유비쿼터스 환경에서 구조광 기반 사용자 친화적 3차원 객체 재구성 기법

User-friendly 3D Object Reconstruction Method based on Structured Light in Ubiquitous Environments

정세화*, 이정진**

서울대학교 컴퓨터공학부*, 숭실대학교 컴퓨터학부**

Sei-Hwa Jung(the2384@naver.com)*, Jeongjin Lee(leejeongjin@ssu.ac.kr)**

요약

3차원 공간에서 물체를 재구성하기 위하여 제안된 기존 기법들은 여러 개의 카메라를 사용하거나 여러 장의 사진을 촬영하여 물체를 재구성하기 때문에 특정한 하드웨어를 필요로 하거나 촬영 장소에 민감하고 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 본 논문에서는 유비쿼터스 환경에서 구조광 기법을 이용하여 한 장의 사진의 정보로부터 3차원 물체를 재구성하는 방법을 제안한다. 구조광 기법 적용을 위한 칼라 패턴은 기존 연구에서 제안된 것을 사용한다. 본 논문에서는 실제로 객체 재구성 성능에 매우 중요한 줄무늬 패턴 추출과 줄무늬 패턴 매칭에 다양한 영상 처리 기법들로 구성된 파이프라인을 새롭게 제안하고, 패턴 매칭을 위한 최적의 비용 함수를 제안한다. 제안 기법을 통하여 갤럭시 빔과 같은 초소형 프로젝터를 탑재한 스마트폰과 같은 유비쿼터스 혹은 모바일 환경에서 적은 계산 복잡도와 간단한 환경 설정으로 3차원 물체를 재구성하는 것이 가능하다.

■ 중심어 : | 유비쿼터스 환경 | 3차원 데이터 복원 | 구조광 | 영상 처리 | DLP 프로젝터 |

Abstract

Since conventional methods for the reconstruction of 3D objects used a number of cameras or pictures, they required specific hardwares or they were sensitive to the photography environment with a lot of processing time. In this paper, we propose a 3D object reconstruction method using one photograph based on structured light in ubiquitous environments. We use color pattern of the conventional method for structured light. In this paper, we propose a novel pipeline consisting of various image processing techniques for line pattern extraction and matching, which are very important for the performance of the object reconstruction. And we propose the optimal cost function for the pattern matching. Using our method, it is possible to reconstruct a 3D object with efficient computation and easy setting in ubiquitous or mobile environments, for example, a smartphone with a subminiature projector like Galaxy Beam.

■ keyword : | Ubiquitous Environment | 3D Data Reconstruction | Structured Light | Image Processing | DLP Projector |

* 본 연구는 미래창조과학부 및 한국산업기술평가관리원의 산업융합원천기술개발사업(정보통신)[10044910, 다중의료영상
을 활용한 3차원 초정밀 시뮬레이션 기반 심·혈관 질환 진단-치료지원 통합소프트웨어 시스템 개발과 2012년도 정부(교
육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No. 2012R1A1A2043819).

접수일자 : 2013년 08월 16일

심사완료일 : 2013년 11월 13일

접수일자 : 2013년 11월 12일

교신저자 : 이정진, e-mail : leejeongjin@ssu.ac.kr

I. 서론

카메라와 관련된 영상 처리 기술은 카메라 성능의 발전, 웹 카메라를 통한 실시간 촬영 등을 바탕으로 비약적으로 발전해왔다. 단순히 카메라로 찍은 사진을 보관하는 것에서 출발하여 사진에 포함된 잡음 성분을 제거하기도 하고, 손실된 정보를 복원하기도 하고, 사진 내의 특정 부분을 찾기도 하고, 여러 장의 사진을 이용하여 파노라마 영상을 만들거나 깊이 성분을 추출하여 3차원 영상으로 복원하는 등의 많은 연구가 이루어졌다[1]. 최근에는 고성능 카메라와 웹캠의 개발로 더 높은 해상도의 사진을 빠르게 처리할 수 있기 때문에 더 자세하고 정밀한 작업을 수행할 수 있게 되었다.

최근 스마트폰과 태블릿 PC 등은 대부분 2개 이상의 카메라를 가지고 있다. 이러한 기기의 발달과 영상처리 기술의 발전의 한 예로 안드로이드의 아이스크림 샌드위치 운영체제에서는 얼굴을 인식해서 폰의 잠금을 해제하는 기능인 '페이스 언 락'을 제공한다. 또한, 삼성전자는 [그림 1]에서와 같이 스마트폰에 빔 프로젝터 기능을 추가하여 15루멘의 밝기와 640×360의 해상도를 보여주는 50인치 프로젝션 화면을 구현할 수 있는 갤럭시 빔을 출시하였다. 앞으로 프로젝터를 탑재한 스마트폰이 더욱 보급화 된다면 3차원 얼굴 인식을 지원하여 2차원 얼굴 인식보다 더 활용 분야가 많아질 것이다.

