

구조화 조명과 영상 처리를 이용한 3차원 데이터 획득 시스템

(Three Dimensional Data Acquisition System Using Structured Light and Image Processing)

全熙星*, 朴宰弘**, 高文錫*

(Heesung Jun, Jaehong Park, and Munseok Koh)

요 약

구조화 조명(structured light)을 사용하여 얻은 물체의 계조 영상을 처리하여 3차원 데이터를 얻을 수 있는 시스템을 구현하였다. 본 시스템은 영상 획득 카드에 연결된 CCD 카메라와 슬라이드 프로젝터, 영상 처리 및 가시화하는 부분을 포함한 여러 개의 프로그램으로 구성되어 있다. 카메라와 프로젝터의 캘리브레이션 과정과 3차원 데이터를 얻기 위해 필요한 여러 단계의 영상 처리 과정에 대해 기술하였다. 투사 패턴의 좌표 계산 오차를 줄이기 위해 양방향 기중그래프를 이용한 그리드 레이블링 기법과 새로운 그리드 패턴을 제안하였다. 제안한 방법의 효용성을 입증하기 위해 몇 가지 물체에 대한 영상을 획득하여 처리한 결과를 포함하였으며, 오차의 해석 결과 상당히 정밀한 데이터를 얻을 수 있음을 보였다. 보다 더 간편하고 정확하게 3차원 데이터를 얻을 수 있는 시스템이 되기 위해 필요한 여러 개선책에 대해서 기술하고 앞으로의 연구 방향에 대해서 언급하였다.

Abstract

Three dimensional data acquisition system based on the structured light is developed in this work. The system is composed of a CCD camera, slide projector, and various image processing programs. Calibration procedures and several image processing steps which are necessary to get the range data are described. A new grid labeling technique and a grid pattern are devised to improve the accuracy of the obtained data. Preliminary experimental result shows that the developed system may be used as a simple and cheap 3D data acquisition system. Several suggestions are included for further research.

I. 서 론

물체의 3차원 데이터를 정확하게 얻는 것은 여러분야에서 다양한 이유로 필요하다. 예를 들어 3차원 물

체의 인식, 물체의 모델링, 3차원 컴퓨터 그래픽스 등 많은 분야에서 3차원 데이터가 필요하다. 이러한 목적을 달성하기 위해 레이저, 초음파, 스테레오, 구조화 조명 등 많은 거리 측정 기법이 개발되었다.

* 正會員, 蔚山大學校 컴퓨터·情報通信工學部
(School of Computer Eng. & Information Tech., Univ. of Ulsan)

** 正會員, (株)現代商船 情報技術室
(HYUNDAI Merchant Marine Co., LTD.)

接受日字: 1997年6月28日, 수정완료일: 1998年4月24日

컴퓨터 비전 시스템에서 많이 사용되고 있는 입력 데이터 중에서 계조 영상(gray image)은 3차원 세계에 대한 정보를 많이 잃어버리게 되는데 반해, 깊이 영상(range or 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 영상

을 많이 사용하고 있다.

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^{[1]-[5]}.

본 연구에서는 3차원 물체의 인식 또는 모델링에 필요한 3차원 데이터를 실험실에서 쉽고 경제적으로 얻을 수 있는 방법을 개발하기 위해 구조화 조명과 영상 처리를 이용하여 3차원 데이터의 획득 시스템을 구현하였다.

2절에서는 구조화 조명의 개요 및 관련 이론에 대해 설명하였다. 3절에서는 본 논문에서 구현한 시스템의 주요 특징에 대해 기술하고, 양방향 가중 그래프를 이용한 새로운 그리드 레이블링 방법과 고립된 교점들에 대한 레이블링의 문제를 해결하기 위한 새로운 투사 패턴을 제시하였다. 4절에서는 시스템 구현을 단계별로 설명하였으며, 5절에서는 구현된 시스템을 이용하여 영상을 획득하고 처리한 실험 결과를 요약하였다. 마지막으로 6절에서는 구현된 방법의 주요 특징과 앞으로의 연구방향에 대해 언급하였다.

II. 구조화 조명(Structured Light)

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 카메라를 광원(물체 표면에 패턴을 투사하는)으로 대체한 능동적 기법이라는 것이 크게 다른 점이다. 일반적인 구조화 조명 시스템의 개략도는 그림 1과 같다.

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.

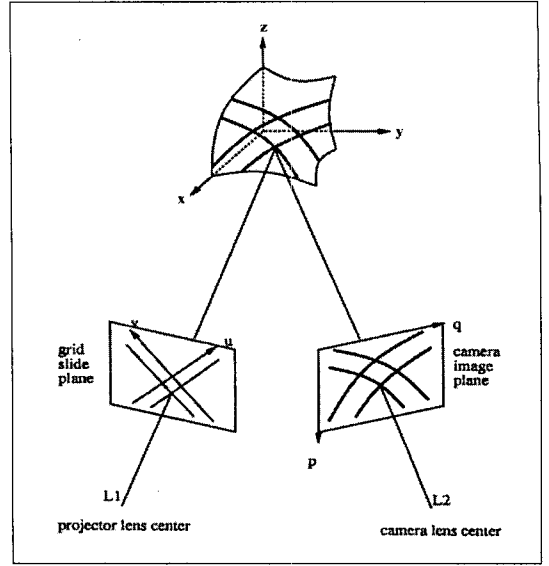


그림 1. 구조화 조명 시스템의 개략도

Fig. 1. A typical sensing environment of a structured light system.

