원 데이터의 획득 방법<sup>1)</sup>

전희성 · 박재홍 · 고문석  
컴퓨터공학과

### <요 약>

구조화 조명(structured light)을 사용하여 얻은 물체의 계조 화상을 처리하여 3차원 데이터를 얻을 수 있는 시스템을 구현하였다. 본 시스템은 영상 획득 카드에 연결된 CCD 카메라와 슬라이드 프로젝터, 화상 처리 및 가시화하는 부분을 포함한 여러 개의 프로그램으로 구성되어 있다.

3차원 데이터를 얻기 위해 필요한 카메라와 프로젝터의 캘리브레이션 과정 및 여러 단계의 화상 처리 과정에 대해 상세히 기술하였다. 몇 가지 물체에 대한 화상을 획득하여 처리한 실험 결과를 포함하였으며, 오차의 해석 결과 상당히 정밀한 데이터를 얻을 수 있었다. 계산된 3차원 데이터를 VRML 언어의 형태로 변환하는 간단한 프로그램을 작성하여 시각적으로 화면상에 재구성도 해 보았으며 보다 더 간편하고 경제적으로 3차원 데이터를 획득할 수 있는 시스템이 되기 위한 차후의 개선책에 대해서도 기술하였다.

---

## Three Dimensional Data Acquisition System Using Structured Light

Jun, Heesung · Park, JaeHong · Ko, MunSeok  
Department of Computer Engineering

### <Abstract>

Three dimensional data acquisition system based on the structured light is developed

---

1) 본 연구는 1996년도 울산대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음

in this work. The developed system is composed of CCD camera, slide projector, and various image processing programs. The calibration procedure of camera and projector is explained and several image processing steps which are necessary to get the range data are described also. Preliminary experimental result shows that the developed system may be used as a simple and cheap 3D data acquisition system.

## 1. 서 론

물체의 3차원 데이터를 정확하게 얻는 것은 여러 분야에서 다양한 이유로 필요하다. 예를 들어 3차원 물체의 인식, 물체의 모델링, 컴퓨터 그래픽스에서 물체의 생성과 애니메이션 등 많은 분야에서 3차원 데이터가 필요하다. 이러한 목적을 달성하기 위해 레이저, 초음파, 스테레오, 구조화 조명(structured light) 등 많은 거리 측정 기법(range finding technique)이 개발되었다.

컴퓨터 비전 시스템에서 많이 사용되고 있는 입력데이터 중에서 계조 화상(gray image)은 3차원 세계에 대한 정보를 많이 잃어버리게 되는데 반해, 깊이 화상(range image, depth image)은 물체 표면의 3차원 정보를 제공하므로, 표면 기하학적 성질에 의해 물체 형상의 묘사 및 인식을 쉽게 할 수 있는 장점이 있다. 이에 따라 최근 3차원 형상 묘사와 인식에 깊이 화상을 많이 사용하고 있다.

깊이 화상은 레이저 스캐너 등의 장비를 사용하여 얻을 수 있으며, 레이저를 이용한 3차원 데이터의 획득 방법은 고정밀도의 데이터를 얻을 수 있는 장점은 있으나, 비교적 고가이며, 또한 인체에 해로운 레이저의 사용으로 위험하다는 단점때문에 보편화되어 있지는 않다. 많은 학자들이 쉽고 경제적으로 3차원 데이터를 얻을 수 있는 방법에 대해 관심을 갖고 연구를 계속해 왔으며, 그 중에서도 생물학적으로 안전하고, 경제적이며, 사용하기 쉽고, 쉽게 설치할 수 있는 구조화 조명을 이용한 3차원 데이터 획득 시스템에 대해 많은 연구가 되어 왔다.

본 연구에서는 컴퓨터 비전 실험실에서 구조화 조명을 이용하여 간편하고 경제적으로 3차원 데이터를 얻을 수 있는 방법을 모색하였으며, 현존하는 여러 시스템들의 주요 특징을 살펴본 후 그 중의 하나를 모델로 삼아 그것을 개선하여 3차원 데이터 획득 시스템을 구현하였다.

2절에서는 구조화 조명의 개요 및 관련 이론에 대해 설명하며, 3절에서는 본 논문에서 구현한 시스템의 주요 특징에 대해 기술하였다. 4절에서는 구현한 시스템을 이용하여 화상을 획득하여 처리한 실험 결과에 대해 기술하였다. 마지막으로 본 논문에서 구현한 방법의 주요 특징과 앞으로의 개선방향에 대해 요약하였다.

## 2. 구조화 조명(Structured Light)의 개요 및 관련 이론

### 2.1 구조화 조명의 개요

구조화 조명은 둘 또는 그 이상의 카메라를 사용하는 스테레오 이미징 기법의 변형된 한 형태라 할 수 있다. 수동적인 스테레오 기법이 3차원 정보를 얻기 위해 두 대의 카메라를 사용하는데 반해, 구조화 조명 방법은 한 대의 카메라가 알고 있는 특정 패턴을 물체 표면에 투사하는 광원에 의해 대체된 능동적 기법이라는 것이 크게 다른 점이라 할 수 있다. 일반적인 구조화 조명 시스템의 개략도는 그림 1과 같다.