그림 1. 갤럭시 빔

2차원 영상들을 이용하여 3차원 데이터로 재구성하는 것은 컴퓨터 비전에서 오랫동안 연구되어 왔다. 3차원으로 데이터를 재구성하는 가장 기본적인 방법은 카메라 2대를 두고 3차원 공간의 깊이를 구하는 것이다[2]. 사람의 눈은 수평으로 일정 거리가 떨어져 있는데 두 눈이 일정거리 떨어져 있기 때문에 양안시차와 운동

시차가 생긴다[3]. 이러한 이유로 우리는 입체감을 가질 수 있게 된다. 2대 이상의 카메라를 이용한 3차원 공간의 깊이를 구하는 연구는 이미 상당 부분 진전이 이루어져 좋은 결과를 내고 있다. 하지만, 같은 성능의 카메라가 최소 2대가 필요하다는 단점이 있다.

3차원 공간의 깊이를 계산하기 위한 다른 방법에는 프로젝터와 구조광(Structured Light)을 이용한 3차원 재구성 방법이 최근 각광을 받고 있다[4]. 이 방법은 주로 빔 프로젝터를 사용하여 물체에 패턴을 투사하고 패턴이 투사된 물체의 환경을 카메라로 촬영하여 얻은 정보를 바탕으로 3차원 데이터를 얻는 방법이다[5]. 이러한 구조광을 이용하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 시간에 따라 다른 패턴을 사용하는 방법과 하나의 패턴 속에 많은 정보를 포함하고 있는 공간 패턴을 사용하는 방법이 존재한다.

시간을 활용한 패턴 투사 방법은 시간에 따라 모양이 다른 패턴을 물체에 투사는 하는 방법이다[6]. 패턴을 물체에 투사시켜 얻은 사진과 투사하는 패턴들의 형태를 비교하여 3차원 데이터 값을 얻을 수 있다. 가장 대표적인 방법은 줄무늬 패턴의 개수를 시간이 지남에 따라 늘려가는 방법이다[7]. 이 방법을 사용하면 여러 장의 사진을 통해 물체를 재구성하기 때문에 정확성이 보장된다는 장점이 있다. 하지만 시간을 두고 패턴을 계속 투사하기 때문에 물체의 움직임에 굉장히 민감하다[5]. 또한 패턴을 일정 시간 투사해야한다는 점, 여러 장의 사진을 처리해야 한다는 점 때문에 공간 패턴 투사 방법보다 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 이런 이유로 실시간으로 3차원 깊이 정보를 얻고 싶은 경우에는 시간 패턴 방법을 사용하는 것은 무리가 있다.

공간을 활용한 패턴 투사 방법은 한 번에 많은 정보를 담고 있는 패턴을 물체에 투사하는 방법이다. 시간을 활용한 패턴과는 달리 패턴의 색을 주로 다양한 색으로 구성 하는 경우가 많다. 시간을 활용한 패턴과 마찬가지로 패턴의 종류는 다양하게 존재하는 데 대표적으로 줄무늬, 격자무늬, 모자이크, 그라데이션(gradation)을 사용한다[8]. 이러한 방식의 공간 패턴들은 패턴을 한 번 투사하여 많은 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 물체에 한 번 투사한 패턴을 촬영하여 얻

은 데이터로 3차원 물체를 재구성할 수 있다는 장점으로 움직이는 물체나 크기가 변하는 물체도 재구성할 수 있다는 장점도 있다[9]. 하지만 다양한 색을 사용하기 때문에 빛에 민감하다는 단점이 있다. 색상을 띄고 있는 물체의 경우 투사하는 패턴의 색과 혼합된다면 색상 정보가 손실되어 좋은 결과를 얻기 힘들다[4].

결과적으로 시간을 활용한 패턴 투사 방법은 여러 개의 패턴을 투사하는 데 일정 시간이 걸리고 여러 장의 결과물을 가지고 데이터 값을 얻어내기 때문에 계산량이 많다는 문제가 있고, 또한 움직이지 않는 물체를 대상으로 해야 한다. 공간을 활용한 패턴 투사 방법은 두 개의 카메라가 아닐 경우 정확한 데이터 재구성이 힘들기 때문에 대부분 두 개 이상의 카메라를 사용한다. 두 대의 카메라를 사용하는 것은 카메라의 위치와 물체의 위치 등에 영향을 많이 받기 때문에 실생활에서 임의의 물체를 고속으로 재구성하고자 할 때 사용하는 데는 어려움이 있다.