Will과 Pennington^[1]은 구조화 조명을 3차원 데이터의 획득 기법으로 처음 사용하였다. 그들은 평면에 투사된 패턴의 왜곡은 영상면에 대한 법선 벡터의 방향과 위치의 함수라는 것을 이용해 다면체 각 평면의 위치와 방향을 얻는 방법을 개발하였다.

구조화 조명은 설치가 비교적 쉽고, 사용도 간편하며, 경제적이라는 장점이 있다. 또한 대응점 문제(correspondence problem)를 풀기가 스테레오 방법보다는 쉽다. 그러나 광원을 제어해야 하므로 주로 실내에서만 사용이 가능하며, 깊이 정보의 범위에 제약이 있다는 단점도 있다.

2. 영상의 형성 과정과 카메라 모델

3차원 공간의 점 (x, y, z) 가 영상면의 좌표 (p, q) 에 대응될 경우 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다. 이때 f 는 카메라의 초점거리이다.

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

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

위 식에서 사용하는 좌표계는 카메라 중심 좌표계이고 보통 물체의 3차원 좌표는 물체 중심 좌표계로 표시하는 경우가 많다. 이 경우 일반적인 영상의 형성 과정은

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

등의 연산이 연속적으로 이루어진 행렬의 곱의 형태로 표시할 수 있다. 만약 3차원 좌표 (x, y, z) 가 영상 좌표 (p, q) 에 대응된다면 다음과 같은 동차 좌표계 행렬의 곱의 형태로 표현할 수 있다. 이 식에서 α 는 배율(scale factor)이며 3×4 행렬이 카메라 캘리브레이션 행렬이다.

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

3. 카메라와 프로젝터의 캘리브레이션

카메라 캘리브레이션의 주요 목적은 3차원 좌표계와 2차원 영상평면 좌표계간의 관계를 찾기 위한 것이다. 카메라의 내부 요소(카메라의 기하학적, 광학적 요소)와 외부 요소(물체 중심 좌표계에 대한 카메라의 위치와 방향 등)가 미지수 $c_{11}, c_{12}, \dots, c_{34}$ 에 영향을 미친다^[6].

식 (3)에서 α 를 소거하면 p, q 와 x, y, z 를 포함하는 두 식이 되며 그것은 하나의 3차원 점과 그것에 대응되는 영상 좌표와의 관계를 표현한 것이다. 만약 6개 또는 그 이상의 동일 평면상에 있지 않은 3차원 좌표와 그에 대응되는 영상 좌표값을 알 경우 $c_{34} = 1$ 로 두고 카메라 캘리브레이션 행렬의 11개 미지수 값을 최소 자승법으로 구할 수 있다.

프로젝터의 캘리브레이션도 식 (3)을 그대로 사용할 수 있다. 패턴상의 좌표 (u, v) 가 3차원 좌표 (x, y, z) 에 투사될 경우 다음과 같이 표현된다.

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

4. 삼각법에 의한 3차원 데이터의 계산

카메라와 프로젝터의 캘리브레이션 행렬이 구해지면, 물체에 투사된 패턴의 3차원 좌표는 삼각법을 사용하여 계산할 수 있다. 만약 패턴 평면의 좌표 (u, v) 가 3차원 좌표 (x, y, z) 에 투사되고, 그 점이 영상 평면의 좌표 (p, q) 와 일치한다면, 점 (x, y, z) 의 값은 이 두 직선의 교점을 구하면 된다(그림 1 참조). 캘리브

레이션 행렬 요소의 오차와 디지털 영상의 양자화 때문에 두 직선이 만나지 않을 수 있으며 이러한 문제의 해는 보통 최소 자승법을 이용하여 구한다. 식 (3)과 (4)로부터 다음 식을 얻을 수 있으며 이 식의 해 (x, y, z) 가 우리가 구하려고 하는 점의 3차원 좌표값이다.

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

$c_{11}, c_{12}, \dots, c_{34}$ 와 $d_{11}, d_{12}, \dots, d_{34}$ 는 각각 카메라와 프로젝터 캘리브레이션 행렬의 요소이다.

III. 본 구조화 조명 방법의 주요 특징

1. 그리드 레이블링 기법

구조화 조명에서 사용하는 패턴에 비둑판처럼 동일한 모양이 반복되는 경우 투사된 패턴의 좌표값을 구하기가 쉽지 않다. 이 문제는 스테레오 비전의 대응점 문제와 유사하며 보통 그리드 레이블링 문제라 부른다. 이 문제를 해결하기 위해 여러 다양한 기법들이 개발되었다.

Le Moigne와 Waxman^[2]은 수평선과 수직선으로 구성된 비둑판 모양의 패턴에 몇 개의 표지(marker)를 사용하여 그리드 레이블링 문제를 해결하고자 하였다. 그들은 먼저 표지를 찾고 그 표지로부터 수직 또는 수평선의 수를 세어 이웃한 교점들의 좌표값을 계산하였다. 투사된 곡선이 끊어지거나 교점이 없는 경우 레이블링에 잘못이 있을 수 있으므로 전체적 이완(global relaxation) 절차가 사용되었다. 그들의 패턴은 크기가 그리 크지 않으며, 몇 개의 표지를 어떻게 배치하는가에 대해서도 언급하지 않았다.