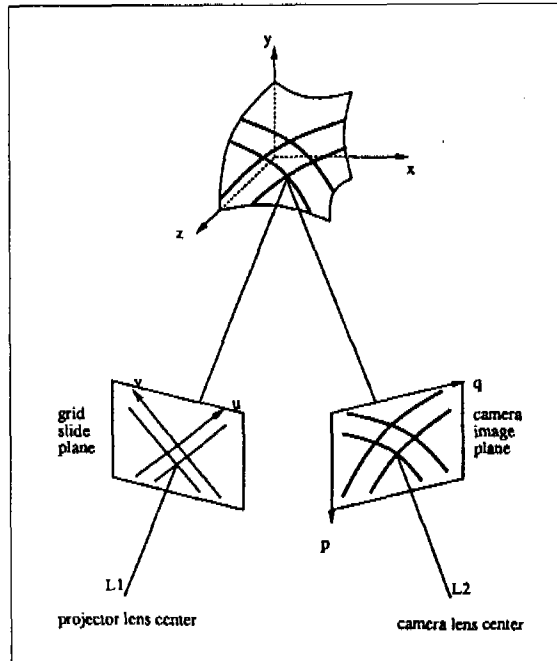


그림 1. 구조화 조명 시스템의 개략도

3차원 물체의 표면에 투사된 패턴은 물체 표면의 곡률 및 법선 벡터의 방향에 따라 왜곡되어 나타난다. 이러한 영상이 카메라에 의해 기록되며 이 왜곡이 물체의 부분적인 형상과 관련이 있으므로 이 왜곡으로부터 법선 벡터의 방향을 구하거나, 또는 패턴의 특정 위치를 찾고 그것에 대응되는 투사된 패턴의 위치를 찾아 삼각법(triangulation)에 의해 물체 표면의 3차원 정보를 얻는다.

구조화 조명을 3차원 데이터의 획득 기법으로 처음 사용한 사람들은 Will과 Pennington<sup>[3,4]</sup>이다. 그들은 평면에 투사된 패턴의 왜곡은 화상면에 대한 법선 벡터의 방향

과 위치의 함수라는 것을 이용해 다면체 각 평면의 위치와 방향을 얻는 방법을 개발하였다.

구조화 조명을 이용하여 3차원 데이터를 얻고자 할 때, 사용하는 2차원의 패턴에 바둑판처럼 동일한 모양이 반복되어 나타날 경우 투사된 패턴의 좌표값을 구하기가 쉽지 않다. 이 문제는 스테레오 비전의 대응점 문제(correspondence problem)와 유사하며 보통 그리드 레이블링 문제라 부르기도 한다. 이 문제를 해결하기 위해 여러 다양한 기법들이 개발되었다.

Le Moigne와 Waxman<sup>[5]</sup>은 바둑판 모양의 패턴 상에 몇 개의 표지를 사용함으로써 그리드 레이블링 문제를 해결하고자 하였다. 그들은 투사된 직선을 추출하는 데 LoG (Laplacian of Gaussian) 연산자를 사용하였으며 각 직선을 더 정확히 찾는 데 허프 (Hough) 변환을 이용하였다.

Hu와 Stockman<sup>[6]</sup>은 Marr와 Poggio의 유일 및 연속 제약조건(uniqueness & continuity constraint)을 확장한 기하학적 및 위상학적 제약조건(geometric & topological constraint)을 이용하여 레이블링 문제를 해결하는 방법을 제시하였다.

Keizer와 Dunn<sup>[7,8]</sup>은 위의 두 기법을 조합하여 그리드 레이블링 문제를 해결하였다. 그들은 표지와 인접한 교차점들의 정보를 이용하여 가중 그래프를 얻고 이것을 이용하여 좌표값을 구하였다. 그들의 방법은 표면이 완만하게 이루어진 물체에 대해서는 그리드 레이블링이 비교적 잘 되는 편이지만, 서로 떨어진 여러 개의 물체로 이루어진 장면에 대해서는 레이블링에 실패하여 데이터를 얻기가 힘들다는 단점이 있다.

Boyer와 Kak<sup>[9]</sup>은 장면에 대해 적, 녹, 청, 백색의 수직 띠로 구성된 패턴 그리드를 사용함으로써 색정보를 그리드 레이블링에 사용하였다. 여기서 각 색의 띠들은 이진 상관관계(binary correlator)를 사용하여 이웃한 색의 띠들과 구분한다.

Vuylsteke와 Oosterlinck<sup>[10]</sup>은 체스보드 형태의 패턴에 각 정사각형의 꼭지점 부근에 밝거나 어두운 점을 의사 잡음(pseudo-noise)의 형태로 배치한 패턴을 사용하여 부분적인 비트 패턴으로부터 바로 그리드 좌표값을 결정할 수 있게 하였다. 오류 수정 이진 코드(error-correcting binary code)를 이용하여 각 교점의 레이블링의 잘못을 줄일 수 있었다. 그들의 방법은 패턴을 만들기가 쉽지 않다는 단점을 갖고 있다.

이상과 같은 방법으로 그리드 레이블링의 문제를 해결하면 구조화 조명을 이용한 시스템은 대응점 문제(correspondence problem)를 풀기가 스테레오 방법보다는 쉬워진다. 또한 비교적 설치가 쉽고, 사용도 간편하며, 경제적인 장점이 있다. 그러나 광원을 제어해야 하므로 주로 실내에서만 사용이 가능하며, 깊이 정보의 범위에 제약이 있다는 단점도 있다.