본 논문에서는 유비쿼터스 환경에서 하나의 카메라와 하나의 프로젝터를 통하여 촬영된 한 장의 사진으로부터 구조광 방식을 이용하여 깊이 정보를 계산하여 3차원 공간에서 물체를 재구성하는 기법을 제안한다. 구조광 기법 적용을 위한 칼라 패턴은 기존 연구에서 제안된 것을 사용한다. 본 논문에서는 줄무늬 패턴 추출과 줄무늬 패턴 매칭에 다양한 영상 처리 기법들로 구성된 파이프라인을 새롭게 제안하고, 패턴 매칭을 위한 최적의 비용 함수를 제안한다. 먼저 카메라로 촬영한 사진의 정보를 효과적으로 얻어 내기 위하여 필터링을 수행한 후에 줄무늬 패턴의 대표 부분을 선택적으로 추출한다. 다음으로 색 공간이 분할된 줄무늬 패턴과 프로젝터가 투사하는 원본 줄무늬 패턴을 서로 대조하여 최소의 비용이 발생하는 줄무늬를 선택한다. 마지막으로 카메라와 프로젝터의 기하학적 관계를 통해 추출된 모든 점의 3차원 깊이 정보를 계산한다.

본 논문은 다음과 같은 순서로 구성되어 있다. 2장에서는 본 논문에서 제안한 구조광을 이용한 3차원 물체 재구성 기법에 대하여 설명한다. 3장에서는 실험 결과를 기술하고, 4장에서는 결론을 맺는다.

II. 구조광을 이용한 3차원 물체 재구성 기법

1. 구조광을 이용한 3차원 재구성 기법의 구성

구조광을 이용한 3차원 재구성 기법은 크게 줄무늬 패턴 추출, 줄무늬 패턴 매칭, 3차원 깊이 정보를 계산하여 재구성하는 단계로 구성된다. 줄무늬 패턴 추출은 카메라로 촬영한 사진의 정보를 효과적으로 얻어 내기 위해서 필터링을 수행한 후 줄무늬 패턴의 대표 부분을 선택적으로 추출한다. 줄무늬 패턴 매칭은 색 공간이 분할된 줄무늬 패턴과 프로젝터가 투사하는 원본 줄무늬 패턴을 서로 대조하여 최소의 비용이 발생하는 줄무늬를 선택하는 역할을 한다. 마지막으로 3차원 깊이 정보 계산은 카메라와 프로젝터의 기하학적 관계를 통해 추출된 모든 점의 깊이 정보를 계산한다. 위의 단계를 거친 후 선택적으로 백색광으로 촬영한 얼굴 정보를 3차원 점 집단 위에 모델링함으로써 얼굴을 효과적으로 재구성한다.

2. 구조광을 위한 패턴 생성

본 논문에서 다양한 색으로 구성된 색상 패턴을 사용하였다[10][11]. 패턴은 [그림 2]와 같이 빨강색, 노랑색, 파랑색, 녹색, 자주색, 청록색, 흰색 총 7색이 반복되어 이루어져있다. 대표적인 색상 3채널인 R, G, B의 조합으로 구성하였는데 검은색 부분의 패턴은 흰색과 중복되므로 생략하였다. 줄무늬 색이 연속되어 짧은 주기로 반복될 경우 구역 간의 혼동이 존재할 수 있으므로 긴 주기를 가지고 여러 가지 색을 혼합적으로 사용하여 다른 구역과 서로 구분될 수 있도록 패턴을 생성하였다 [10][11].

그림 2. 생성된 패턴

3. 줄무늬 패턴 추출

3차원 얼굴 재구성의 첫 단계인 줄무늬 패턴 추출은 크게 다음의 4단계로 구성된다. 먼저 영상 전체의 과정으로 가로 방향으로 존재하는 줄무늬 패턴의 특징 정보를 효과적으로 부각시키기 위해서 샤프닝 필터(Sharpening Filter)를 수직 방향으로 적용한다[12]. 본 연구에서는 몇 번의 실험을 거친 후 필터의 크기를 3×3 으로 정하였다. 만약 필터의 크기를 5×5 나 그 이상의 크기로 정한다면 현재 픽셀을 기준으로 다른 픽셀과의 간섭이 더 커지게 되어 줄무늬 패턴의 색상 값이 다른 줄무늬 패턴에 의해 손실될 가능성이 있기 때문이다.

다음은 에지(Edge)를 추출하는 단계이다. 본 연구에서는 가로 성분의 에지를 추출하는 것이 목적이다. 에지 추출을 하기 위해 영상을 먼저 그레이 스케일로 변환한다. 다음으로 1차 미분을 활용하여 에지를 검출한다. 영상의 가로 성분을 추출하는 것이 목적이므로 y축 방향으로 1차 미분을 적용하여 [그림 3]과 같이 에지를 추출하였다.