Hu와 Stockman^[3]은 기하학적 및 위상학적 제약 조건(geometric & topological constraint)을 이용하여 레이블링 문제를 해결하는 방법을 제시하였다. 몇 단계의 처리과정을 거쳐 각 교점은 여러 개의 후보 좌표값을 가지게 된다. 교점에 대한 후보 좌표값 중 이웃 교점의 좌표값과 연속성이 없는 것을 하나씩 제거해 가는 방법으로 해를 구하되, 최종적으로 복수 개의 해가 존재할 경우, 그 값을 이용하여 3차원 좌표를 먼저 구하고 그 값을 2차원 화면 상으로 투사하여 각 이미지의 부분이 서로 겹치지 않는 좌표값의 집합을

해로 채택하는 방법을 사용한다. 그들의 패턴 또한 크기가 크지 않으며, 제약 조건의 확인 과정 때문에 처리 시간이 많이 걸리고, 모든 제약 조건을 다 만족시키는 해가 유일하게 나오지 않을 경우에 대한 대책이 없다는 등의 단점이 있다.

Keizer와 Dunn^[45]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 완만한 물체에 대해서는 그리드 레이블링이 비교적 잘 되는 편이지만, 서로 떨어진 여러 개의 물체로 이루어진 장면에 대해서는 레이블링에 실패하여 데이터를 얻기가 힘들다는 단점이 있다. 그러나 사용하는 패턴의 크기가 비교적 크므로 한번에 많은 데이터를 얻을 수 있는 장점이 있다.

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

2. 사용한 투사 패턴

투사 패턴은 두 그룹의 직교하는 사선으로 구성되며 그림 2에 Keizer의 패턴과 본 연구의 초기에 사용한 패턴(패턴 A라 함)을 대비하여 나타내었다.

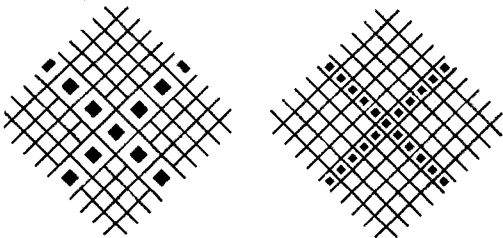


그림 2. Keizer의 원패턴(좌측)과 본 연구의 초기에 사용한 패턴 A(우측)
Fig. 2. Keizer's grid pattern (left) and Pattern A(right).

그림 2에서 보는 바와 같이 Keizer의 패턴은 표지가 위치한 부분의 사각형이 다른 부분보다 크고 패턴이 균일하지 않고, Keizer처럼 '十'와 '×'자형의 교점을 추출하는 알고리즘을 사용하는 경우 'T' 형의 교점과 표지 부분에 대해서는 데이터를 얻을 수 없는 단점이 있다. 반면 패턴 A는 패턴이 균일하고 데이터를 얻을 수 있는 부분이 Keizer의 패턴보다 더 많다는

장점이 있다.

바둑판 같은 이 패턴에서 수많은 교점의 좌표를 쉽게 표현하기 위해 그림 3과 같은 u, v 좌표계를 정의한다. 좌표계의 원점(u = 0, v = 0 인 점)과 u, v가 0 또는 -1 인 점들은 각 점의 인근에 표지가 존재하기 때문에 다른 점들과 쉽게 구분할 수 있다.

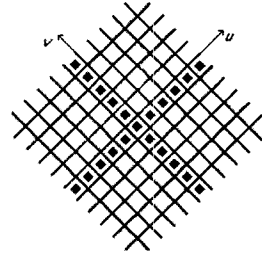


그림 3. 투사 패턴의 u, v 좌표계
Fig. 3. u, v coordinate in projected pattern.

3. 그리드 레이블링 방법

그리드 레이블링은 패턴의 각 교점들에 고유한 레이블(label), 즉 2차원 투사패턴의 좌표값을 할당하는 과정이다. Keizer는 표지의 위치와 투사 패턴 곡선간의 인접성이라는 두 가지 제약 조건을 이용하여 각 교점에 좌표 값을 할당하는 방법^[45]을 사용하였다. 교점의 각 좌표값은 다음의 5 단계를 거친 후 할당된다.

- (a) 이웃하는 교점들의 목록을 만든다.
- (b) 표지의 위치를 찾는다.
- (c) u, v 좌표가 같은 교점끼리 그래프를 만든다.
- (d) 가장 긴 경로를 계산한다.
- (e) 각각의 좌표축을 따라 u, v 값들을 부여한다.

본 연구에서는 위의 각 단계 중 잘 동작되지 않거나 개선이 필요한 부분을 다음과 같이 수정하여 사용하였다.

(a) 교점의 이웃을 찾을 때 Keizer^[4]는 세선화된 영상을 이용하여, 특정 방향의 이웃을 찾고자 할 때 그 방향과 관련된 3 방향으로 찾기를 행하였다. 예를 들어 그림 4의 화소 A에서 북동쪽 이웃 교점 B를 찾고자 할 때 북동, 북, 동쪽의 3 방향으로 깊이 우선 탐색(depth first search)을 한다. 따라서 화소 C에서 다음 화소 D를 찾을 수 없게 된다. 이러한 문제점의 해결 방법으로 특정 교점의 모든 이웃 교점들을 찾고,

특정 교점과 그 이웃 교점들과의 화소의 행과 열 값을 조사하여 어떤 위치에 존재하는 지 판정하는 방법을 사용하였다. (그림 4에서 교점 B는 교점 A보다 행의 값은 작고 열의 값은 큼)

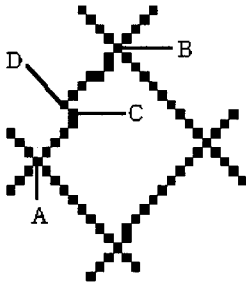


그림 4. 이웃 교점 찾기에 실패하는 경우
Fig. 4. Failure of Keizer's method in finding a neighbor intersection.

