

구조광 방식 3차원 복원을 위한 간편한 프로젝터-카메라 보정 기술

박 순 용[†] · 박 고 광^{††} · Lei Zhang^{††}

요 약

구조광(structured-light)을 이용한 3차원 복원 기술은 카메라 영상과 프로젝터 영상에서 구조광 코드(code)의 일치점을 탐색하고 그 점의 3차원 좌표를 획득하는 기술이다. 일치점의 3차원 좌표를 계산하기 위해서는 카메라와 프로젝터의 보정(calibration)이 선행되어야 한다. 또한 복원된 3차원 형상의 정확도는 카메라와 프로젝터의 보정 결과에 영향을 받는다. 기존의 카메라-프로젝터 보정 기술은 고가의 장치를 사용하거나 복잡한 알고리즘을 사용하여 시간과 비용에 대한 효율성이 낮았다. 본 논문에서는 쉽고도 정밀한 카메라-프로젝터 보정 기술을 제안하고자 한다. 제안하는 기술은 복잡한 장치 또는 알고리즘이 필요치 않고 영상처리 기술로만 구현이 가능하기 때문에 3차원 형상복원의 효율성을 높일 수 있다. 두 종류의 카메라-프로젝터 장치에 대한 보정 실험 결과를 보였으며, 보정된 카메라와 프로젝터의 투영 오차 및 월드 기준점의 3차원 복원 오차를 측정하여 제안하는 알고리즘의 정밀도를 분석하였다.

키워드 : 구조광, 카메라-프로젝터 보정, 3차원

An Easy Camera-Projector Calibration Technique for Structured Light 3-D Reconstruction

Soon-Yong Park[†] · Go Gwang Park^{††} · Lei Zhang^{††}

ABSTRACT

The structured-light 3D reconstruction technique uses a coded-pattern to find correspondences between the camera image and the projector image. To calculate the 3D coordinates of the correspondences, it is necessary to calibrate the camera and the projector. In addition, the calibration results affect the accuracy of the 3D reconstruction. Conventional camera-projector calibration techniques commonly require either expensive hardware rigs or complex algorithm. In this paper, we propose an easy camera-projector calibration technique. The proposed technique does not need any hardware rig or complex algorithm. Thus it will enhance the efficiency of structured-light 3D reconstruction. We present two camera-projector systems to show the calibration results. Error analysis on the two systems are done based on the projection error of the camera and the projector, and 3D reconstruction of world reference points.

Keywords : Structured-light, Camera-projector Calibration, 3-Dimensional

1. 서 론

카메라를 이용한 물체의 3차원 형상 복원은 다양한 응용 분야를 가지고 있어 현재까지 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 3차원 형상을 복원하기 위한 기술로는 크게 능동형(active)기술과 수동형(passive) 기술로 나눌 수 있다. 능동

형의 대표적인 기술로는 레이저 삼각법(laser triangulation)과 구조광(structured-light) 기반 기술이 있으며 수동형의 대표적인 기술로 스테레오 비전(stereo vision)을 들 수 있다. 능동형 기술은 수동형 기술에 비하여 정밀도가 높기 때문에 산업용, 연구용으로 주로 사용되고 있다. 특히 레이저나 구조광 등의 능동형 광원을 이용하여 물체의 3차원 형상을 획득하는 과정을 3차원 스캐닝(3D scanning)이라 한다. 레이저를 이용한 3차원 스캐닝은 주로 하나의 레이저 라인을 이동하며 형상을 획득하기 때문에 레이저와 센서를 이동하기 위한 기계적 장치가 필요한 단점이 있다. 반면 구조광 방식은 주로 디지털 프로젝터를 이용하여 복원하고자 하는 물체의 표면 전체에 대하여 구조광을 투사하고 영상센서로

※ 이 논문은 2008년 교육과학기술부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-D00959)

† 정 회 원 : 경북대학교 IT대학 컴퓨터학부(교신저자)

†† 준 회 원 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 석사과정

논문접수 : 2009년 11월 9일

수정일 : 1차 2010년 3월 9일, 2010년 5월 3일

심사완료 : 2010년 5월 14일

투사된 구조광의 영상을 획득하기 때문에 속도가 빠른 장점이 있다.

구조광을 이용한 3차원 스캐닝으로부터 물체의 형상을 복원하기 위해서는 구조광을 투사하는 광원과 카메라 사이의 기하 (geometric) 관계를 알고 있어야 한다. 이를 구조광과 카메라 사이의 보정 (calibration) 이라 한다. 레이저 스캐닝을 포함하여 능동형 복원기술에서는 광원과 카메라 사이의 보정이 필수적이다. 본 연구에서는 구조광을 투사하는 디지털 프로젝터와 카메라 사이의 보정에 대한 새로운 기술을 제안하고자 한다.

프로젝터-카메라의 보정은 크게 두 종류의 기술로 분류할 수 있다. 우선 첫 번째 보정은 카메라와 프로젝트의 호모그래피 보정을 말한다. 우리가 사용하는 대부분의 프로젝트는 2차원 영상을 투사하는 기능을 가지고 있다. 프로젝트의 영상은 주로 스크린, 벽면, 화이트보드 등의 평면에 투사한다. 평면에 투사된 영상을 다시 카메라로 획득하여 2차원 영상으로 저장하면 두 2차원 영상 사이에는 호모그래피 (Homography) 관계가 성립한다[7]. (그림 1)에서 카메라와 프로젝트 사이의 호모그래피를 H_{cp} 로 표현하였다. 호모그래피 관계는 카메라와 프로젝트의 위치 및 방향에 따라서 유클리디안(Euclidean), 어파인 (Affine), 또는 원근(perspective)변환 관계를 가질 수 있다. 따라서 프로젝트에서 평면으로 투사된 영상을 카메라로 획득하고 획득된 영상을 사용자가 원하는 형태로 호모그래피 변환이 가능하다. 투사된 영상이 왜곡되었거나 일정한 영역을 벗어나거나, 또는 임의의 영상왜곡을 의도적으로 만들 필요가 있을 때 카메라-프로젝터의 호모그래피 보정이 필요하다[1, 2, 9].

두 번째 보정은 프로젝터를 하나의 역카메라 (inverse camera)로 간주하는 것이다. (그림 1)에서 프로젝트는 물체 표면위에 패턴을 투사하고 있지만 반대로 물체 표면의 3차원 패턴이 프로젝트의 영상면에 투영된 것으로 생각할 수 있다. 즉 프로젝트의 영상면이 마치 카메라의 영상면처럼 3차원 패턴이 프로젝트 영상면으로 투영된 것과 같은 기능을 하는 것으로 간주할 수 있는데 이를 역카메라라 한다. 따라서 카메라와 프로젝트의 보정을 두 대의 카메라 보정, 또는

스테레오 카메라 보정으로 간주할 수 있고 기준좌표 (월드좌표)와 카메라 영상과의 관계를 투영변환행렬 (PPM, Perspective Projection Matrix)로 표현할 수 있다[13]. 그림에서 P_{wc} 는 월드좌표계에서 카메라의 영상좌표계로의 PPM, 그리고 P_{wp} 는 월드좌표계에서 프로젝트 좌표계로의 PPM을 표현한다. PPM은 내부변수와 외부변수로 나눌 수 있으며 월드좌표계에서 i -번째 카메라로의 변환은

$$P_{wi} = k_i [R_{wi} | t_{wi}] = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{00} & r_{01} & r_{02} \\ r_{10} & r_{11} & r_{12} \\ r_{20} & r_{21} & r_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

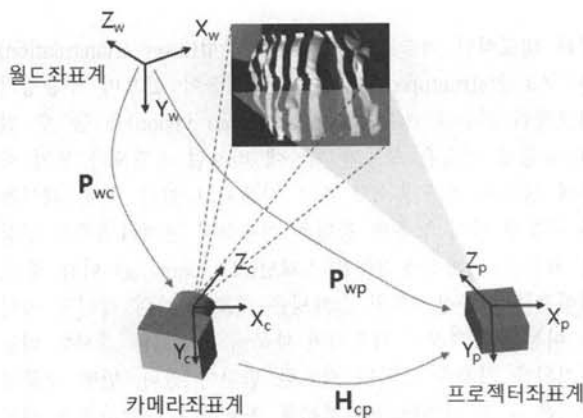
로 표시한다. 여기서 k_i 는 카메라의 내부변수, R_{wi} 와 t_{wi} 는 각각 월드좌표계와 카메라 사이의 회전 및 이동 변환이다.