## 2.2 화상의 형성 과정과 카메라 모델

3차원 공간의 한점  $(x, y, z)$ 가 화상면의 좌표  $(p, q)$ 에 대응될 경우, 바늘 구멍 카메라

모델을 사용하여 나타내면 그림 2와 같다. 이때  $f$ 는 카메라의 초점거리이다. 그림 2에서 삼각형의 닮음을 이용하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{fy}{f-z} = p \quad (1)$$

$$\frac{fx}{f-z} = q \quad (2)$$

화상 좌표  $p, q$ 가  $x, y, z$ 의 비선형 함수로 표시된 이 식은 원근 투영(*perspective projection*)을 나타낸다. 이 식과 그림 2에서 알 수 있듯이 같은 화상 좌표값을 갖는 3차원 공간 상의 점은 무수히 많다는 것을 알 수 있다.

위 식에서 사용하는 3차원 좌표계는 카메라 중심의 좌표계이고 보통 물체의 3차원 좌표는

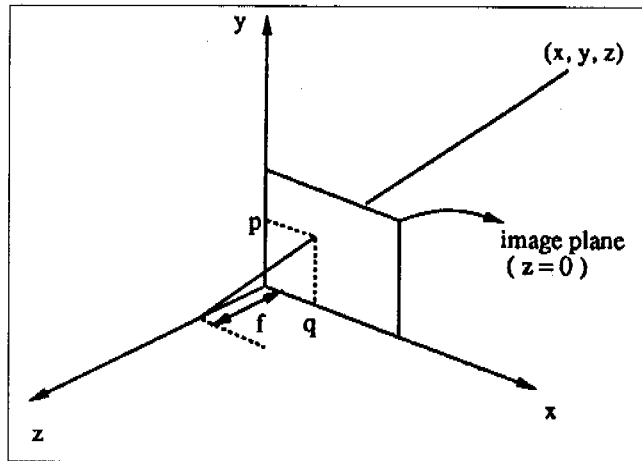


그림 2. 바늘구멍 카메라 모델

물체 중심 좌표계로 표시하는 경우가 많다. 이런 경우 일반적인 화상의 형성과정은 이상적인 바늘 구멍 카메라 모델이 사용될 경우 다음과 같은 연산이 연속적으로 이루어 진다.

- 물체 중심 좌표계와 카메라 중심 좌표계간의 이동 및 회전
- 카메라 화상 평면으로의 원근 투영 변환
- 크기 변환

위의 연산은 모두 행렬의 곱의 형태로 표시할 수 있으며, 만약 3차원 좌표계의 점  $(x, y, z)$ 가 화상 좌표  $(p, q)$ 에 대응된다면 그 관계는 다음과 같은 동차 좌표계 행렬의 곱의 형태로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} ap \\ aq \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $\alpha$ 는 배율(scale factor)이며  $3 \times 4$  행렬이 카메라 캘리브레이션 행렬이다.

### 2.3 카메라와 프로젝터의 캘리브레이션

카메라 캘리브레이션의 주요 목적은 3차원 좌표계와 대응하는 2차원 화상평면 좌표계간의 관계를 찾기 위한 것이다. 여기서 미지수  $c_{11}, c_{12}, \dots, c_{34}$ 는 카메라의 내부적 요소(카메라의 기하학적, 광학적 요소)와 외부적인 요소(물체 중심 좌표계에 대한 카메라의 위치와 방향등)가 영향을 미친다<sup>[1]</sup>.

식 (3)에서  $\alpha$ 를 소거하면  $p, q$ 와  $x, y, z$ 를 포함하는 두 개의 식이 되며 그것은 하나의 3차원 점과 그것에 대응되는 화상 좌표와의 관계를 표현한 것이다.

만약 6개 또는 그 이상의 동일 평면상에 있지 않은 3차원 좌표와 그에 대응되는 화상 좌표의 값을 알고 있으면  $c_{34} = 1$ 로 두고 카메라 캘리브레이션 행렬의 11개 미지수 원소의 값을 최소 자승법으로 구할 수 있다.

프로젝터의 캘리브레이션도 2차원 평면이 카메라의 화상 평면에서 투사되는 슬라이드 평면으로 대체된 것이 다를 뿐 식 (3)을 그대로 사용할 수 있다. 즉 패턴상의 좌표 ( $u, v$ )가 3차원 물체 표면위의 점 ( $x, y, z$ )에 투사된다고 할 경우 이 두 점은 대응관계가 있으며 다음과 같은 동차 좌표계 행렬의 곱의 형태로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} au \\ av \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 2.4 삼각법(Triangulation)에 의한 3차원 데이터의 계산

카메라와 프로젝터의 캘리브레이션 행렬이 구해지면, 물체에 투사된 그리드 교점들의 3차원 깊이(range) 데이터는 삼각법을 사용하여 계산할 수 있다.