그림 3. 입력 영상에서 에지 추출 결과

다음 단계로 줄무늬 패턴의 영역을 토대로 각각의 줄무늬를 대표하는 중심점들을 찾는다. 줄무늬 패턴의 중심점을 찾는 이유는 줄무늬 패턴을 투사한 관심 영역과 줄무늬 패턴의 원형과의 비교를 쉽게 하기 위해서이다. 영상의 각 열마다 넓은 줄무늬 각각을 하나의 대표 중심점으로 축소한다. 먼저 영상의 모든 열을 각각 스캔한다. 그리고 각 줄무늬에서 최대가 되는 한 점을 R, G, B 각각의 채널에 대해서 구한다. 다음으로 각각의 채널에서 값이 최대가 되는 점 3개의 평균을 구해서 줄무늬를 대표할 수 있는 하나의 점을 선택한다. 이 과정을 모든 열 라인을 따라 순차적으로 다 진행하면 [그림 4]와 같은 결과가 나온다.

그림 4. 줄무늬 패턴의 중심점의 형태

다음으로 찾은 중심점이 어떤 줄무늬 패턴의 색상을 나타내는 지를 결정한다. x축 위치에 따라 같은 y축의 범위만큼 줄무늬 패턴을 스캔했을 때 Red, Green, Blue 각 채널의 값이 다르게 된다. 가로로 봤을 때 분명 같은 줄무늬 패턴이기 때문에 같은 값이 나와야 하지만 피부 표면이 빛을 반사하기도 하고 얼굴의 형태에 따라 어두운 부분도 나타나게 된다. 이를 보정하기 위하여 먼저 중심점에서 각 픽셀의 색상 값을 비율로 측정한다. 비율은 다음과 같이 구성된다($\frac{r}{g}, \frac{r}{b}, \frac{g}{r}, \frac{g}{b}, \frac{b}{r}, \frac{b}{g}$).

이 방법을 통해서 밝기 값에 독립적인 색상 정보를 선택할 수 있다. 이 밝기 비율 값은 비율에 따라 정렬을 할 수 있는데 범위를 0과 1사이 값으로 정규화를 먼저 수행한다. 정규화를 한 다음 색상의 값에 따라 줄무늬가 어떤 색을 나타내는 지에 대해 결정한다. 만약 $\frac{r}{g}, \frac{r}{b}$ 의 값이 현재 위치의 픽셀에서 정렬된 비율 값 중에 가장 높을 경우 그 픽셀의 대표 값은 빨간색 채널로 분류된다. 그러므로 모든 비율 값이 1에 가깝다고 하면 그 픽셀은 흰색으로 분류된다. 이 단계 이후로 모든 줄무늬는 [그림 5]와 같이 줄무늬를 대표하는 색상 값을 가지게 된다.

그림 5. 줄무늬 패턴의 중심점의 색상 값 선택 결과

4. 줄무늬 패턴 매칭

전 단계들을 통하여 줄무늬 패턴을 대표하는 점과 줄무늬 색상 값 리스트들을 얻을 수 있었다. 이번 단계에서는 투사한 줄무늬 패턴 영상과 원본 줄무늬 패턴 영상을 서로 매칭(Matching)하여 최적의 매칭을 찾는 과정을 수행한다. 줄무늬 패턴을 매칭하여 깊이 정보를 계산하기 위해서는 먼저 얼굴에 투사한 패턴의 원본이 필요하다. 줄무늬 패턴을 투사한 부분을 $S_{project}$, 투사하는 줄무늬 패턴 원본을 S_{origin} 이라 하자. 여기서 $S_{project}$ 와 S_{origin} 사이의 일치하는 점을 찾고 피부나 센서 조건으로 인해 인식이 제대로 되지 않는 줄무늬 패턴 요소들을 제외하는 것이 바로 이번 단계의 목적이다.

줄무늬 패턴 매칭과 같은 이런 종류의 문제는 전형적인 조합적 최적화 문제로 해석할 수 있다. 본 연구에서는 모든 열 라인에 대한 줄무늬 패턴의 조합 중에서 각각 가장 일치하는 줄무늬를 찾는다. 조합적 최적화 문제를 해결하기 위한 가장 일반적인 방법인 비용 함수를 사용하여 하나의 스캔 라인내의 모든 줄무늬 패턴에서 원본 줄무늬 패턴과 얼마나 일치하는 지에 대해 값을 측정하도록 한다.

각 스캔라인에 대해서 두 가지 함수를 사용해서 비용을 정의한다.