본 논문에서 다루고자하는 카메라-프로젝터의 보정은 두 번째 기술한 투영변환 기술을 기반으로 하고 있다. 기준좌표계에 대한 카메라와 프로젝트의 투영변환 관계를 안다면 프로젝터를 하나의 역카메라로 간주할 때 스테레오 기하 (stereo geometry) 관계를 이용하여 물체까지의 거리를 구할 수 있다. 이러한 보정 기술과 관련한 지금까지의 연구는 주로 고가의 장치를 이용하거나 복잡한 알고리즘을 사용한 방법이 대부분이었다. 본 논문에서는 간단하고도 정확한 카메라-프로젝터 보정 기술을 제안하고자 한다. 제안하는 기술은 카메라와 프로젝트 영상의 호모그래피를 이용하여 투영변환관계를 획득한다. 고가의 장치를 사용하지 않고 간단한 영상처리 기술로 카메라와 프로젝트 사이의 변환관계를 정밀하게 보정하였다. 투영 오차 및 3차원 복원 오차의 분석을 통하여 제안 기술의 정밀도를 확인하였다. 카메라와 프로젝트 모두 투영오차 (projection error)는 1.0픽셀 이하의 정밀도를 보였고 3차원 복원 또한 0.3mm이내의 우수한 정밀도를 보였다.

2. 카메라-프로젝터 보정의 기존 기술

본 절에서는 카메라와 프로젝트의 보정에 대한 기존 기술을 요약하고자 한다. 앞서 설명한 바와 같이 카메라와 프로젝트 사이의 기하관계의 보정은 크게 2차원과 3차원으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 3차원 보정기술에 제안하고 있어 주로 3차원 보정기술에 대하여 조사하였고 2차원 보정은 간략히 소개하였다.

Zhang 과 Huang [16]는 체크보드 무늬의 보정패턴에 정밀한 거리 측정이 가능한 위상기반 구조광을 투사하고 패턴의 코너점에 대한 구조광의 유일한 코드(code)를 계산하였다. 코너점에 대한 구조광의 코드를 알면 프로젝트에서의 영상 좌표를 구할 수 있으므로 프로젝트 영상을 카메라 영상으로부터 구할 수 있다. 위상 기반의 구조광에서 코너점의 코드 계산을 위하여 영상 중심선으로부터 코너점까지의 변위를 x 및 y 축 각각 계산하였다. 이를 위하여 중심선 영상, 변위선 영상의 2개의 구조광을 추가로 사용하였다.



(그림 1) 카메라-프로젝터 보정을 위한 좌표계

Cui 등[4]은 평면 보정패턴을 이용하여 카메라의 내부 및 외부변수를 먼저 보정하였다. 그리고 이미 알고 있는 좌표값을 가지는 또 다른 패턴을 프로젝터에서 백색 평면에 투사하였다. 투사된 패턴의 영상좌표를 카메라에서 획득하고 외부변수를 이용하여 패턴의 월드좌표를 추정하였다. 평면을 Z축 방향으로 이동하여 이러한 과정을 반복하고 충분한 수의 월드좌표가 추정되면 프로젝터의 영상점과 월드점을 이용하여 프로젝터의 내부 및 외부변수를 보정하였다. 따라서 이 기술을 구현하기 위해서는 정밀하게 보정패턴을 이송할 수 있는 기계장치가 필요하다. Chen 등[3]도 [4]와 유사한 보정기술을 사용하였다. 이들 또한 이진영상 패턴을 이용한 구조광 방식의 3차원 스캔 장치를 구현하기 위하여 카메라와 프로젝터의 보정을 구현하였다. 평면의 보정패턴을 Z축 방향으로 이동하기 위하여 컴퓨터로 제어할 수 있는 모션 장치를 사용하였다.

Zhou와 Zhang[17]은 2차원 구조광을 이용한 프로젝터 보정 대신 1차원 직선을 이용한 보정기술을 제안하였다. 프로젝터에서 투사된 1차원 라인과 프로젝터의 중심이 이루는 평면의 법선벡터를 구하고자 하였다. 직선의 자세를 고정 한 후 평면 보정면을 자유롭게 이동하여 직선의 영상을 다양하게 구하고 서로 다른 보정면에 투영된 직선상의 동일한 3차원 점의 좌표값의 비례관계 (cross ratio)를 이용하여 프로젝터를 보정하였다. 이 방식은 카메라와 프로젝터에서 투사한 개의 직선에 대한 보정이므로 2차원 프로젝터 영상과 카메라의 보정이란 것보다는 카메라와 라인 레이저 (line laser)와의 보정이란 할 수 있다.

Falcao 등[5]은 평면에 부착된 보정패턴을 이용하여 카메라를 먼저 보정하고 이후 프로젝터를 보정하였다. 보정 패턴의 영상을 일반적인 보정 알고리즘으로 카메라를 보정한 다음 프로젝터에서 두 번째 보정패턴을 동일한 평면에 투사하였다. 평면의 방정식을 알고 있으므로 프로젝터에서 투사한 패턴 내부의 코너를 지나는 카메라에서의 투영선 (ray)과 평면의 교점을 구하여 월드좌표를 기준으로 코너의 3차원 좌표값과 프로젝터 기준의 2차원 좌표값을 이용하여 프로젝터를 보정하였다. 이 기술은 하나의 평면만을 이용하기 때문에 평면 방정식의 정확도가 낮아 결과적으로 보정의 오차가 비교적 큰 것을 알 수 있다.

Yamauchi 등[14]의 카메라-프로젝터 기술은 Zhou와 Zhang[16]의 기술과 유사하다. 이들 또한 2차원 프로젝터 영상 전체를 보정하는 대신에 프로젝터를 하나의 라인레이저로 고려하였다. 프로젝터에서 투사된 직선 상의 2점과 프로젝터 중심은 하나의 평면을 이룬다. 평면 방정식을 구하면 카메라에서 획득한 직선의 영상에 대한 3차원 좌표를 구할 수 있다. 이 방식 역시 물체에 대한 3차원 형상을 추출하기 위해서 프로젝터에서 투사한 직선을 다시 스캔해야 하는 단점이 있다.

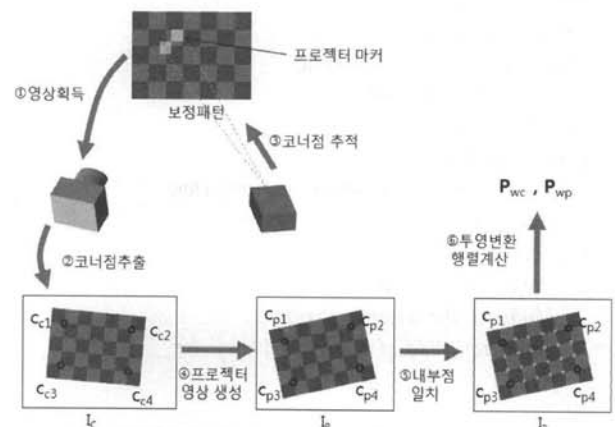
카메라-프로젝터의 보정에는 또한 3차원 형상 추출이 아닌 프로젝터 영상의 변형에 관심을 가진 기술이 소개되고 있다. 이를 위하여 카메라 영상과 프로젝터 영상 사이의 호

모그래피(Homography)를 구하는 기술이 대부분을 차지하고 있다. 예를 들어 Ashdown[1,2], Kimura[9], Raskar[11], 그리고 Song[12]은 카메라와 프로젝터 사이의 2차원 호모그래피를 구하고 프로젝터 영상을 변환하거나 가상게임 구현에 적용하였다. 이들 외에도 2차원 호모그래피 추정과 관련한 많은 연구가 있으나 본 논문의 제안 기술과는 거리가 있으므로 동향조사는 하지 않았다.

3. 제안하는 카메라-프로젝터 보정 기술

본 논문에서 제안하는 카메라-프로젝터 보정 기술은 프로젝터를 역카메라로 간주한다. 일반적인 카메라 보정 기술과 마찬가지로 일반적인 보정패턴을 사용하여 카메라에서 보정 패턴의 영상을 획득한다. 역카메라의 하나인 프로젝터에서도 보정 패턴의 영상을 획득하여야 한다. 역카메라는 가상의 카메라이기 때문에 광학적으로 영상을 획득할 수 없으며 카메라 영상을 이용하여 프로젝터 영상을 획득하여야 한다. 보정패턴의 영상이 카메라와 프로젝터에서 획득되었다면 각각 투영변환행렬을 구할 수 있다. 보정패턴의 영상에서 투영변환행렬의 계산은 기존의 보정기술을 사용하였다.