물체 표면의 3차원 좌표는 카메라와 프로젝터의 렌즈 촛점으로부터 물체의 좌표점까지 연결된 두 직선의 교점이다(그림 1 참조). 만약 그리드 슬라이드 평면의 그리드 좌표 ( $u, v$ )가 3차원 공간 상의 점 ( $x, y, z$ )에 투사되고, 그 점이 디지털 화상 평면의 좌표 ( $p, q$ )와 일치한다면, 점 ( $x, y, z$ )의 값은 이 두 직선의 교점을 구하면 된다. 실제로는 캘리브레이션 행렬 요소들의 오차와 디지털 화상의 양자화 때문에 두 직선이 만나지 않을 수 있으

며 따라서 이러한 문제의 해는 보통 최소 자승법을 이용하여 구한다.

최소 자승법을 통해 구하는 교점들은 식 (3)과 (4)를 동시에 만족해야 한다. 식 (3)과 (4)로부터 다음 식을 얻을 수 있으며 이 식의 해  $(x, y, z)$ 가 우리가 구하려고 하는 점의 3차원 데이터이다.

$$\begin{bmatrix} c_{11} - c_{31}p & c_{12} - c_{32}p & c_{13} - c_{33}p \\ c_{21} - c_{31}q & c_{22} - c_{32}q & c_{23} - c_{33}q \\ p_{11} - p_{31}u & p_{12} - p_{32}u & p_{13} - p_{33}u \\ p_{21} - p_{31}v & p_{22} - p_{32}v & p_{23} - p_{33}v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{34}p - c_{14} \\ c_{34}q - c_{24} \\ p_{34}u - p_{14} \\ p_{34}v - p_{24} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서  $c_{11}, c_{12}, \dots, c_{34}$ 는 카메라 캘리브레이션 행렬의 요소이며,  $p_{11}, p_{12}, \dots, p_{34}$ 는 프로젝터 캘리브레이션 행렬의 요소이다.

### 3. 구 현

본 연구에서 구현한 구조화 조명을 이용한 3차원 데이터의 획득 방법은 본질적으로 Keizer와 Dunn의 방법과 상당 부분 유사하나 그들의 방법에서 나타난 여러 단점들을 보완하였다.

#### 3.1 캘리브레이션 물체, 좌표계, 투사 패턴

카메라 캘리브레이션에 필요한 동일 평면 상에 있지 않은 3차원 데이터를 손쉽게 자동적으로 얻을 수 있게 하기 위해, 세 평면을 서로 직교하도록 하고 각 평면 위에 3차원 위치를 알고 있는 표지들을 부착한 그림 3과 같은 캘리브레이션 물체를 제작하였다. 캘리브레이션에 사용하는 물체는 흰 패턴이 노란바탕의 종이에 그려져 있는 3개의 수직하는 평면으로 구성되며 각 교점간의 거리는 1 인치이다. 이렇게 함으로써 3차원 좌표의 값들을 쉽게 알 수 있다.

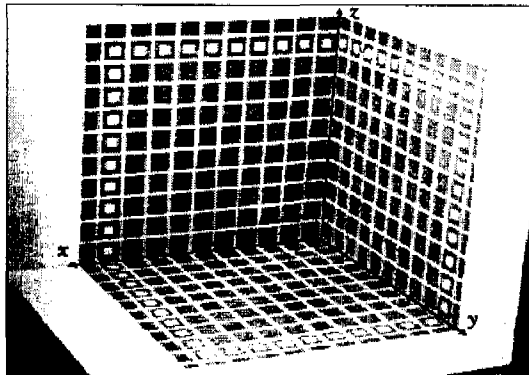


그림 3. 제작된 캘리브레이션 좌대와 좌표계

3차원의 물체 중심 좌표계는 그림 3와 같이 오른쪽 직교 좌표계를 사용해서 정의한다.  $xy$ 평면은 수평면이고  $z$ 축이  $xy$ 평면에 수직이다. 차후 얻게 될 3차원 데이터는 이와 같이 정의된 좌표계에 의해 표현되는 데이터이다.

본 시스템에서 사용하는 투사 패턴은 두 그룹의 직교하는 사선으로 구성되어 있으며 포스트스크립트 언어를 사용하여 프린트한 것을 카메라 필름에 마운트하여 제작하였다. 자세한 사항은 참고문헌<sup>[16]</sup>에 기술되어 있다.

### 3.2 화상의 획득

화상의 획득은 3차원 데이터의 획득을 위한 첫 단계이다.

먼저 화상 처리 과정에서 흰 패턴을 쉽게 찾으려 하기 위해 캘리브레이션 물체에 푸른 빛을 비추고 카메라 캘리브레이션용 화상을 획득한다. 노란색은 푸른색의 보색이기 때문에 푸른빛 하에서 노란 바탕은 매우 어둡게 보인다. 화상을 획득한 후에는 캘리브레이션 물체와 카메라를 움직이거나 카메라의 초점거리등의 파라미터를 바꾸면 안된다.

그 다음 검은 바탕에 흰 선과 정사각형 표지들로 구성된 그리드 슬라이드 패턴을 캘리브레이션 물체에 투사한 상태에서 프로젝터 캘리브레이션용 화상을 획득한다. 슬라이드 광원을 노란색과 흰색으로 이루어진 캘리브레이션 물체에 투사하면 두 색이 거의 같은 양의 빛을 반사하므로 캘리브레이션 물체의 패턴은 잘 보이지 않고 대신 캘리브레이션 물체에 투사된 슬라이드 패턴만이 뚜렷하게 나타난다.