- $Similarity(i)$: $S_{project}$ 와 S_{origin} 의 i 번째 줄무늬 패턴의 중심점의 색상 채널 값들의 차이를 구한다.
- $Difference(i, i - 1)$: $S_{project}$ 에서 i 와 $i-1$ 번째 줄무늬 패턴의 시퀀스의 차이에 대해 페널티(Penalty) 값을 구한다.

위의 두 함수를 사용해서 비용 함수를 나타내면 수식 (1)과 같다.

$$C = Similarity(0) + \sum_{i=1}^m (Similarity(i) + Difference(i, i - 1)) \quad (1)$$

여기서 m 값은 스캔한 라인에 포함된 줄무늬의 총 수를 의미한다. [그림 6]을 통해서 위의 수식 (1)을 설명하면 다음과 같다.

그림 6. 줄무늬 패턴 매칭

[그림 6]에서 좌측의 $S_{project}$ 가 중심점 색상 추출 결과로 흰색, 청록색, 자주색, 노랑색, 빨강색, 녹색, 파랑색 순으로 나왔다면 원본 패턴의 색상 값 배열 순서와 같으므로 C 의 값은 0이 될 것이다. 물론 $S_{project}$ 의 0번째 줄무늬가 흰색이 아닐 수도 있기 때문에 C 의 값은 0이 아닐 수도 있다. 하지만 위와 같은 순서로 색상 값들이 나왔다면 다른 열들보다 C 의 값이 낮을 것이다. 그러므로 여기서는 0으로 가정한다. 위의 예를 살펴보면 S_{origin} 에서 0번째 줄무늬 패턴인 흰색이 $S_{project}$ 에서도 검출되었으므로 차이 값이 없을 것이다. 그러므로 $Similarity(0)$ 은 0이 나오게 될 것이다. 또, $i = 0 \sim m$ 까지 비교를 할 때 계속 같은 패턴이 매칭되므로 C 의 값은 최소가 될 것이다. 반면에 [그림 6]에서 중심점 색상 추출 결과 흰색, 청록색, 노랑색, 노랑색 순으로 나왔다고 가정하면 0번째는 흰색 - 흰색, 1번째는 청록색 - 청록색 매칭이 되겠지만 2번째는 노랑색 - 자주색 매칭이 되므로 $Similarity(2)$ 에서 비용이 발생한다. 그리고 $Difference$ 에서도 $Difference(2, 1)$ 와 $Difference(3, 2)$ 에서 페널티 값이 발생하게 된다. 원래 청록색 - 자주색 - 노랑색 순으로 나와야하는 데 청록색 - 노랑색 - 노랑색 순으로 패턴이 검출되었으므로 노랑색 패턴의 위와 아래 줄무늬 패턴에서 $Difference$ 에서 페널티 값이 발생한다. 이 때 잘못 검출된 이 줄무늬 패턴을 제외함으로써 패턴 매칭의 오류를 최대한 제거한다.

5. 3차원 깊이 정보 계산

줄무늬 패턴 매칭의 비용 함수를 통해서 가장 $S_{project}$ 와 유사한 패턴을 찾을 수 있었다. 이번 단계에서는 위에서 구한 각각의 줄무늬 패턴의 매칭 쌍을 통해 3차원 깊이 정보를 구한다. 3차원 깊이 정보는 삼각화 방법을 통해 만들어진 3차원 점 집합을 통하여 얻을 수 있다.

먼저 삼각화 방법을 사용하기 위해서는 프로젝터와 카메라의 기하 관계를 알아내는 초기화 과정이 필요하다. 초기화 과정을 통해 카메라와 프로젝터는 정사영 행렬식을 가질 수 있는 데, 이는 카메라와 프로젝터 교정으로 얻을 수 있다.

카메라 교정을 위해서는 카메라 파라미터에 대한 계산이 필요하다. 이때, 사용하는 카메라의 보정 알고리즘은 Tsai의 알고리즘이 가장 대표적이다[13]. 카메라 파라미터는 카메라의 렌즈에 따라 고유한 속성을 가지며 본 논문에서는 핀홀 카메라(Pinhole camera)를 기반으로 한 속성 모델을 이용한다[14]. 카메라 파라미터는 외부(Extrinsic) 파라미터와 내부(Intrinsic) 파라미터로 구성된다. 외부 파라미터는 카메라의 방향, 위치로 나타낼 수 있고 내부 파라미터는 카메라의 초점거리(Focal point), 원리 축(Principal axis), 시야각으로 나타낼 수 있다. 외부 파라미터는 카메라의 위치를 나타내는 이동 벡터 T 와 카메라의 방향을 나타내는 회전 행렬 R 으로 구성된 $[R \ T]$ 로 나타낼 수 있다. 이를 통해 실제 세계와 카메라의 3차원 좌표계의 변환을 할 수 있다[15]. 내부 파라미터는 다음 수식 (2)의 행렬로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \alpha_x & \gamma & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