(b) 주어진 사각형안에 표지가 있는 지를 결정하기 위해서 Keizer는 사각형을 이루는 4개의 교점이 모두 다 존재해야 하고, 이 사각형의 안의 흑색과 백색의 화소수를 세어 그 비율이 특정한 값을 넘으면 표지가 존재하는 것으로 판정하였다. 이 비율은 패턴을 설계할 때 미리 알 수 있으므로 투사된 패턴의 왜곡을 고려한 값을 사용하면 표지의 존재 유무를 판정할 수 있게 된다. 그러나 이 방법은 매 사각형마다 화소의 수를 세어야하기 때문에 시간이 많이 걸리고, 또한 표지 주위의 네 교점을 다 찾지 못하는 경우에는 표지가 실제로 존재하더라도 표지를 찾는 데 실패한다는 단점이 있다. 본 연구에서는 표지의 유무를 알기 위해 대각교점 사이에 Brensenham의 선그리기 알고리즘^[7]을 이용하여 가상의 선을 긋고 그 선 상의 흑색과 백색 화소의 비율에 따라 표지의 유무를 판정하였다. 이 방법은 두 개의 대각교점만 있으면 되므로 보다 더 안정적으로 동작한다. 대각교점의 선택은 먼저 상하교점을 사용하고 만약 존재하지 않을 경우 좌우 교점을 사용하였다.

(c) 같은 u, v 좌표값을 갖는 교점끼리 그래프를 만드는 과정을 설명하기 위해 교점간의 연결 관계를 나타내는 그림 5를 예로 들어 설명하겠다. 숫자는 각 교점의 고유번호이고 점 17을 u, v 좌표계의 원점이라 하자. 또한 영문자 u 와 v 는 u 또는 v 좌표값이 같은 교점들의 그룹을 나타낸다. 즉, 그룹 u_1 은 점 2, 3, 5, 8로 구성되며 이 점들의 u 값은 모두 3이다.

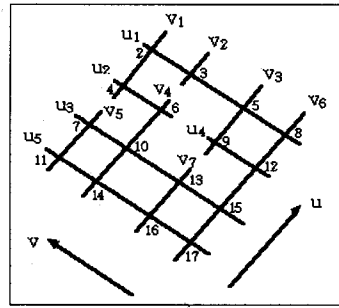


그림 5. 교점의 연결 관계
Fig. 5. Relations of several intersections.

그림 5를 단방향 그래프의 형태로 표시한 것이 그림 6이며, 각 노드는 u 또는 v 값이 같은 점들의 집합을 나타낸다.

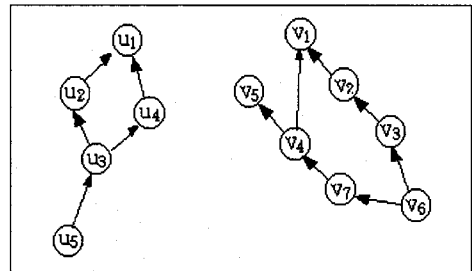


그림 6. 단방향 그래프로 나타낸 가상의 데이터
Fig. 6. Data represented by unidirectional graph.

(d) - (e) 그림 6의 왼쪽 그래프에서 u_5 노드가 $u = 0$ 이면 모든 u 노드의 u 좌표값을 구할 수 있으며 u_4 노드와 u_1 노드의 연결이 끊어지더라도 u_5 노드에서 각 노드로 갈 수 있는 경로가 있기 때문에 모든 노드의 좌표값을 얻을 수 있다. 그러나, u_3 노드와 u_4 노드의 연결이 끊어지게 되면 u_4 노드로 갈 수 있는 경로가 없기 때문에 이런 경우 u_4 노드에 속한 모든 교점들의 u 좌표값은 구할 수 없게 되고 따라서 3차원 데이터를 얻을 수 없게 된다.

이러한 방법의 단점은 단방향 연결 그래프 대신 양방향 연결 그래프를 사용하여 레이블링을 하도록 하면 쉽게 해소된다. 즉 앞의 예에서 u_3 노드와 u_4 노드의 연결이 끊어지더라도 u_5, u_3, u_2, u_1, u_4 노드의 순서로 u_4 노드까지 이를 수 있다. 그래프의 가치를 따라 각 노드를 방문할 때 u, v 값의 증가 방향으로 움직일 때는 양의 값, 감소 방향으로 움직일 때는 음의 값을 더하면, u 와 v 값을 알고 있는 노드에서 이를 수 있는 모든 노드의 u, v 좌표값은 쉽게 계산된다.

4. 새로운 패턴(패턴 B)의 고안

앞에서 제시한 방법으로 레이블링을 하더라도, 투사된 곡선이 어떤 이유에서든 u와 v 값을 알고 있는 점으로부터 연결이 모두 끊어지게 되면 레이블링에 실패하게 된다는 약점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 그림 7과 같이 13개의 표지를 사용하는 패턴(패턴 B라 함)을 고안하고 이에 따라 레이블링 알고리즘도 일부 수정하였다.