그 다음 카메라와 프로젝터를 움직이지 말고 데이터를 얻으려 하는 3차원 물체를 캘리브레이션 물체위에 올려놓거나(작은 물체의 경우) 또는 캘리브레이션 물체가 놓였던 곳에 대체해 놓고(비교적 큰 물체의 경우) 3차원 데이터 계산용 화상을 획득한다. 그림 4와 5에서 카메라 및 프로젝터 캘리브레이션용 화상과 3차원 데이터 획득용 화상의 한 예를 볼 수 있다.

### 3.3 화상 처리

앞에서 얻은 화상으로부터 두 캘리브레이션 행렬 및 3차원 데이터의 계산을 위해서는 여러 단계의 화상 처리 절차가 필요하므로 이것들에 대해 먼저 설명한다.

#### 3.3.1 미디언 필터링

캘리브레이션 물체는 반사를 최대한 줄일 수 있는 재료를 사용했으나, 세 평면이 서로 직교하기 때문에 서로 빛을 반사하여 명암이 생기는 경우가 많다. 이 경우 이치화하는 데 어려움이 있을 수 있으므로 미디언 필터링을 사용하여 명암의 분포를 균일하게 조절하여 조명에 의한 영향을 줄인다.



### 3.3.2 이치화

이치화는 주로 bimean 방법<sup>[14]</sup>으로 한다. Bimean 방법은 대부분의 경우 잘 동작하지만, 때로는 후처리 단계가 필요하다. 만약 이치화 화상에서 1 화소의 구멍이 있으면, 세선화 과정을 거치고 나서도 그 구멍은 계속 남아 있게 된다. 이런 경우 다음 단계에서 교점들을 찾을 수 없거나 또는 잘못된 여러 교점들을 찾게 된다. 이러한 잘못을 줄이기 위해 1 화소의 구멍은 모두 메운다.

### 3.3.3 세선화

이치화된 화상으로부터 직선의 교점을 쉽게 찾기위해 세선화 과정을 수행한다. Zhang과 Suen<sup>[11]</sup>은 2번의 부반복에 의한 병렬 세선화 알고리즘을 개발했다. 이 방법은 하변, 우변의 화소와 좌상 꼭지점의 화소를 첫 부반복에서 제거하며, 상변, 좌변의 화소와 우하 꼭지점의 화소를 두 번째 부반복에서 제거한다. 이 알고리즘의 단점은 세선화 결과가 완전하지 못하고 지나치게 줄어든다는 것이다. Chen과 Hsu<sup>[12]</sup>는 화소의 제거 조건들을 변경하여 Zhang과 Suen의 병렬 세선화 알고리즘을 개선하였다. 그들은 특정 화소가 제거되는 것인지 아닌지의 결정을 룩업 테이블을 참조하는 것으로 대신하여 세선화 과정의 실행 시간을 단축시켰다. 본 연구에서는 이 방법을 구현하였으며 이 세선화된 화상은 차후 그리드의 교점을 찾는데 사용한다.

### 3.3.4 교점의 추출

선의 교점을 추출하기 위해 Keizer<sup>[7]</sup>는 그래프의 연결성에 바탕을 둔 여러 조건을 이용하여 화소가 모든 조건을 만족하면 교점으로 분류하는 방법을 사용하였다. 그러나 그의 방법은 획득한 화상의 모양이 바뀌는 경우 제대로 동작하지 못하는 단점이 있다. 예를 들어 교점이 × 모양일때는 잘 추출하지만 + 모양일때는 추출하지 못하는 경우도 있다.

이러한 단점을 극복하고자 화소의 이웃이 3개 이상이면 교점이 될 가능성이 큰 화소이므로 교점의 후보로 하고 정해진 거리 안에 또 다른 교점이 있는 경우 이 교점들을 서로 연결하였다.

## 3.4 그리드 레이블링

그리드 레이블링은 앞 단계에서 찾은 각 교점들에 대해서 고유한 레이블(label), 즉 2차원 투사패턴의 좌표값을 할당하는 과정이다. 사용하는 알고리즘은 표지의 위치와 투사 패턴 곡선들간의 인접성이라는 두 가지 제약 조건을 이용하여 각 교점에 좌표값을 할당하는 방법을 사용하였다.

### 3.4.1 이웃 교점 찾기

Keizer<sup>[7]</sup>는 교점의 인접한 이웃을 찾는 데 세션화된 화상을 이용하였으며, 특정 방향의 이웃을 찾고자 할 때 그 방향과 관련된 세 방향의 체인코드 방향으로 찾기를 행하였다. 예를 들어 북동쪽 방향 이웃 교점을 찾고자 할 때 북동, 북, 동쪽으로만 찾기를 행하였다. 따라서 세션화된 선이 부분적으로 이 세 방향에서 벗어나는 경우 이웃 교점을 찾는 데 실패한다.

이러한 문제점의 해결 방법으로 모든 이웃 교점들을 먼저 찾고, 특정 교점과 그것의 이웃 교점과의 화소의 행과 열 값을 조사하여 어떤 위치에 존재하는 지 판정하는 방법을 구현하였다.