(그림 2)에서 본 논문이 제안하는 카메라-프로젝터 보정 기술의 순서를 보여주고 있다. 우선 체크보드(checkerboard)와 같은 보정패턴의 영상을 카메라로 획득한다. 그리고 카메라 영상을 I_c 라 하자. I_c 에서 보정패턴의 4개의 모서리에 해당하는 코너점 (corner point)의 좌표를 구한다. 이들은 다른 코너점과 구별하기 위하여 외부 코너점이라 하자. 외부 코너점의 획득은 Harris 코너 알고리즘을 사용하였다. 카메라 영상에서 획득한 4개의 외부 코너점을 각각 C_{c1} , C_{c2} , C_{c3} , 그리고 C_{c4} 라 하자. 이들은 카메라 영상에서 코너점에 대한 2차원 좌표값이다. 프로젝터 영상에서 이들의 좌표값을 알 수 있다면 카메라 영상 I_c 를 프로젝터 영상 I_p 로 변환할 수 있다. 따라서 카메라로 획득한 4개의 외부 코너점에 대응하는 프로젝터의 외부 코너점 C_{p1} , C_{p2} , C_{p3} , 그리고 C_{p4} 를 구하여야 한다. 본 논문에서는 프로젝터에서 한 개의 마커를 패턴에 투사하고 마커의 중심을 각 코너와 일치시키는 과정



(그림 2) 제안하는 카메라-프로젝터 보정 기술의 구현 순서

으로 프로젝터 코너점을 구하였다. 이 과정을 우리는 코너점 추적으로 정하였다.

카메라의 외부 코너점으로부터 프로젝터의 외부 코너점을 바로 구할 수 없는 이유는 보정되지 않은 두 카메라의 영상면 사이의 호모그래피 관계를 알 수 없기 때문이다. 따라서 프로젝터의 코너점 C_{pj} 는 마커를 초기에 임의의 위치에 투사하고 카메라로 획득한 영상에서 마커의 중심을 계산한 다음 일치시키고자하는 카메라의 코너점 C_{cj} 과의 오차를 줄이는 과정을 반복하여야 한다. 즉 현재 마커의 중심을 카메라 영상의 외부 코너점으로 일치시키는 과정을 반복하여야 하므로 이를 코너점 추적이라 하였다.

I_C 에서 획득한 4개의 외부 코너점에 대응하는 프로젝터 외부 코너점을 추적 완료하였다면 호모그래피 변환을 이용하여 I_C 로부터 I_P 를 획득할 수 있다. 두 영상을 획득 후 기존의 카메라 보정 알고리즘을 이용하여 카메라와 프로젝터를 투영변환행렬 P_{WC} 와 P_{WP} 를 구할 수 있다. 본 논문에서는 Zhang's 카메라 보정 알고리즘을 이용하였다[15].

한편 I_P 가 프로젝터 영상과 정확히 일치한다면 투영변환행렬도 정확한 결과를 얻을 수 있다. 이를 확인하기 위해서는 호모그래피를 이용하여 생성한 I_P 를 프로젝터를 이용하여 실제 투사하면 알 수 있다. 정확한 I_P 를 구했다면 투사된 패턴과 실제 패턴이 정확히 겹쳐야 한다. 하지만 일반적으로는 렌즈의 왜곡 등으로 인하여 정확히 일치하지 않으며 이를 보정해주어야 한다. 왜곡된 패턴을 보정하기 위하여 본 논문에서는 4개의 외부 코너점을 이용하여 패턴의 내부 코너점의 좌표를 보간(interpolation)하고 이들 내부 코너점을 투사하였다. 투사된 내부 코너점과 실제 코너점 사이의 오차를 계산하고 반복적으로 오차를 최소화하였다. 내부 코너점을 실제 패턴의 코너점과 일치 후 투영변환행렬 P_{WC} 와 P_{WP} 를 다시 구하였다. 프로젝터 영상의 내부 코너점을 일치한 후 렌즈의 왜곡오차를 줄이고 보다 정확한 보정 결과를 얻을 수 있었다. (그림 3)에서는 제안한 카메라-프로젝터 보

```

Camera-Projector Calibration() {
  Acquire camera image  $I_C$ ;
  Extract 4 corners of the calibration pattern;
  Project a marker;
  for ( $j = 0; j < 4; j++$ )
    while ( $|C_{cj} - C_{pj}| > \text{threshold}$ )
       $C_{pj} = (C_{cj} + C_{pj}) / 2$ ;
  Genrate  $I_P$  from  $I_C$ ;
  if (Normal mode) {
    Compute PPMs of camera and projector;
    return; }
  if (Accurate mode) {
    Project inner corners;
    Minimize the distortion error;
    Compute PPMs of camera and projector;
    return;
  }}

```

(그림 3) 제안하는 카메라-프로젝터 보정기술의 알고리즘

정 기술의 알고리즘을 보여주고 있다.

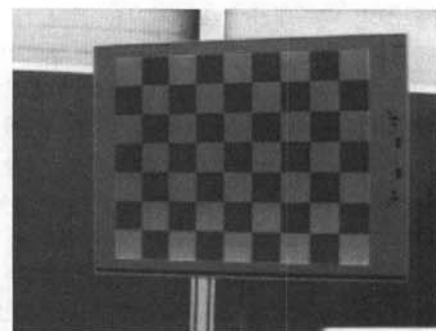
4. 카메라-프로젝터 보정기술의 구현

4.1 패턴의 외부 코너점 추적

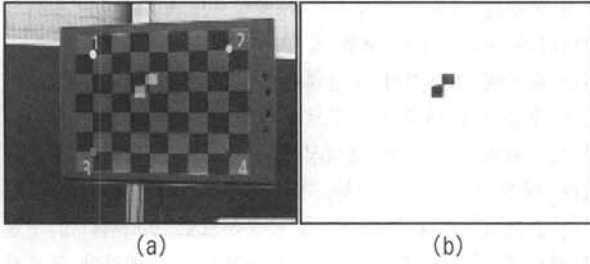
카메라-프로젝터의 보정을 위하여 우선 10×6 격자를 가진 체크보드 무늬의 보정패턴을 컬러 레이저를 이용하여 출력하였다. 보정패턴의 각 정사각형 모양의 격자의 색상은 Red와 Blue를 교차하면서 출력하였다. 출력된 격자 한 개의 크기는 가로, 세로 동일하게 29.0mm 이다. Red와 Blue색상을 사용한 이유는 프로젝터의 마커를 패턴에 투사한 후 영상에서 마커를 쉽게 분리하기 위함이다. 즉, 마커를 Green 컬러로 투사하여 색상정보로 마커를 영상에서 분리하였다. (그림 4)에서는 카메라로 획득한 보정패턴의 영상을 보여준다. 카메라의 해상도는 1024×768 이다.

보정패턴의 모서리에 있는 4개의 외부 코너점의 좌표는 앞서 설명한 바와 같이 Harris 코너추출 알고리즘을 이용하였다. (그림 5)에서 패턴의 모서리에 있는 4개의 외부 코너점을 표시하였고 번호를 부여하였다. 이들 코너점에 대응하는 프로젝터 영상의 코너점을 구하기위해서 (그림 5(a))와 같이 프로젝터 마커를 투사하였다. 마커의 크기가 알고리즘을 수행하는데 크게 영향을 미치지 않는으며 본 논문에서는 보정패턴의 한 격자 크기의 1/2 크기의 두 정사각형이 마주보는 형태로 만들었다. 이는 영상처리 시 마커의 중심을 정확히 찾기 위함이다. 그림에서는 초기에 투사된 격자가 패턴 위의 임의의 위치에 맺히는 것을 볼 수 있다. 우리는 프로젝터 영상의 중심에 마커를 초기화하였는데 카메라 영상과 프로젝터 영상의 시야가 동일하지 않으므로 중심이 일치하지 않는 것으로 보이고 있다. (그림 5(b))는 영상에서 분리된 마커를 보여주고 있다. 마커는 Green 색상으로 투사하고 패턴과의 색상 차이를 이용하여 마커만을 분리하였다.

마커를 초기화한 후 카메라 영상에서 이미 획득한 코너점 C_{cj} ($j=1,2,3,4$)와 마커의 중심을 일치시키는 과정을 수행한다. 마커의 중심을 C_{cj} 에 일치시키면 그 중심점의 좌표는 C_{pj} 로 등록한다. 마커의 정확한 중심을 찾기 위해서 우리는 마커 영상에서 모서리(edge)를 x, y축 방향으로 구한 후 그 값들을 두 개의 히스토그램으로 누적시킨 다음 각 방향의



(그림 4) 카메라로 획득한 보정패턴영상



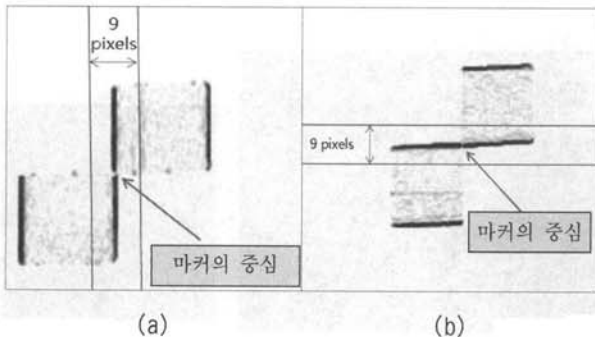
(그림 5) 프로젝터 마커의 추적 (a) 4개의 외부코너점과 마커 (b) 분리된 마커영상

누적된 값이 최대인 x, y 좌표값을 구한다.