수식 (2)의 행렬에서 α_x, α_y 는 초점 거리를 나타내고 γ 는 x축, y축 사이의 왜도 계수를 나타낸다. u_0, v_0 는 영상 중심이 되는 주점을 나타낸다. 이들을 이용하여 영상내의 좌표와 카메라 좌표 간 변환을 할 수 있다. 이렇게 카메라 내, 외부 파라미터 정보를 찾아내는 과정을 카메라 교정이라고 한다. [그림 7]과 같이 미리 정의된 패턴을 이용하여 다양한 각도에서 여러 차례 촬영한 뒤 얻은 영상의 왜곡 양상을 분석하여 카메라의 행렬 값들을 추정한다.

그림 7. 카메라 보정

프로젝터는 카메라와 달리 영상을 투사하는 장비이므로 반대의 경우로 생각하여 교정을 할 수 있다. 카메라의 경우 3차원의 패턴을 2차원 영상으로 가져와서 교정을 했다면 프로젝터의 경우 2차원의 패턴을 3차원에 투사하는 것으로 구할 수 있다. 프로젝터가 투사한 패턴 영상이 3차원에서 어떤 지점에 도착하는 지에 대하여 계산함으로써 프로젝터의 교정을 할 수 있다. 패턴과 패턴 사이의 선을 통해 교정하기 때문에 굴곡이 심한 표면에 투사하면 교정이 잘 되지 않는다. [그림 8]과 같이 미리 정의된 패턴을 프로젝터를 이용하여 투사한다. 그리고 실제 패턴의 좌표와 프로젝터에서 투사한 패턴 좌표 사이의 관계인 호모그래피(Homography)를 계산하고 두 좌표가 서로 일치하도록 여러 번의 투사 과정을 거친 다음, 프로젝터로 인해 투영된 패턴의 왜곡 양상을 분석하여 프로젝터의 교정이 이뤄진다.

그림 8. 프로젝터 보정

위의 두 단계를 거쳐 카메라와 프로젝터의 교정을 하였다. 이번 에는 위에서 얻은 $\{W\}$: 월드 좌표계와 $\{C\}$: 카메라 좌표계, $\{P\}$: 프로젝터 좌표계를 활용하여 [그림 9]에서와 같이 3차원 깊이 정보를 추출한다. 3차원 깊이 정보를 추출하는 것은 에피폴라(Epipolar) 기하 안에서 프로젝터와 영상 사이의 정합점을 찾는 것이다[5].

그림 9. 구조광을 사용한 3차원 정보 획득 방식

[그림 10]의 에피폴라 기하에서 3차원 공간 상의 한 점 X 는 X_1 , X_2 와 같은 점이다. 패턴을 쏘는 프로젝터 P_p 와 패턴이 투사된 영상을 촬영하는 카메라 C_c 의 중심을 이어주는 선을 기준선이라고 하며 이 기준선과 영상 평면과 만나는 점 E_1 , E_2 를 에피폴(Epipole)이라 한다. 이러한 기하학적 정보로부터 카메라의 영상에서 X_2 와 E_2 를 잇는 한 선 l 을 구할 수 있다. 이 l 을 에피폴라 라인(Epipolar line)이라 한다.

그림 10. 에피폴라 기하

위의 에피폴라 기하를 사용하면 $S_{project}$ 위의 한 점은 S_{origin} 내의 에피폴라 라인에서 한 점과 일치 한다는 것을 알 수 있다. 따라서 줄무늬 패턴 매칭의 쌍을 기준으로 프로젝터에서 투사하는 패턴 중 i 번째 줄무늬 열과 카메라에서 얻은 영상 중 i 번째 픽셀 값들을 비교하여 2차원에서 점의 위치를 추출할 수 있다. 이 점의 위치를 프로젝터와 카메라 교정 방법을 역으로 적용하면 2차원의 행렬 값을 3차원으로 만들 수 있다. 이 과정을 영상의 모든 줄무늬 패턴의 중심점에 적용하면 3차원 점 집합을 만들 수 있다.

III. 실험 결과

1. 실험 환경

본 연구에서 실험한 장비는 다음과 같다. CPU는 Intel Core i3 2.93 GHz CPU를 갖는 노트북에서 10 루멘(lumen)의 밝기와 44.8 x 67.4 x 14.2 mm³ 크기를 갖는 [그림 11]의 DLP Pico Projector 2.0을 이용하였다. 촬영 장비로는 Logitech C910 웹캠을 이용하였다. 실험

환경의 특성은 저사양 노트북과 일반적인 웹캠 그리고, 10루멘의 밝기를 갖는 초소형 DLP Pico 프로젝터를 이용하여 15루멘의 밝기를 갖는 삼성전자 스마트폰 '갤럭시 시뮬'의 사양보다 저사양으로 구축하여 최대한 유비쿼터스 환경의 모바일 기기에 가까운 환경을 구축하였다.