### 3.4.2 표지 찾기

Keizer는 주어진 사각형안에 표지가 있는 지를 결정하기 위해서 사각형을 이루는 4개의 교점이 모두 다 존재해야 하고, 이 사각형의 안의 흑색과 백색의 화소수를 세어 그 비율이 정해진 값을 넘으면 표지가 존재하는 것으로 판정하였다. 그런데 무슨 이유에서든 이 네 교점들을 다 찾지 못하는 경우, 표지가 실제로 존재하더라도 표지를 찾는데 실패한다.

본 연구에서는 표지의 유무를 알기위해 면적비 대신 선 비율을 계산하는 방법으로 바꾸어 표지를 찾는 방법을 개선했다. Brensenham의 선그리기 알고리즘<sup>[2]</sup>을 선비율을 계산하는 데 사용하였다. 선비율 방법은 4개의 교점들이 필요한 면적비 방법보다 두 개의 대각 교점들만 있으면 되므로 보다 더 안정적으로 동작한다.

이 다음의 단계는 같은 좌표값을 갖는 교점들끼리 그래프를 만들고, 가장 긴 경로를 계산한 후 각 좌표축을 따라 좌표값을 부여한다. 좀 더 자세한 그리드 레이블링의 과정은 참고문헌<sup>[15]</sup>에 기술되어 있다.

## 3.5 캘리브레이션 행렬 및 3차원 데이터의 계산

앞에서 획득한 화상을 이용하여 처리하면 두 캘리브레이션 행렬 및 3차원 데이터를 계산할 수 있다.

먼저 카메라 캘리브레이션 행렬은 앞의 여러 단계의 과정을 거쳐 얻어진 동일 평면 상에 있지 않은 여러 점의 3차원 좌표값과 그 좌표에 대응되는 2차원 화면 좌표값을 식 (3)에 사용하여 계산한다.

프로젝터의 캘리브레이션 행렬을 구하기 위해서는 앞의 식 (4)에서 알 수 있듯이 대응되는 여러 투사 패턴의 좌표와 그것에 대응되는 3차원 좌표값을 알아야 한다. 각 투사 패턴 교점의 좌표 ( $u, v$ )와 그것의 화면 좌표는 앞에서 설명한 여러 단계를 거쳐 얻을 수 있

다. 대응되는 3차원 좌표값을 얻기 위해서는 각 교점의 화면좌표를 앞 단계에서 계산된 카메라 캘리브레이션 행렬을 사용해서 3차원 공간상에 역투사(inverse mapping)한다. 이 경우 캘리브레이션 행렬은 3차원 공간 상의 어느 점과 2차원 화면 상의 한 점을 잇는 직선의 식을 의미하므로 3차원 공간 상의 점을 구하기 위해서는 이 직선과 캘리브레이션 물체의 한면과의 교점을 구하면 된다. 어느 면과의 교차할 것인가의 결정은 교점의 위치가 캘리브레이션 물체의 두 평면이 만나는 축인 세로선을 기준으로 왼쪽 또는 오른쪽에 있는지의 여부를 이 교점의 화소 위치와 비교해서 쉽게 알 수 있다. 이렇게 얻어진 3차원 좌표와 대응되는 2차원 그리드 슬라이드 좌표값을 식 (4)에 사용하여 프로젝터 캘리브레이션 행렬을 얻는다.

물체의 3차원 데이터는 카메라와 프로젝터 캘리브레이션 행렬 및 앞의 여러 단계의 과정을 거쳐 얻는 부사패턴의 좌표값( $u, v$ )과 대응되는 화면좌표값( $p, q$ )을 식 (5)에 사용하여 계산한다.

이상과 같이 기술한 모든 처리 과정은 Solaris 2.4 운영 체제를 사용하는 현대 Axil 311 Workstation에서 C 언어로 구현하였다.

#### 4. 실험 결과

제안한 방법이 제대로 동작하는 지 확인하기 위해 실험을 하였다. 먼저 카메라와 프로젝터의 캘리브레이션을 위해 화상을 획득하였고, 원기둥, 상자, 화장품병등의 여러 물체에 대한 화상을 획득하였다. 획득한 화상의 크기는 모두  $640 \times 480$ 이며 그림 4에 카메라와 프로젝터 캘리브레이션용 화상이 도시되어 있다. 이 두 화상을 이용하여 앞에서 기술한 여러 과정을 거쳐 캘리브레이션 행렬을 얻었다.



그림 4. 카메라와 프로젝터의 캘리브레이션용 화상

그림 5에는 3차원 데이터를 얻기 위해 필요한 주요 단계별 화상을 차례대로 나타내었다. 상단 왼쪽은 구조화 조명을 이용하여 얻은 원기둥의 계조 화상, 오른쪽은 이치화된 화

상이며, 하단 왼쪽은 세션화된 화상, 오른쪽은 추출된 교점의 화상이다.