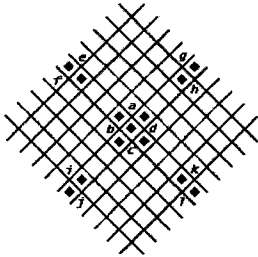


그림 7. 13개의 표지가 있는 그리드 패턴 B
Fig. 7. Pattern B with 13 markers.

패턴 B는 패턴 A와 매우 유사하다. 패턴 A는 하나의 원점을 사용하여 레이블링을 하는 데 비해, 패턴 B는 이미 (u,v)값을 알고 있는 5개의 그룹에 속한 점으로부터 각각 레이블링이 시작되도록 한다. 이 패턴에서도 그리드 좌표계의 원점은 앞에서와 마찬가지로 점 a이며 직선 ag가 u축, 직선 ae가 v축이 된다. 또한 점 e, g, i, k의 u, v 좌표 값은 어떤 특정한 값으로 이미 정해져 있다. (그림 7은 모양을 설명하기 위한 것으로 실제로는 점 a와 점 e의 실제 v 좌표값이 10만큼 차이 나도록 되어 있음.)

Keizer의 패턴에서 사각형 표지를 x자형으로 많이 배열한 이유는 u 또는 v 축을 쉽게 찾아내도록 해 좌표 계산을 쉽게 하기 위한 것이다. 그러나 각 축상의 교점들은 똑같이 부근에 표지가 두 개씩 있으므로 서로 구분하기가 어렵다. 즉 필요 이상으로 많은 정보(redundant information)는 좌표 계산에 별로 도움을 주지 못한다는 점이다. 새 패턴에서 사용하는 표지의 개수는 Keizer 패턴의 표지 개수보다 많이 줄어들어 좌표값을 결정하기가 더 쉬워졌으며, 또한 국부적인 레이블링에도 효과를 발휘할 것이라는 생각에 바탕을 두고 이 패턴을 고안하였다.

·점 a, b, c, d는 이웃에 사각 표지가 세 개씩 있고 각각 나타나는 위치가 다르므로 각 점들을 유일하게

결정할 수 있으며, 따라서 u, v 값들도 쉽게 구할 수 있다.

- 또한 교점 e - k는 모두 이웃에 표지가 두 개씩 있으므로 인접한 표지정보만을 사용하면 유일하게 결정할 수는 없으나, 각 교점들의 화면상의 행과 열 값을 보조 제약조건으로 사용하면 유일하게 좌표값을 결정할 수 있다. (예를 들어 점 e와 k의 왼쪽과 아래쪽에는 똑같이 표지가 존재하므로 서로 구분하기 힘들다, 점 e의 행과 열은 각각 점 k의 행과 열보다 작은 값일 것이므로 서로 구분이 가능하다.)
- 따라서 이 패턴에 나타나는 특별한 점 a - k의 좌표값을 이용하면 그 점들에 인접한 점들의 u, v 좌표값들은 쉽게 구할 수 있다.

IV. 시스템의 구현

1. 캘리브레이션 물체와 좌표계의 정의

카메라 캘리브레이션에 필요한 동일 평면 상에 있지 않은 3차원 데이터를 손쉽게 얻기 위해, 세 평면을 서로 직교하도록 하고 각 평면 위에 3차원 위치를 알고 있는 표지들을 부착한 캘리브레이션 물체를 제작하였다. 캘리브레이션 물체의 xy평면이 수평면이고 z축은 xy평면에 수직인 직교 좌표계를 사용하여 물체 중심 좌표계를 정의하였다.

2. 영상의 획득

카메라의 캘리브레이션에 필요한 영상을 먼저 획득한다. 영상을 획득한 후에는 캘리브레이션 물체와 카메라를 움직이거나 카메라의 초점거리등의 파라미터를 바꾸면 안된다. 그 다음 그리드 슬라이드 패턴을 캘리브레이션 물체에 투사한 상태에서 프로젝터 캘리브레이션용 영상을 획득한다.



그림 8. 카메라와 프로젝터 캘리브레이션용 영상의 한 예
Fig. 8. Sample images of camera and projector calibration.

마지막으로 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 영상을 획득한다. 이때에도 카메라와 프로젝터를 움직이면 안된다. 그림 8에 카메라 및 프로젝터 캘리브레이션용 영상의 한 예를 도시하였다.

3. 영상 처리

얻은 영상으로부터 두 캘리브레이션 행렬 및 3차원 데이터의 계산을 위해서는 다음과 같은 여러 단계의 영상 처리 절차가 필요하다.

- 이치화

어두운 배경과 밝은 패턴이 있는 계조영상의 이치화에는 bimean 방법^[8]을 사용하였다. Bimean 방법은 대부분의 경우 잘 동작하지만, 때로는 후처리 단계가 필요하다. 만약 이치화 영상에서 1 화소의 구멍이 있으면, 세선화 과정을 거치고 나서도 그 구멍은 계속 남아 있게 되며 이런 경우 다음 단계에서 교점들을 찾을 수 없게 된다. 이러한 잘못을 줄이기 위해 1 화소의 구멍은 모두 메운다.