그림 11. DLP Pico Projector

이 장비들을 프로젝터와 카메라를 같은 수직선 상에 위치하게 하여 얼굴을 촬영하였다. 프로젝터와 카메라의 위치에 따라 실험 결과에 큰 영향을 미치므로 여러 번의 테스트를 거쳐 위와 같은 위치를 정하였다. 카메라와 프로젝터가 얼굴의 정면에 위치하면 줄무늬 패턴의 왜곡이 직선으로 투사되므로 왜곡이 거의 발생하지 않는다. 따라서 위와 같이 아래에서 투사하여 패턴의 왜곡이 카메라에 투영될 수 있도록 환경을 구축하게 되었다.

2. 실험 결과

구조광을 영상 처리 과정을 거쳐 각 스캔 열마다 줄무늬 패턴을 매칭하고 매칭된 줄무늬 패턴을 3차원 깊이 정보로 재구성한 3차원 점 집합의 분포는 아래와 같다. 얼굴 전체에 대하여 재구성한 모습을 확인하면 [그림 12]와 같은 결과가 나온다. 촬영부터 3차원 재구성까지 평균 약 0.9초의 수행 시간으로 [그림 12]에서와 같이 3차원 재구성이 가능하였다. 하지만, 본 연구의 한계점은 유효하지 않은 줄무늬 매칭 셋에 대해서는 3차원 깊이 정보를 재구성할 수 없으므로 빈 공간이 발생한다는 점이 있다. 또한 눈동자와 같이 빛을 흡수하는 부분은 색을 띄는 줄무늬 패턴을 반사하지 못하므로 3차원 깊이 정보가 재구성되지 못함을 확인할 수 있다.

그림 12. 3차원 점집합으로 재구성된 얼굴
(a) 정면 (b) 측면

[그림 13]은 가장 얼굴에서 깊이 정보가 많이 드러나는 코에 대한 재구성 정보이다. [그림 13](a)는 정면에서의 모습이고 [그림 13](b)는 측면에서의 모습이다. 정면의 영상을 기준으로 원본 영상의 픽셀 값들을 각각 매칭하여 색을 입힌 모습이다. 정면보다 측면에서 봤을 때 깊이 정보의 재구성 정도를 확인하기가 쉽다. [그림 13](a)를 보면 코 가운데는 대부분 열 라인을 따라 점들이 잘 재구성된 것을 확인할 수 있는데 코의 가장자리를 보면 유효하지 않은 점들이 제외되어 매칭을 이루지 못해서 비게 된 것도 본 연구의 한계점으로 확인할 수 있었다.

그림 13. 재구성된 코 주위의 3차원 점집합
(a) 정면 (b) 측면

3. 기존 기법과의 비교

모바일 환경에서 3차원 객체 재구성이 가능한 소프트웨어인 아이폰에서 동작하는 미국 Trimensional 3D scanner 소프트웨어[16]와 제안 기법과의 비교 평가 및 분석을 수행하였다. 촬영 환경의 경우 Trimensional 3D

scanner 소프트웨어는 객체가 존재하는 주변 환경을 가능한 암실에 가깝게 설정을 해야하고, 아이폰의 화면 밝기를 최대로 설정해야 한다. 이에 비하여 제안 기법은 특별한 조명 설정 없이 촬영 및 재구성이 가능하다는 장점이 있다. 또한, 촬영의 경우 Trimensional 3D scanner 소프트웨어는 4회 연속 촬영이 필요하여 촬영 도중 객체가 움직일 경우 artifact가 심해지는 문제점이 생길 수 있지만, 제안 기법은 1회 촬영으로 객체 재구성이 가능하여 객체의 움직임에 덜 영향을 받는다. 객체 재구성의 오차 측면에서는 [그림 14]에서와 같이 Trimensional 3D scanner 소프트웨어의 경우 객체의 중앙에서 멀어질 경우 기하급수적으로 재구성 오차가 심해지는 것을 알 수 있지만, 제안 기법은 비교적 고른 성능을 보여준다. 촬영 시간의 경우 Trimensional 3D scanner 소프트웨어의 경우 10회의 객체 재구성 시간을 평균한 결과 약 2.3초의 시간이 소요되었고, 제안 기법은 평균 약 0.9초의 시간이 소요되었다.