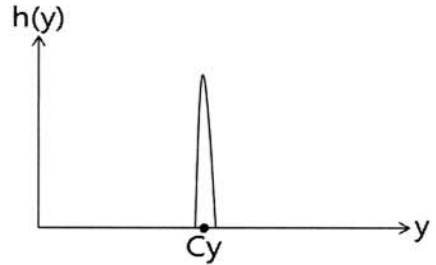
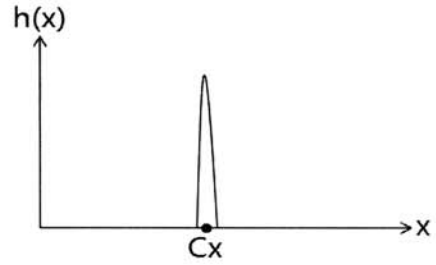
아래 그림은 마커 영상에 대하여 Sobel 연산을 수행한 결과이다. (그림 6(a))와 (그림 6(b))는 각각 Sobel 연산을 수평 및 수직방향에 대하여 수행한 결과를 보이고 있다. 두 Sobel 영상에 대하여 (그림 6(a))는 x 축, 그리고 (그림 6(b))는 y 축에 대하여 히스토그램을 누적하면 각 영상에 대하여 3개의 큰 누적값이 나타나게 된다. 이는 마커의 Sobel 영상을 보면 누적 방향에 따라 세 부분의 값이 큰 모서리로 인함을 알 수 있다. 히스토그램에서 중앙의 큰 누적값만 남기면 (그림 7)과 같은 히스토그램을 각 축방향으로 구할 수 있다. 이 히스토그램의 무게중심 C_x 와 C_y 를 식 (2)와 같이 구하였다. 무게중심은 마커의 중심에 대한 좌표값 C_{pj} 이 된다.

$$C_x = \frac{\sum x \times h(x)}{\sum h(x)}, \quad C_y = \frac{\sum y \times h(y)}{\sum h(y)} \quad (2)$$

보정패턴에 투사된 프로젝터 마커의 중심좌표 C_{pj} 를 구하고 이 중심을 카메라 영상의 코너점 C_{cj} 로 이동하여야 한다. 하지만, 프로젝터에서 투사하는 영상의 좌표와 카메라에서 획득한 영상의 좌표는 일치하지 않으므로 우리는 반복적인 이동을 통해서 마커를 목표하는 위치에 수렴하도록 하였다. 식 (3)에서 $C_{pj}(t)$ 는 j 번째 프로젝터 마커의 t 번째 반복 후의 중심좌표이다. 실제 실험에서는 15~20 회 정도의 반복으로 카메라와 프로젝터의 외부 코너점 C_{pj} 와 C_{cj} 를 일치시켰다. 이 때 C_{pj} 에 대한 프로젝터 좌표계에서의 마커 중심 P_j 를 구할 수 있다.



(그림 6) 마커의 수평 및 수직 Sobel 영상 (a) 수평 (b) 수직

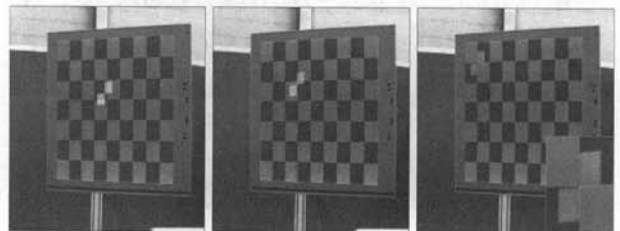


(그림 7) 마커의 수평 및 수직 무게중심

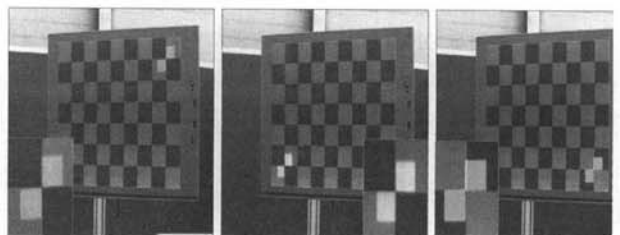
$$P_j(t+1) = P_j(t) + (C_{cj} - C_{pj}(t))/2$$

$$C_{cj} = \lim_{t \rightarrow \infty} C_{pj}(t) \quad (3)$$

(그림 8)은 1번 코너점으로 프로젝터의 마커를 추적하는 모습을 보여주고 있다. 마커가 임의의 위치에서 1번 코너로 이동함을 알 수 있다. 마지막 그림에서 마커가 코너점과 일치된 모습을 보여주고 있다. 그림 아래에 일치된 모습을 확대하여 보여주고 있다. 마커를 이용한 코너점 추적은 반복적인 알고리즘을 사용하므로 약 5초의 시간이 소요된다. 카메라-프로젝터의 보정은 실시간으로 구현할 필요가 없고 정확도를 높이는 것이 필수적이므로 고속 실행에는 크게 비중을 두지 않았다. (그림 9)의 영상은 각각 2,3,4번 코너점을 추적하여 마커와 코너점이 일치된 결과를 보여주고 있다.



(그림 8) 1번 외부코너점의 추적



(그림 9) 2,3,4번 외부코너점의 추적 결과

4.2 프로젝터의 보정

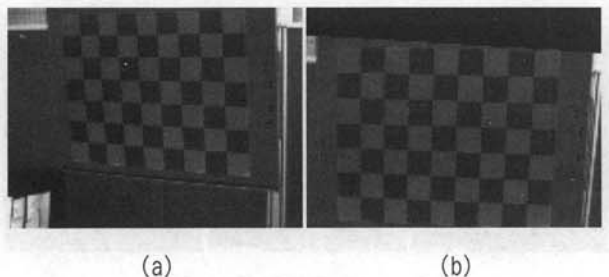
보정 패턴의 4개의 모서리에 해당하는 코너점 $C_{c1}, C_{c2}, C_{c3}, C_{c4}$ 를 구하고 프로젝터의 코너점 추적을 이용하여 P_1, P_2, P_3, P_4 를 구하면 4쌍의 점들을 이용하여 카메라와 프로젝터 사이의 2차원 호모그래피를 구할 수 있다. 2차원 호모그래피를

$$H_{cp} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} \\ m_{20} & m_{21} & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

라 두고 대응하는 두 코너점을 $C_{cj} = (x_{cj}, y_{cj}), P_j = (x_{pj}, y_{pj})$ 라 할 때 다음 식

$$\begin{bmatrix} x_{c1} & y_{c1} & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_{c1}x_{p1} & -y_{c1}x_{p1} \\ 0 & 0 & 0 & x_{c1} & y_{c1} & 1 & -x_{c1}y_{p1} & -y_{c1}y_{p1} \\ & & & & \dots & & & \\ & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & x_{c4} & y_{c4} & 1 & -x_{c4}y_{p4} & -y_{c4}y_{p4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{00} \\ m_{01} \\ m_{02} \\ m_{10} \\ m_{11} \\ m_{12} \\ m_{20} \\ m_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{p1} \\ y_{p1} \\ \dots \\ y_{p4} \end{bmatrix} \quad (5)$$

을 만족하는 최소자승해를 구하여 호모그래피를 구하였다. H_{CP} 를 이용하여 카메라 영상을 변환하여 프로젝터 영상을 생성하였다. 프로젝터 영상은 프로젝터를 역카메라로 가정하였을 때 보정 패턴이 프로젝터의 영상면에 투영된 모습이다. (그림 10)은 프로젝터 영상 생성의 예를 보여준다. 10(a)는 카메라로 획득한 보정 패턴의 영상 I_C 이고 우측은 호모그래피를 이용하여 생성한 프로젝터의 영상 I_P 이다. 카메라와 프로젝터 모두 보정패턴이 투영된 영상을 획득하고 일반적인 카메라 보정 알고리즘을 이용하여 투영변환행렬을 구할 수 있다.