- 세선화

이치화된 영상으로부터 직선의 교점을 쉽게 찾기 위해 세선화 과정을 수행한다. 본 연구에서는 Chen과 Hsu^[9]에 의해 수정된 Zhang과 Suen^[10]의 병렬 세선화 알고리즘(수행속도가 비교적 빠름)을 구현하였으며 세선화된 영상은 차후 그리드의 교점을 찾는 데 사용한다.

- 교점의 추출

선의 교점을 추출하기 위해 Keizer^[5]는 그래프의 연결성에 바탕을 둔 여러 조건을 이용하여 화소가 조건을 만족하면 교점으로 분류하는 방법을 사용하였다. 그러나 그의 방법은 획득한 영상의 모양이 바뀌는 경우 제대로 동작하지 못하는 단점이 있다. 예를 들어 교점이 'x' 모양일때는 잘 추출하지만 '+' 모양일때는 추출하지 못하는 경우도 있다. 이러한 단점을 극복하고자 세선화된 영상에서 화소의 이웃이 3개 이상이면 교점이 될 가능성이 큰 화소이므로 교점의 후보로 하고 정해진 거리 안에 또 다른 교점이 있는 경우 이 두 교점 후보의 중간점을 교점으로 정하는 방법을 사용하였다.

- 캘리브레이션 행렬 및 3차원 좌표값의 계산

카메라 캘리브레이션 행렬은 앞의 여러 단계의 과정을 거쳐 얻게되는 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 투사 패턴의 여러 좌표값과 그것에 대응되는 3차원 좌표값을 알아야 한다. 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 한 면과의 교점을 구하면 된다. 어느 면과 교차할 것인가의 결정은 교점의 위치가 캘리브레이션 물체의 두 평면이 만나는 축인 세로선을 기준으로 왼쪽 또는 오른쪽에 있는 지의 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 좌표는 카메라와 프로젝터 캘리브레이션 행렬 및 앞의 여러 단계의 과정을 거쳐 얻는 투사 패턴의 좌표값(u, v)과 대응되는 화면좌표값(p, q)을 식 (5)에 사용하여 계산한다.

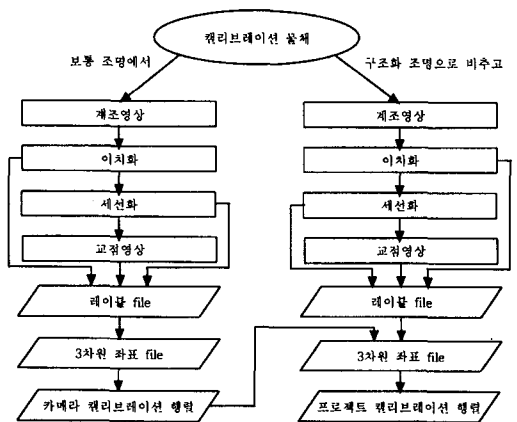


그림 9. 카메라와 프로젝터 캘리브레이션 과정의 블록도
Fig. 9. Block diagram of camera and projector calibration.

이상 기술한 모든 처리 과정을 Solaris 2.4 운영 체제를 사용하는 현대 Axil 311 Workstation에서 C 언어로 구현하였다. 그림 9에는 카메라와 프로젝터의 캘리브레이션 과정을, 그림 10에는 3차원 좌표의 계산 과정을 블록도로 나타내었다.

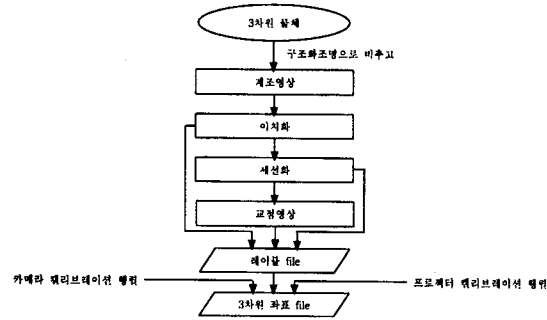


그림 10. 3차원 좌표 계산 처리 과정의 블록도
Fig. 10. Block diagram of range data computation.

또한 그림 11에는 전체 시스템의 구성을 나타내었다.



그림 11. 전체 시스템의 구성 영상
Fig. 11. Picture of the developed system.

V. 실험 결과

이상 기술한 과정을 거쳐 구현된 시스템을 이용하여 실험을 하였다. 먼저 카메라와 프로젝터의 캘리브레이션용 영상을 획득하였고, 원기둥, 컴퓨터 스피커, 원기둥과 상자 두물체가 같이 놓여있는 경우 등의 여러 영상을 획득하였다. 획득한 영상의 크기는 모두 640×480이다.

그림 12의 상단부터 순서대로 구조화 조명을 이용하여 얻은 원기둥의 계조 영상, 이치화된 영상, 세선화된 영상, 추출된 교점의 영상이다.

그림 13에는 위의 여러 단계를 거쳐 얻은 3차원 데이터를 이용하여 재구성한 영상을 나타내었다.

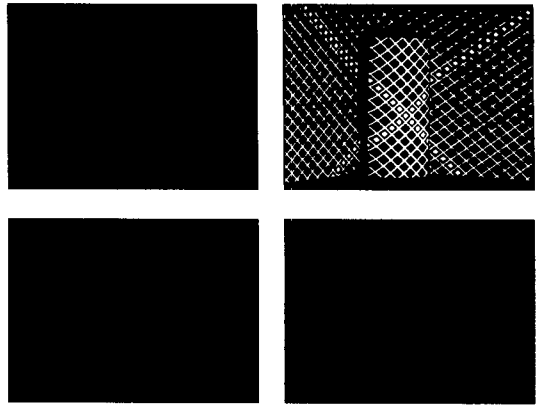


그림 12. 3차원 데이터를 얻기까지의 단계별 과정
Fig. 12. Images in processing steps.