그림 14. Trimensional 3D scanner를 이용한 3차원 객체 재구성 결과

IV. 결론

본 논문에서는 유비쿼터스 환경에서 구조광 기법을 이용하여 한 장의 사진의 정보로부터 3차원 물체를 재구성하는 방법을 제안하였다. 지금까지 3차원 공간상에서 얼굴 또는 물체를 재구성하기 위하여 제안된 방법들은 여러 개의 카메라를 사용하거나 여러 장의 사진을 촬영하여 물체를 재구성하기 때문에 특정한 하드웨어를 필요로하거나 촬영 장소에 민감하고 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 본 논문에서는 줄무늬 패턴 추출

과 줄무늬 패턴 매칭에 다양한 영상 처리 기법들로 구성된 파이프라인을 새롭게 제안하였고, 패턴 매칭을 위한 최적의 비용 함수를 제안하였다. 제안 기법을 통하여 갤럭시 빔과 같은 초소형 프로젝터를 탑재한 스마트폰과 같은 유비쿼터스 혹은 모바일 환경에서 적은 계산 복잡도와 간단한 환경 설정으로 3차원 물체를 재구성하는 것이 가능하게 된다.

참 고 문 헌

- [1] T. Acharya and A. Ray, *Image Processing - Principles and Applications*, Wiley InterScience, 2006.
- [2] D. Scharstein and R. Szeliski, "A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms," *International Journal of Computer Vision*, Vol.47, No.1, pp.7-42, 2002.
- [3] J. Turner, M. L. Braunstein, and G. J. Andersen, "Relationship between Binocular Disparity and Motion Parallax in Surface Detection," *Percept Psychophys*, Vol.59, No.3, pp.370-380, 1997.
- [5] J. Posamer and M. Altschuler, "Surface Measurement by Space-Encoded Projected Beam System," *Computer Graphics and Image Processing*, Vol.18, No.1, pp.1-17, 1982.
- [4] D. Capsi, N. Kiryati, and J. Shamir, "Range Imaging with Adaptive Color Structured Light," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.20, No.5, pp.470-480, 1998.
- [6] J. Pages, J. Salvi, R. Gracia, and C. Matabosch, "Overview of Coded Light Projection Techniques for Automatic 3D Profiling," *IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp.133-138, 2003.
- [7] D. Lanman and G. Taubin, *Build Your Own 3D Scanner: Optical Triangulation for Beginners*, Courses on Siggraph, 2009.
- [8] J. Beraldin, F. Blais, L. Courmoyer, G. Godin, and M. Rioux, "Active 3D Sensing," NRC Technical Report, 2000.
- [9] S. Ryusuke, "Dense 3D Reconstruction Method Using a Single Pattern for Fast Moving Object," *IEEE Computer Vision 12th Int'l Conf.*, pp.1779-1786, 2009.
- [10] H. Fredricksen, "The Lexicographically Least De Bruijn Cycle," *Journal of Combinatorial Theory*, Vol.9, No.1, pp.509-510, 1970.
- [11] J. Geng, "Structured-light 3D surface imaging: a tutorial," *Advances in Optics and Photonics*, Vol.3, No.2, pp.128-160, 2011.
- [12] U. Kthe, "Edge and Junction Detection with an Improved Structure Tensor," *Pattern Recognition Proc. of 25th DAGM Symposium*, pp.25-32, 2003.
- [13] Roger Y. Tsai, "An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision," *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.364-374, 1986.
- [14] 서정구, 강의선, "FOV 모델과 2D 패턴을 이용한 왜곡 중심 추정 기법," *한국콘텐츠학회논문지*, 제 13권, 제8호, pp.11-19, 2013.
- [15] R. Hartley, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge Univ Press, pp.155-157.
- [16] <http://www.trimensional.com/>

저 자 소 개

정 세 화(Sei-Hwa Jung)

정회원

- 2011년 2월 : 가톨릭대학교 디지털미디어학부 학사
- 2011년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 컴퓨터공학부 박사 과정

<관심분야> : 컴퓨터 비전, 컴퓨터 애니메이션, 터치스크린

이 정 진(Jeongjin Lee)

정회원

- 2000년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부(공학사)
- 2002년 2월 : 서울대학교 컴퓨터공학부(공학석사)
- 2008년 8월 : 서울대학교 컴퓨터공학부(공학박사)

- 2007년 10월 ~ 2009년 2월 : 울산대학교 의과대학 영상의학과 연구교수
 - 2009년 3월 ~ 2013년 2월 : 가톨릭대학교 디지털미디어학부 조교수
 - 2013년 3월 ~ 현재 : 숭실대학교 컴퓨터학부 조교수
- <관심분야> : 컴퓨터 그래픽스, 변형체 모델링, 3차원 가상 내시경 및 가상 수술