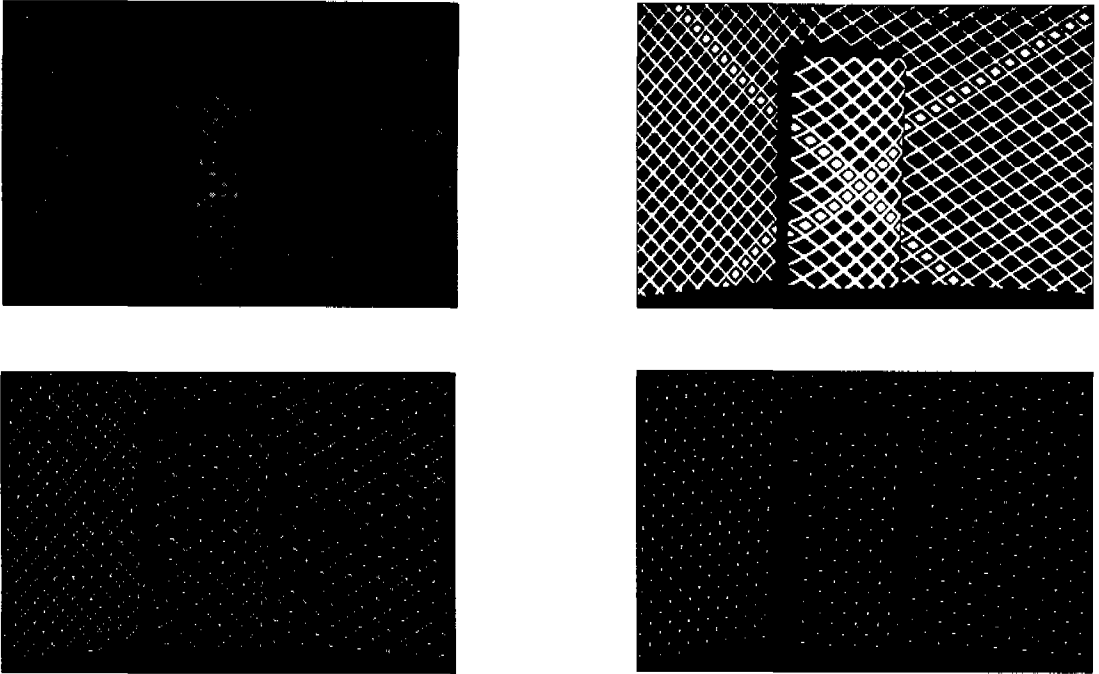


그림 5. 3차원 데이터를 얻기까지의 단계별 과정 (자세한 내용은 본문 참조)

그림 6에는 위의 여러 단계를 거쳐 얻은 데이터를 이용하여 재구성한 화상을 나타낸다. 상단의 왼쪽 그림은 각 교점과 이웃교점들의 관계로부터 재구성한 화상이고 나머지 세 그림은 3차원 데이터를 이용하여 서로 다른 세 곳에서 본 모양을 나타낸다.

계산된 3차원 데이터를 이용하여 좀 더 사실감 있게 표현하기 위해 요즘 인터넷에서 많이 사용되는 VRML(Virtual Reality Modeling Language)<sup>[15]</sup>을 이용하였다. 우선 간단한

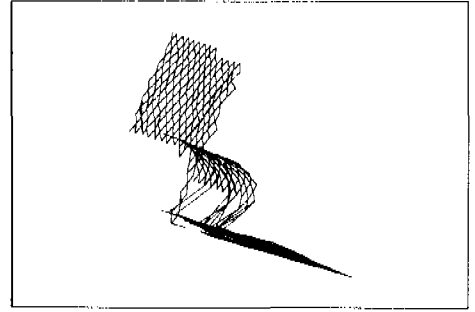
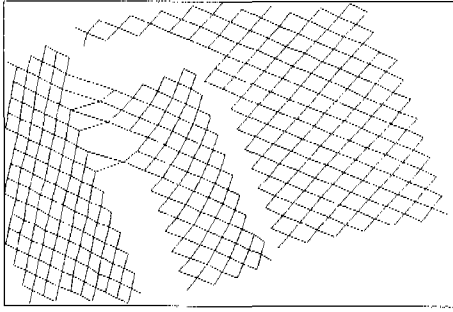


그림 6. 얻은 데이터를 이용하여 재구성한 화상 (자세한 내용은 본문 참조)

프로그램을 작성하여 3차원 데이터 화일을 VRML 화일로 변환하였으며 그 결과를 넷스케이프 내비게이터를 사용하여 도시한 결과를 그림 7에 나타내었다.

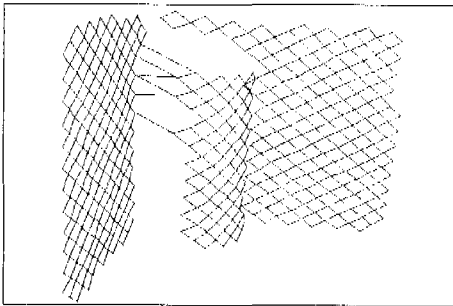


그림 7. VRML 파일로 변환하여 넷스케이프 내비게이터를 사용하여 도시한 결과 (와이어 프레임과 셰이딩)

이상과 같이 구조화 조명을 사용하여 획득한 3차원 데이터의 정확도를 알아보기 위해 프로젝터 캘리브레이션에 사용된 화상을 이용하였다. 그림 4 오른쪽의 프로젝터 캘리브레이션용 화상을 보면 수많은 점들이 캘리브레이션 물체의 두 평면에 투사된 것을 알 수 있다. 물체의  $x = 0$  인 평면과  $y = 0$  인 평면 상에 투사된 교점은 각각 245, 247개 이었으며, 이 점들의 계산된 3차원 데이터 중 참값을 알고 있는 성분( $x, y$  두 성분의 값 중 0에 가까운 성분)을 이용하여 오차를 계산하였다. 표 1에 계산된  $x$  성분과  $y$  성분의 각종 오차가 정리되어 있다. 이 표에서 알 수 있듯이 이 시스템의 오차는 1mm 이하인 것을 알 수 있으며  $z$  성분에 대해서는 참값을 알 수 있는 수치가 없어 오차를 계산할 수 없었으나,  $x, y$  성분의 계산에서 나타난 오차와 유사한 단위의 오차라 가정해도 큰 무리는 없을 것 같다. 화상처리 과정에서 나타날 수 있는 오차를 고려한다면 상당히 정밀한 데이터를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