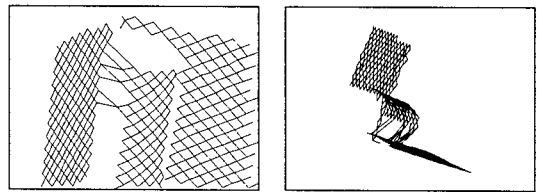


그림 13. 얻은 데이터를 이용하여 재구성한 영상
Fig. 13. Images reconstructed from the computed 3D data.

1. 레이블링 알고리즘의 효과 실험

컴퓨터에서 사용하는 소형 스피커에 패턴을 투사하고 획득한 영상을 그림 14에 표시하였다. 이 영상을 이용하여 이치화, 세선화, 교점 추출 등의 과정을 거쳐, 각 교점과 이웃 교점과의 관계와 부근에 표지가 존재하는 지 알 수 있다.



그림 14. 컴퓨터 스피커의 구조화 조명 영상
Fig. 14. Structured light image of the speaker.

이렇게 얻은 데이터에 대해 Keizer의 레이블링 방법으로 구한 교점의 좌표값을 이용해 재구성한 결과와 본 논문에서 제안한 새로운 레이블링 방법으로 구한 교점의 좌표값을 이용해 재구성한 것을 그림 15에 나타내었다.

두 그림에서 알 수 있듯이 Keizer의 방법으로는 상당히 많은 부분에서 레이블링이 제대로 되지 않는 반면, 새로 제안한 방법은 매우 효과적으로 동작함을 확인할 수 있다. Keizer의 방법은 앞에서 기술한 대로 영상의 우하부분의 경우 올바른 u 좌표값을 얻을 수 없기 때문이다.

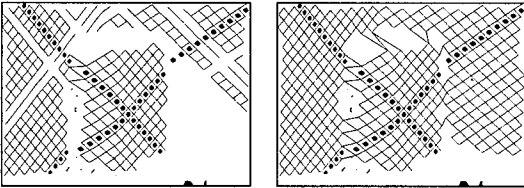


그림 15. Keizer의 레이블링 방법(좌측)과 새로운 레이블링 방법(우측)으로 얻은 좌표로부터 재구성한 영상

Fig. 15. Reconstructed images with Keizer's labeling method versus with the proposed method.

2. 패턴 B를 이용한 실험

흰색 원기둥 1개와 과자깡통위에 종이 상자를 올려 놓은 장면에 대해 패턴A와 패턴B를 사용하여 얻은 영상을 이치화한 결과를 그림 16에 표시하였다. 좌하단 부분에 투사패턴이 잘 보이지 않는 이유는 깡통의 배경색이 어두워 패턴의 반사도가 다른 물체와 다르기 때문이다.

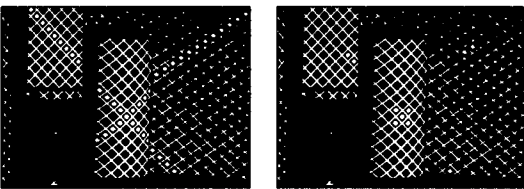


그림 16. 패턴 A(좌측)와 패턴 B(우측)를 사용하여 얻은 영상의 이치화 결과

Fig. 16. Thresholded images using Pattern A and Pattern B.

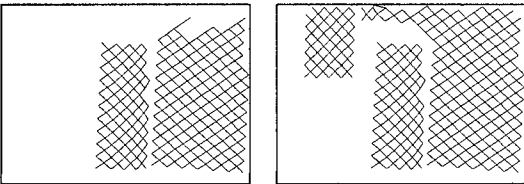


그림 17. 패턴 A(좌측)와 패턴 B(우측)를 사용하여 얻은 데이터로 재구성한 영상

Fig. 17. Images reconstructed using Pattern A(left) and Pattern B(right).

그림 17에는 패턴 A를 사용하여 데이터를 얻은 경우와 패턴 B를 사용하여 데이터를 얻은 경우를 각각 도시하였다. 새로운 패턴 B를 사용하는 것이 올바른 레이블링에 매우 효과적임을 알 수 있다.

이상과 같이 계산된 3차원 데이터의 정확도를 알아보기 위해 프로젝터 캘리브레이션에 사용된 영상을 이용하였다. 그림 8의 프로젝터 캘리브레이션용 영상을 보면 수많은 점들이 캘리브레이션 물체의 두 평면에 투사된 것을 알 수 있다. 물체의 $x = 0$ 인 평면과 $y = 0$ 인 평면 상에 투사된 교점의 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.

표 1. 3차원 데이터 획득 시스템의 오차(단위:mm)

Table 1. Errors of the developed system(unit: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	0.049058	0.035493

표 1에서 알 수 있듯이 이 시스템의 오차는 0.1mm 내외인 것을 알 수 있으며 영상처리과정에서의 오차를 고려한다면 상당히 정밀한 데이터를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 오차의 요인에 대해 고찰해보면 카메라와 프로젝터의 캘리브레이션 오차와 삼각법에 의해 거리 데이터를 계산할 때의 오차로 구분하여 생각할 수 있다. 본 시스템에서 사용한 방법이 이치화, 세선화, 교점 추출등의 여러 영상 처리 방법에 의존하므로 이 과정에서의 오차에 종속되는 것은 피할 수 없다. 앞으로 정량적인 오차의 해석이 필요할 것 같다. 영상의 해상도를 높인다면 삼각법에 의한 계산 오차를 조금 줄일 수 있을지 모르나 역시 이 오차를 아주 없앨 수는 없다.