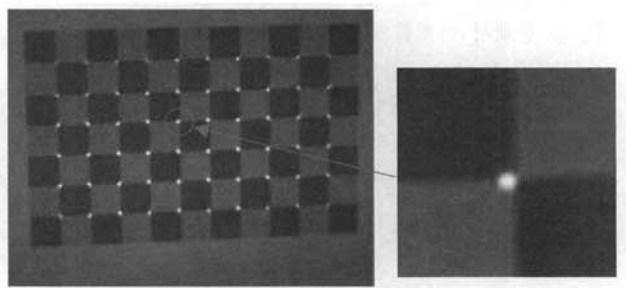
(그림 10) 카메라와 프로젝터에 투영된 영상의 예 (a) I_C (b) I_P

4.3 렌즈왜곡을 고려한 카메라-프로젝터 보정

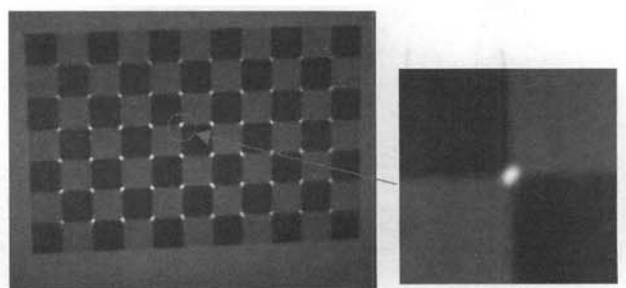
지금까지 설명한 바와 같이 본 논문이 제안하는 카메라-프로젝터의 보정 기술은 카메라와 프로젝터를 두 대의 카메라, 즉 스테레오 비전으로 해석하는 것을 기반으로 한다. 기존의 기술이 카메라와 프로젝터의 스테레오 기하관계를 복잡한 장치나 알고리즘을 사용한 것에 반하여 제안하는 기술은 매우 간단한 알고리즘을 사용한다. 카메라에서 획득한

보정 패턴의 영상을 프로젝트의 영상으로 변환할 수 있다면 카메라와 프로젝터의 내부 및 외부 변수를 보정할 수 있다. 이를 위하여 카메라의 보정패턴 영상에서 4개의 외부 코너점을 추출하고 대응하는 프로젝터의 코너점을 찾기 위하여 마커를 카메라의 외부 코너점에 일치시키는 작업을 수행하였다. 대응하는 4쌍의 외부 코너점은 카메라와 프로젝터 영상의 호모그래피를 추정하기에 충분하므로 프로젝터에 투영된 패턴의 영상을 알 수 있고 결론적으로 카메라와 프로젝터 모두의 투영변환행렬을 계산할 수 있다.

한편 2D 호모그래피는 유클리디안(Euclidean) 변환, 어파인(Affine) 변환, 또는 원근변환(Perspective) 만을 표현할 수 있기 때문에 카메라 렌즈의 왜곡을 설명하지는 못한다. 따라서 카메라 렌즈의 왜곡이 무시하지 못할 정도라면 지금까지의 보정 기술이 충분히 정확한 결과를 얻기 어렵다. 예를 들어 (그림 11)에서 보정패턴의 영상을 살펴보자. 그림은 본 논문에서 사용하는 2종류의 카메라-프로젝터 시스템 중에서 소형 카메라 및 프로젝터를 사용한 영상의 하나이다. (그림 11)은 I_P 를 생성한 다음 60개의 모든 코너점을 패턴에 투사한 결과이다. (그림 11)에서 내부 코너점을 확대한 영상을 살펴보면 패턴의 코너와 프로젝터에서 투사한 코너가 정확히 일치하지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 볼 때 I_P 를 프로젝터 보정에 사용하면 오차가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 투사된 코너점이 패턴의 코너점에 일치하지 않는 이유는 주로 렌즈왜곡에 의해 발생한 것으로 볼 수 있다. 렌즈왜곡을 고려하여 프로젝터를 보정하기 위해서는 I_P 에서 모든 코너점을 패턴의 코너점으로 일치시키는 작업을 수행하여야 한다. 이를 위하여 4.1절에서 설명한 마커추적 기술을 이용하여 I_C 와 I_P 의 모든 코너점을 일치시켰다. 단 내부 코너점의 좌표는 이미 매우 유사한 값을 가지고 있으며



(그림 11) 투사한 내부코너점과 실제 코너점의 불일치



(그림 12) 왜곡을 고려한 내부 코너점 일치

로 4.1절과 같은 마커를 사용하지 않고 (그림 12)에서 보이는 것과 같이 작은 크기의 원을 마커로 사용하였다. 코너점의 오차가 크지 않기 때문에 빠른 시간에 코너점들을 일치시킬 수 있었다. 실험에서는 렌즈 왜곡을 고려하였을 때 카메라-프로젝터의 보정이 더 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

5. 실험 결과

5.1 카메라-프로젝터의 보정

본 논문의 실험을 위하여 2 종류의 카메라-프로젝터 장치를 (그림 13)과 같이 구성하였다. 첫 번째 장치인 CamPro1은 삼성전자의 소형 프로젝터와 PointGrey의 소형 컬러 카메라를 사용하여 제작하였다. 카메라와 프로젝터 모두 1024×768의 영상 해상도를 가지고 있다. 카메라는 IEEE1394 디지털 비디오 영상을 출력하며 컴퓨터 인터페이스로 컬러 영상을 획득하였다. 이러한 장치를 이용하여 3차원 형상을 추출하기 위해서는 컴퓨터에서 생성한 구조광을 고속으로 투사하고 획득하여야 한다. 일반적으로 서로 다른 종류의 패턴과 컬러를 사용하여 여러 장의 구조광을 투사하여야 한다.



(a)



(b)

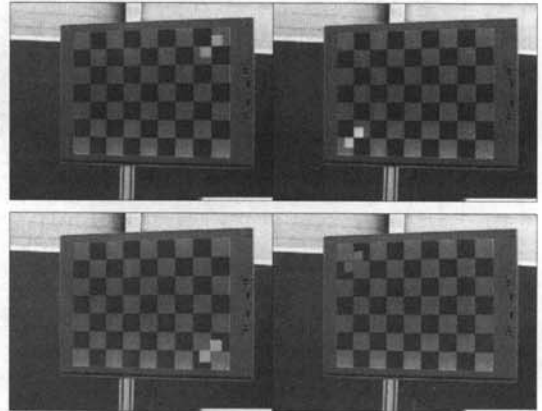
(그림 13) 카메라-프로젝터 보정 실험장치 (a) CamPro1 (b) CamPro2

따라서 프로젝터와 카메라의 비디오 신호를 동기화하여 고속으로 패턴을 투사하고 영상을 획득할 수 있도록 하였다.

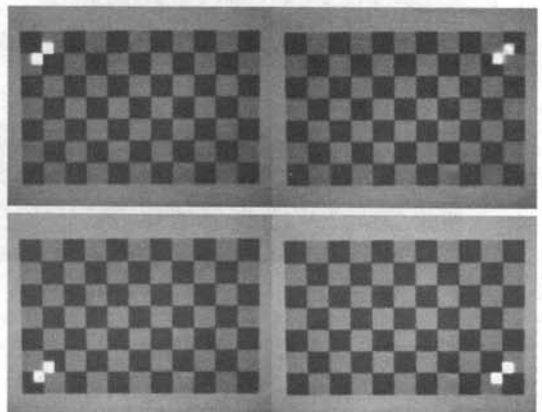
두 번째 장치는 (그림 13(b))에 보이는 CamPro2이다. 이 장치는 초소형 프로젝터와 카메라를 사용하였다. 프로젝트는 3M사의 제품을 사용하였고 카메라는 PointGrey사의 흑백 카메라를 사용하였다. 카메라와 프로젝터 모두 1024×768의 영상 해상도로 일치시켰다. 초소형 카메라 프로젝터 장치는 좁은 구역의 3차원 스캐닝에 적합하다.

CamPro1과 CamPro2의 보정을 위하여 보정패턴의 영상을 획득하고 프로젝터 마커를 패턴모서리에 있는 4개의 외부 코너점과 일치시켰다. (그림 14)와 (그림 15)는 보정패턴의 영상과 마커를 보여준다. CamPro2의 경우 흑백 카메라를 사용하기 때문에 컬러 정보를 사용하지 않으며 마커가 없는 패턴영상과의 차영상(subtraction image)으로 마커를 추출하였다. <표 1>과 <표 2>에서 추출된 외부 코너점의 좌표를 보여준다.