표 1. 3차원 데이터 획득 시스템의 오차 (단위: mm)

	$x$ 성분	$y$ 성분
최소 오차	0.000881	0.000324
최대 오차	0.135012	0.139229
평균 오차	0.113845	0.028188
rms 오차	0.4905	0.35493

## 5. 결 론

이상과 같이 구조화 조명을 이용한 3차원 데이터의 획득 시스템을 개발하였다. 구현된 시스템의 주요 특징은 다음과 같다.

- 실험실에서 제작한 캘리브레이션 물체와 슬라이드 프로젝터, CCD 카메라를 사용하여 시스템을 구현하였기 때문에 저렴한 비용으로 손쉽게 3차원 데이터 획득 시스템을 구현할 수 있다.
- 제안된 방법은 특별한 장치 없이 실험실에서 카메라와 프로젝터의 캘리브레이션을 손쉽게 할 수 있다.
- 캘리브레이션 물체 위에 올려놓을만큼 작은 물체의 경우 얻게 되는 3차원 데이터의 범위가 한정되므로 잘못 계산된 데이터의 자동 제거가 가능하다.
- 실험실에서 연구를 위해 필요한 3차원 데이터를 간단히 얻을 수 있는 방법 중의 하나가 될 수 있다.
- 실내에서와 같이 조명의 제어가 가능한 곳에서만 동작한다는 제약 조건이 있다.

앞으로의 연구과제는 시스템의 안정화와 좀 더 세밀한 오차의 해석 및 얻어지는 3차원 데이터를 이용한 물체의 모델링 등이다. 이 시스템은 많은 화상 처리 프로그램의 효율성에 의존하는 부분이 많으므로 보다 안정적인 데이터 획득을 위해 필요한 방법의 구현이 필요하다. 예를 들어 조명 조건 때문에 이치화가 잘 되지 않는 경우도 있으므로 그런 경우에는<sup>[13]</sup>에서 제시된 방법을 채택할 것도 고려 중이다.

## 참 고 문 헌

- [1] R. Jain, R. Kasturi, and B. G. Schunck, *Machine Vision*, McGraw-Hill, 1995
- [2] J. D. Foley, A. van Dam, J. F. Hughes, R. L. Phillips, *Introduction to Computer Graphics*, Addison-Wesley, 1994
- [3] P. M. Will and S. Pennington, "Grid coding : a preprocessing technique for robot and machine vision", *Artificial Intelligence*, 1971, vol. 2, pp 319-329
- [4] P. M. Will and S. Pennington, "Grid coding : a novel technique for image processing", *Proceedings of the IEEE*, 1972, vol. 60, no. 6, pp 669-680

- [5] J. J. Le Moigne and A. M. Waxman, "Structured light patterns for robot mobility", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1988, vol. 4, no. 5, pp 541-548
- [6] G. Hu and G. Stockman, "3-D surface solution using structured light and constraint propagation", *IEEE Trans. on PAMI*, 1989, vol. 11, no. 4, pp 390-402
- [7] S. M. Dunn and R. L. Keizer and J. Yu, "Measuring the area and volume of the human body with structured light", *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1989, vol. 19, no. 6, pp 1350-1364
- [8] R. L. Keizer and S. M. Dunn, "Marked grid labeling", *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1989, pp 612-617, IEEE Computer Society Press
- [9] K. L. Boyer and A. C. Kak, "Color-encoded structured light for rapid active ranging", *IEEE Trans. on PAMI*, 1987, vol. 9, no. 1, pp 14-28
- [10] P. Vuylsteke and A. Oosterlinck, "Range image acquisition with a single binary-coded light pattern", *IEEE Trans. on PAMI*, 1990, vol. 12, no. 2, pp 148-164
- [11] T. Y. Zhang and C. Y. Suen, "A fast parallel algorithm for thinning digital patterns", *Communications of the ACM*, 1984, vol. 27, no. 3, pp 236-239
- [12] Y.-S. Chen and W.-H. Hsu, "A modified fast parallel algorithm for thinning digital patterns", *Pattern Recognition Letters*, 1988, vol. 7, pp 99-106
- [13] J. R. Parker, "Gray level thresholding in badly illuminated images", *IEEE Trans. on PAMI*, 1991, vol. 13, no. 8, pp 813-819
- [14] S. M. Dunn, L. Janos and A. Rosenfeld, "Bimean Clustering", *Pattern Recognition Letters*, 1983, vol. 1, pp 169-173
- [15] *The Virtual Reality Modeling Language Specification Version 2.0*, 1996년 8월 4일, The VRML Architecture Group (<http://vag.vrml.org>)
- [16] 전희성, "표지를 이용한 새로운 그리드 레이블링 기법", 울산대학교 공학연구논문집에 제출