VI. 결 론

본 연구에서 구현된 시스템의 주요 특징과 성과는 다음과 같다.

- 실험실에서 제작한 캘리브레이션 물체와 슬라이드 프로젝터, 카메라를 사용하여 시스템을 구현

하였기 때문에 저렴한 비용으로 손쉽게 3차원 데이터 획득 시스템을 구현할 수 있다.

- 캘리브레이션 물체 위에 올려놓을 수 있는 작은 물체의 경우, 얻게 되는 3차원 데이터의 범위가 한정되므로(x, y, z 좌표가 모두 음이 아니어야 함), 잘못 계산된 데이터가 있는 경우 자동 제거가 가능하다.
- 그리드 레이블링의 오차를 줄일 수 있으며 기존의 방법으로 레이블링을 할 수 없는 부분을 더욱 줄이는 그리드 레이블링 기법을 제안하였다.
- 새로운 그리드 패턴을 고안하여 이 패턴이 그리드 레이블링에 매우 효과적임을 실험 데이터를 통해 입증하였다.

앞으로의 연구과제는 시스템의 안정화와 좀 더 세밀한 오차의 해석 및 얻어지는 3차원 데이터를 이용한 물체의 모델링 등이다. 본 시스템은 영상 처리 프로그램의 효율성에 의존하는 부분이 많으므로 보다 안정적인 데이터 획득을 위해 Tsai의 캘리브레이션 방법^[11]과 보다 나은 이치화 방법^[12]을 사용할 계획이며 물체의 모델링에 사용하기 위해 회전 테이블위에 물체를 올려놓고 일정 각도를 회전시키면서 데이터를 얻는 방법을 고려 중이다.

참 고 문 헌

- [1] P. M. Will and S. Pennington, "Grid coding : a preprocessing technique for robot and machine vision", *Artificial Intelligence*, vol. 2, pp 319-329, 1971.
- [2] J. J. Le Moigne and A. M. Waxman, "Structured light patterns for robot mobility", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 4, no. 5, pp 541-548, 1988.
- [3] G. Hu and G. Stockman, "3-D surface solution using structured light and constraint propagation", *IEEE Trans. on PAMI*, vol. 11, no. 4, pp 390-402, 1989.
- [4] 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*, vol. 19, no. 6, pp 1350-1364, 1989.
- [5] R. L. Keizer and S. M. Dunn, "Marked grid labeling", *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp 612-617, IEEE Computer Society Press, 1989.
- [6] R. Jain, R. Kasturi, and B. G. Schunck, *Machine Vision*, McGraw-Hill, 1995.
- [7] J. D. Foley, A. van Dam, J. F. Hughes, R. L. Phillips, *Introduction to Computer Graphics*, Addison-Wesley, 1994.
- [8] S. M. Dunn, L. Janos and A. Rosenfeld, "Bimean clustering", *Pattern Recognition Letters*, vol. 1, pp 169-173, 1983.
- [9] Y.-S. Chen and W.-H. Hsu, "A modified fast parallel algorithm for thinning digital patterns", *Pattern Recognition Letters*, vol. 7, pp 99-106, 1988.
- [10] T. Y. Zhang and C. Y. Suen, "A fast parallel algorithm for thinning digital patterns", *Communications of the ACM*, vol. 27, no. 3, pp 236-239, 1984.
- [11] R. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-3, no. 4, pp 323 - 344, 1987.
- [12] J. R. Parker, "Gray level thresholding in badly illuminated images", *IEEE Trans. on PAMI*, vol. 13, no. 8, pp 813-819, 1991.

저 자 소 개

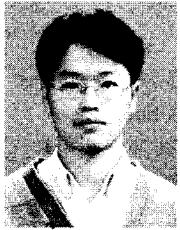


全 熙 星(正會員)

1958년 8월 9일생. 1981년 2월 서울대학교 전기공학과(학사). 1983년 2월 서울대학교 전기공학과(석사). 1992년 5월 Rutgers - The State University of New Jersey(미국) Ph. D. 1983년 - 1986년 금성반도체(주) 주임연구원. 1992년 - 1993년 삼성전자(주) 통신연구소 수석연구원. 1993년 9월 - 현재 울산대학교 컴퓨터·정보통신공학부 부교수. 주관심 분야는 컴퓨터 비전, 영상 처리, 3차원 컴퓨터 그래픽스 등

朴 宰 弘(正會員)

1969년 10월 25일생. 1995년 2월 울산대학교 컴퓨터공학과(학사). 1998년 2월 울산대학교 컴퓨터공학과(석사). 현재 (주)현대상선 정보기술실 근무. 주관심 분야는 컴퓨터 비전, 컴퓨터 그래픽스 등



高 文 錫(正會員)

1971년 11월 29일생. 1997년 2월 울산대학교 컴퓨터공학과(학사). 현재 울산대학교 컴퓨터공학과 석사과정. 주관심 분야는 영상 처리, 컴퓨터 비전 등