Zhang's 카메라 보정 알고리즘은 한 장의 보정 패턴을 다양한 위치에 고정하고 패턴의 영상을 획득하여 입력으로 사용한다. 따라서 실험에서는 보정 패턴을 6가지의 서로 다른 자세로 두고 획득한 영상을 카메라와 프로젝터 보정에 각각 사용하였다. 각 영상마다 60개의 외부 및 내부 코너점이 있고 전체 360개의 코너점을 사용하였다. (그림 16)과 (그림 17)에서는 CamPro1과 CamPro2의 보정에 사용한 보



(그림 14) CamPro1의 패턴영상과 4개의 외부 코너점에 일치한 마커



(그림 15) CamPro2의 패턴영상과 4개의 외부 코너점에 일치한 마커

<표 1> CamPro1의 카메라 및 프로젝터의 외부 코너점 좌표

카메라			프로젝터		
코너점	x	y	코너점	x	y
C _{e1}	245.56	127.42	P ₁	123.17	156.92
C _{e2}	724.68	108.35	P ₂	698.26	193.16
C _{e3}	261.58	470.06	P ₃	112.60	575.76
C _{e4}	734.38	472.61	P ₄	673.13	600.16

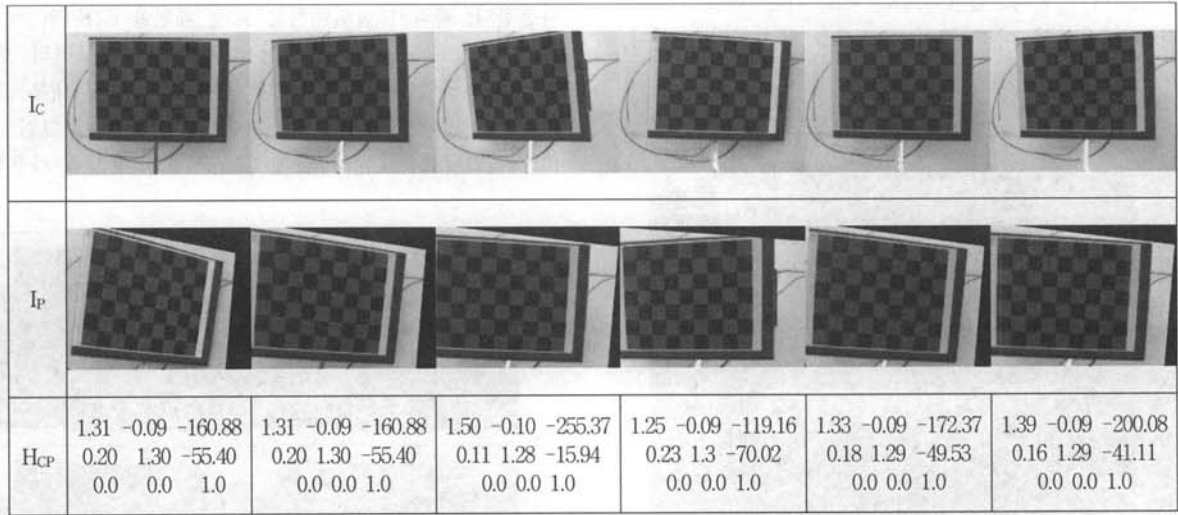
정패턴의 6가지의 자세를 카메라로 획득한 영상 I_c를 보여 준다. 그리고 각각의 자세에 대하여 호모그래피 변환 결과로 생성된 프로젝터 영상 I_p를 동시에 보여주고 있다. 변환에 사용된 호모그래피 행렬 H_{CP}는 공간 부족으로 소수점 아래 둘째 자리까지만 출력하였다.

보정 결과로 카메라와 프로젝터의 내부변수, 외부변수, 왜곡상수(k₁, k₂, p₁, p₂)를 획득하고 투영변환행렬을 계산하였

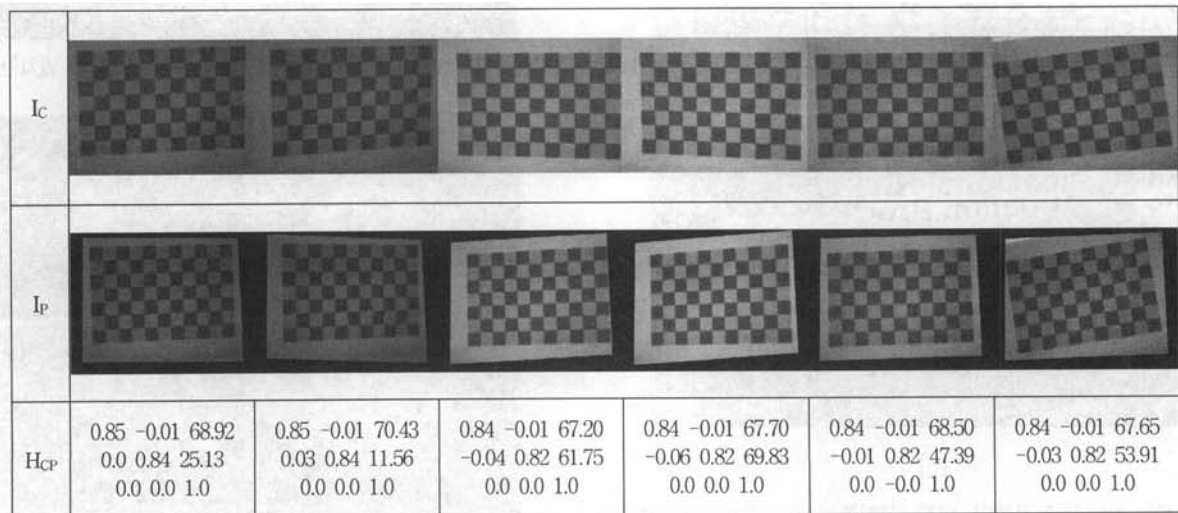
<표 2> CamPro2의 카메라 및 프로젝터의 외부 코너점 좌표

카메라			프로젝터		
코너점	x	y	코너점	x	y
C _{e1}	135.12	145.84	P ₁	183.21	150.05
C _{e2}	899.24	124.80	P ₂	831.73	136.52
C _{e3}	146.79	570.82	P ₃	191.99	522.72
C _{e4}	895.70	539.68	P ₄	841.90	497.02

다[13]. <표 3>과 <표 4>는 각각 CamPro1과 CamPro2 시스템에 대한 보정결과를 보여주고 있다. CamPro1의 경우 카메라에 비하여 프로젝터의 초점 거리가 상당히 긴 것을 알 수 있다. CamPro2의 경우 카메라의 초점거리가 프로젝터보다 긴 것을 알 수 있다. 이는 실험에 사용한 카메라가 프로젝터의 투사화면보다 작은 화각을 가지기 때문이다.



(그림 16) CamPro1 보정패턴의 6자세에 대한 카메라와 프로젝트 영상



(그림 17) CamPro2 보정패턴의 6자세에 대한 카메라와 프로젝트 영상

〈표 3〉 CamPro1의 카메라 및 프로젝터 보정 결과

	카메라			프로젝터				
내부 변수 (k _c , k _c)	215.03 0.00 0.00	0.00 215.54 0.00	514.89 350.53 1.00	2058.61 0.00 0.00	0.00 2063.86 0.00	531.14 859.23 1.00		
왜곡 상수	-0.2735	-1.7656	-0.00386	0.00168	-0.1843	0.2021	-0.00745	0.00053
회전 (R _{wc} , R _{wp})	0.9655172 -0.0092261 -0.2601758	0.0355757 0.9946727 0.0967499	0.2578971 -0.1026697 0.9607018	0.9934914 0.0317829 0.1093830	-0.0515550 0.9817616 0.1829923	-0.1015720 -0.1874405 0.9770103		
이동 (t _{wc} , t _{wp})	-113.17	-93.44	896.79	-142.09	-243.11	703.03		

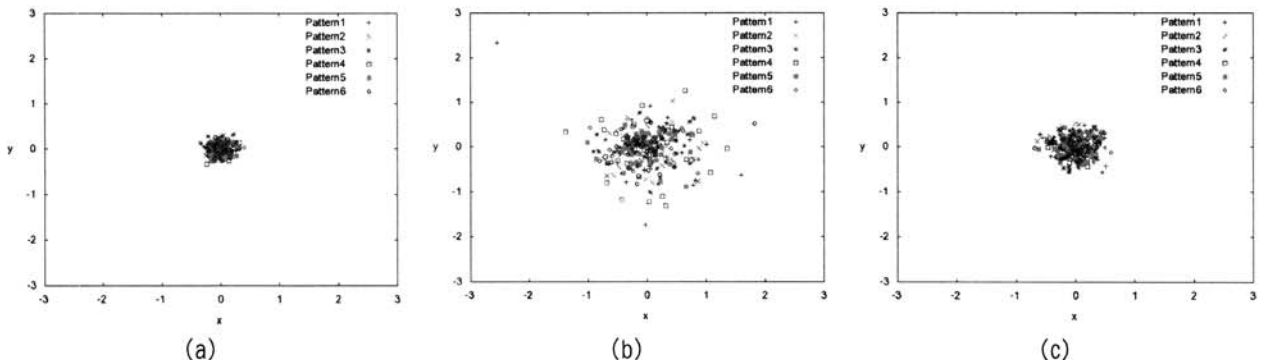
〈표 4〉 CamPro2의 카메라 및 프로젝터 보정 결과

	카메라			프로젝터				
내부 변수 (k _c , k _c)	3795.52 0.00 0.00	0.00 3832.05 0.00	501.29 360.52 1.00	3100.18 0.00 0.00	0.00 3107.42 0.00	377.37 216.95 1.00		
왜곡 상수	-0.5908	0.3604	0.00165	-0.00287	-0.2167	2.6856	0.00477	-0.00730
회전 (R _{wc} , R _{wp})	0.9922019 -0.0347081 0.1197107	0.0106927 0.9806083 0.1956862	-0.1241812 -0.1928802 0.9733325	0.9929875 -0.0251633 0.1155102	0.0274715 0.9994526 -0.0184335	-0.1149831 0.02147748 0.9931352		
이동 (t _{wc} , t _{wp})	-14.81	-8.5	152.95	-9.20	-3.16	146.05		

5.2 카메라-프로젝터 투영 오차 분석

카메라-프로젝터 보정의 정확도는 보정 패턴의 모든 코너점의 3차원 좌표를 투영변환행렬을 이용하여 투영한 2차원 좌표와 실제 영상에서의 2차원 코너점 좌표 사이의 오차를 이용하여 분석하였다. 패턴의 코너점의 3차원 월드 좌표를 X_w라 하였을 때 카메라와 프로젝터로 투영점은 각각

$$\begin{aligned} x'_c &= k_c [R_{wc} | t_{wc}] X_w \\ x'_p &= k_p [R_{wp} | t_{wp}] X_w \end{aligned} \quad (6)$$



(그림 18) CamPro1의 투영오차 (a) 카메라 (b) 외부 코너점 사용 프로젝터 (c) 외부+내부 코너점 사용 프로젝터

〈표 5〉 카메라-프로젝터 보정의 투영오차 분석

투영오차 (pixel)	CamPro1			CamPro2		
	카메라	프로젝터		카메라	프로젝터	
		외부코너점	외부+ 내부코너점		외부코너점	외부+ 내부코너점
최대	0.41	3.45	0.72	2.13	11.4	2.03
평균	0.15	0.52	0.27	0.61	1.14	0.66
RMS	0.17	0.64	0.31	0.71	1.72	0.75
Std. Dev.	0.08	0.36	0.15	0.37	1.29	0.35

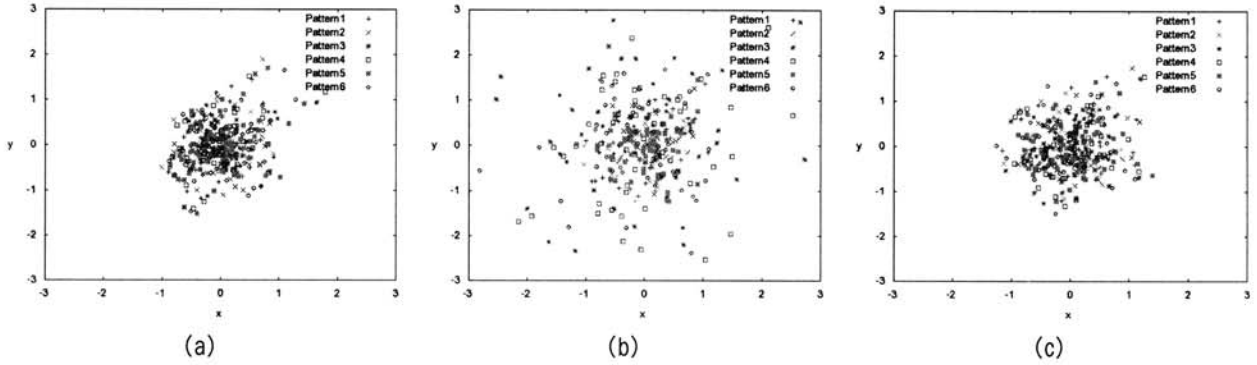
로 표현할 수 있다. 코너점의 실제 2차원 좌표를 각각 x_c, x_p라 하면 투영 오차는

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= |x_c - x'_c| \\ \epsilon_p &= |x_p - x'_p| \end{aligned} \quad (7)$$

로 표현한다. 두 프로젝터 시스템에 대한 실험 결과로 획득한 카메라와 프로젝터의 내부 및 외부변수를 이용하여 전체 360개의 코너점에 대한 투영오차를 분석하였다.

〈표 5〉는 투영오차의 분석결과를 보여준다. 프로젝터의 경우 4개의 외부 코너점만을 사용하여 보정한 결과와 60개의 모든 코너점을 이용한 결과를 모두 보였다. 예상대로 60개의 코너점, 즉 4개의 외부 코너점과 나머지 내부 코너점을 모두 사용한 경우가 더 정확한 결과를 얻었다. 4개의 코너점으로 호모그래피 변환만을 사용한 경우에 투영오차는 카메라보다 더 컸지만 내부 코너점을 모두 사용한 경우 카메라의 오차와 유사한 결과를 얻었다. 그리고 CamPro1이 CamPro2보다 더 좋은 광학시스템을 가지고 있어 오차가 적은 결과를 얻었다.

(그림 18)과 (그림 19)에서 360개의 코너점에 대한 투영오차를 2차원 그래프로 보여주고 있다. (그림 18)은 CamPro1, 그리고 (그림 19)는 CamPro2의 결과이다. 보정패턴의 서로 다른 6종류의 자세에 대하여 거의 유사한 결과가 나온 것을 알 수 있다. 프로젝터의 경우 외부 및 내부 코너점을 모두 이용하였을 때 상당히 좋은 결과를 얻음을 알 수 있다.



(그림 19) CamPro2의 투영오차 차 (a) 카메라 (b) 외부 코너점 사용 프로젝터 (c) 외부+내부 코너점 사용 프로젝터

다음은 보정에 사용된 패턴 영상의 개수에 따라 투영오차의 변화를 측정하였다. (그림 16)과 (그림 17)에서 보였듯이 CamPro1 또는 CamPro2의 보정에는 전체 6장의 보정 패턴의 영상을 사용하였다. 6장의 영상에서 일부 영상만을 사용하기 위해서는 선택을 위한 조합이 너무나 많기 때문에 모든 경우의 수를 모두 실험하기는 어렵다. 대신 (그림 16)과 (그림 17)에서 보이는 영상의 순서대로 1장의 영상을 사용한 경우부터 6장 모두 사용한 경우에 대하여 투영 오차를 측정하였다.

<표 6>에서는 보정패턴의 영상 개수에 대하여 투영오차의 최대값과 평균값을 보이고 있다. 거의 모든 경우에 대하여 평균 투영오차는 1픽셀 이하를 보이고 있다. 패턴영상의 수가 변하더라도 투영오차의 변화는 크지 않다. 이는 투영기하학의 특성상 카메라의 자세에 오차가 있더라도 투영된 3차원 점은 거의 비슷한 투영오차를 보일 수 있기 때문으로 판단된다. 또한 Zhang의 카메라 보정 방법이 카메라의 자세를 추정할 때 투영오차가 최소화되도록 보정하기 때문이기도 하다. 다른 측면에서 오차 분석을 하기 위하여 5.3절에서는 보정패턴의 영상 개수를 변화하면서 3차원 복원의 정확성을 측정하였다.

투영오차의 측정은 카메라 또는 프로젝터 보정의 정밀도를 판단하기 위하여 일반적으로 사용하고 있다. <표 7>에서는 카메라-프로젝터 시스템의 보정을 다루고 있는 논문에서 투영오차를 측정한 결과와 본 논문의 결과를 비교하였다. X.

Chen[3]의 논문에서는 카메라의 Z축 방향으로 정밀하게 이동하는 스테이지를 사용하여 카메라와 프로젝터를 보정하였는데 13×9개의 월드 기준점을 가지는 패턴의 영상을 9장 사용하였다. M. Mosnier[10] 논문에서는 카메라-프로젝터 시스템을 사용하고 있으나 결과에서는 프로젝터의 보정만을 보여주고 있다. 48개의 코너점을 가지는 보정 패턴의 10가지 자세에 대한 영상을 이용하였다. C. Haihua[6] 또한 X. Chen의 경우와 유사한 직선 이동 스테이지를 사용하였다. 이들의 논문에서는 10장의 패턴 영상을 사용하였다. G. Falcao[5]의 논문에서는 1장의 패턴 영상만을 사용하였다. 이 논문에서는 한 장의 영상에 인쇄된 보정패턴과 투사된 보정패턴을 동시에 획득하였다. 한 장의 영상만을 하기 때문에 오차가 비교적 큰 것을 알 수 있다. M. Kimura[9]은 8장의 패턴영상을 이용하여 카메라와 프로젝터 영상의 호모 그래피를 구하였다.

<표 7> 3차원 기준점의 2차원 투영오차 비교 (pixel)

비교기술		패턴영상의 개수	평균 투영오차	
제안기술	CamPro1	6	카메라	0.15
			프로젝터	0.27
	CamPro2	6	카메라	0.61
			프로젝터	0.66
X. Chen[3]		9	카메라	0.32
			프로젝터	0.11
M. Mosnier[10]		10	카메라	N.A.
			프로젝터	0.21
C. Haihua[6]		10	카메라	0.23
			프로젝터	0.39
G. Falcao[5]		1	카메라	≅0.5
			프로젝터	≅1.0
M. Kimura[9]		8	카메라	0.3
			프로젝터	0.4

<표 6> 보정패턴 영상 개수에 따른 투영오차 (pixel)

보정패턴영상의 수			1	2	3	4	5	6
CamPro1	카메라	평균	0.12	0.12	0.14	0.14	0.15	0.15
		최대	0.21	0.31	0.40	0.40	0.43	0.41
	프로젝터	평균	0.31	0.28	1.41	0.28	0.28	0.27
		최대	0.60	0.70	4.21	0.71	0.71	0.72
CamPro2	카메라	평균	0.58	0.59	0.59	0.59	0.60	0.61
		최대	1.39	2.01	2.00	2.09	2.12	2.13
	프로젝터	평균	0.60	0.62	0.65	0.66	0.66	0.66
		최대	1.60	2.08	2.03	2.05	2.05	2.03

5.3 3차원 복원 오차의 분석

카메라-프로젝터 보정의 정확도를 검증할 수 있는 또 다른 방법은 3차원 복원의 오차를 측정하는 것이다. 보정에

사용한 패턴의 각 코너점에 해당하는 월드좌표를 알고 있으므로 보정패턴의 영상의 2차원 좌표값을 이용하여 코너점의 3차원 좌표를 구할 수 있다. 카메라와 프로젝터로 투영된 코너점의 좌표를 각각 $C_c=(x_c, y_c)$, $P_p=(x_p, y_p)$ 라 하자. 그리고 카메라와 프로젝터의 투영변환행렬 P_{wc} 와 P_{wp} 를 다음과 같이 표현하자.

$$P_{wc} = \begin{pmatrix} a_1^T & a_{14} \\ a_2^T & a_{24} \\ a_3^T & a_{34} \end{pmatrix}, P_p = \begin{pmatrix} b_1^T & b_{14} \\ b_2^T & b_{24} \\ b_3^T & b_{34} \end{pmatrix} \quad (8)$$

복원하고자 하는 코너점의 3차원 좌표값을 $X'_w=(x_w, y_w, z_w)$ 라 할때 우리는 $AX'_w=Y$ 형태의 선형방정식의 해를 구하여 3차원 좌표값을 구할 수 있다. 여기서 행렬 A 와 Y 는 다음과 같다.

$$A = \begin{pmatrix} (a_1 - x_c a_3)^T \\ (a_2 - y_c a_3)^T \\ (b_1 - x_p b_3)^T \\ (b_2 - y_p b_3)^T \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} -a_{14} + x_c a_{34} \\ -a_{24} + y_c a_{34} \\ -b_{14} + x_p b_{34} \\ -b_{24} + y_p b_{34} \end{pmatrix} \quad (9)$$

위 식(9)를 이용하여 복원된 코너점의 좌표 X'_w 와 보정 과정에서 입력한 원좌표값 X_w 의 차이에 대한 RMS 오차를 구하였다. <표 8>에서는 보정에 사용한 패턴영상의 수를 변화하였을 때 복원오차를 보여주고 있다. CamPro1의 경우 보정 패턴의 수가 증가할수록 복원오차가 감소하는 것을 알 수 있다. CamPro2의 경우 오차는 거의 변하지 않았다. 이는 패턴의 크기가 매우 작고 카메라와 프로젝터의 광학적 특성이 좋지 않아 패턴영상의 수를 증가하여도 또 다른 오차 요인이 작용하는 것으로 해석된다.

<표 9>에서는 본 논문이 제안한 보정기술과 기존의 보정 기술의 3차원 복원 정확도를 비교하였다. 비교 대상 논문은 본 논문의 복원 오차 측정과 동일한 방법을 사용한 논문을 인용하였다. 즉, 비교 대상인 세 논문 모두 보정패턴의 기준 좌표값에 대한 3차원 복원값과의 RMS 오차를 비교하고 있다. S. Zhang[16]의 논문에서는 12장의 보정 패턴 영상을 사용하였고 각각 패턴의 자세에 대한 오차를 보여주고 있다. <표 9>에서는 12장의 보정 패턴에 대한 3차원 복원의 RMS오차를 보여주고 있다. 이 논문은 서론에서 설명한 바와 같이 고해상도 프로젝터를 사용하여 구조광을 보정패턴에 투사하고 동시에 제어라인을 수직, 수평 방향으로 투사하여 프로젝터를 보정하였다. 이 논문에서 투영오차의 결과는 그래프뿐만 보이고 있다. D. Huynh[8]는 direct linear

<표 9> 기준점 3차원 복원의 오차 비교

비교기술		패턴영상의 수	RMS 복원오차 (mm)
제안기술	CamPro1	6	0.249
	CamPro2	6	0.107
S. Zhang[16]		12	0.142
D. Huynh[8]		2	0.427
F. Zhou[18]		5	0.281

transformation 방법을 사용하여 카메라와 프로젝터를 보정하였다. F. Zhou[18]의 논문에서는 프로젝터를 사용하고 있지 않지만 카메라와 라인 레이저의 보정을 제안하고 있다. 이 논문에서는 보정패턴의 모서리에 투사된 라인레이저의 교점의 좌표를 이용하여 라인레이저를 보정하였다. 이들은 또한 카메라의 투영변환행렬을 사용하였을 때 발생할 수 있는 교차점 좌표 계산의 오류 해결하기위하여 교차비(cross ratio) 방법을 사용하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 구조광 기반 3차원 복원을 위하여 필수적으로 선행되어야 할 카메라와 프로젝터의 보정 기술을 제안하였다. 기존의 기술이 고가의 장비를 사용하거나 복잡한 보정 과정을 거치는데 비하여 제안하는 기술은 보정 패턴에서 4개의 모서리에 해당하는 외부 코너점의 영상 좌표를 추출함으로써 프로젝터의 보정을 구현할 수 있었다. 이는 카메라와 프로젝터에서 획득하는 보정 패턴의 영상이 호모그래피 관계에 있다는 점에 기반을 두고 있다. 보정패턴의 모서리에 있는 4개의 외부 코너점의 좌표를 프로젝터 영상을 기준으로 획득하기위하여 프로젝터에서 투사한 마커를 이용하였다. 마커의 중심을 모서리점으로 추적하여 코너의 영상 좌표를 획득하였다. 렌즈왜곡을 고려한 보다 정확한 프로젝터 보정을 위하여 외부 및 내부의 모든 코너점의 영상 좌표를 추출하고 이를 이용하여 카메라와 프로젝터를 보정하였다. 보정 실험을 위하여 두 개의 실험 장치를 구현하였고 각 장치에서의 보정 결과로 투영변환 행렬을 구하였고 그 오차를 분석하였다. 월드좌표의 기준 3차원 점들을 2차원 영상으로 투영하였을 때 카메라와 프로젝터 모두 1 픽셀 이하의 투영 오차를 가지는 것을 알 수 있었다. 월드좌표의 기준점의 3차원 복원 결과 두 장치 모두 0.3mm이하의 RMS오차를 보임으로써 매우 정확한 보정이 구현되었음을 알 수 있었다. 제안하는 보정 기술은 구현이 단순하면서도 그 정밀도가 기존 기술에 비하여 우수하거나 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

<표 8> 월드좌표계 기준점의 3차원 복원의 RMS 오차 (mm)

보정패턴 영상의 수	1	2	3	4	5	6
CamPro1	0.395	0.277	1.108	0.247	0.247	0.249
CamPro2	0.107	0.095	0.100	0.103	0.105	0.107

참 고 문 헌

[1] M. Ashdown and Y. Sato, "Steerable Projector Calibration," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), 2005.

[2] M. Ashdown, R. Sukthankar, "Robust Calibration of Camera-Projector System for Multi-Planar Displays," Tech Report: HPL-2003-24, 2003.

[3] X. Chen, J. Xi, Y. Jin, J. Sun, "Accurate Calibration for a Camera - Projector Measurement System based on Structured Light Projection," Optical and Lasers in Engineering, Vol.47, No.3,4 pp.310-319, 2009.

[4] H. Cui, N. Dai, T. Yuan, X. Cheng, W. Liao, "Calibration Algorithm for Structured Light 3D Vision Measuring System," Congress on Image and Signal Processing, Vol.2, 2008.

[5] G. Falcao, N. Hurtos, J. Massich, "Plane-based Calibration of a Projector-Camera System," VIBOT Master 2008.

[6] C. Haihua, D. Ning, Y. Tianran, C. Xiaosheng, L. Wenhe, "Calibration Algorithm for Structured Light 3D Vision Measuring System," Congress on Image and Signal Processing, 2008.

[7] R. Hartley and A. Zisserman, "Multiple View Geometry in Computer Vision, 2nd Edition," Cambridge, 2003.

[8] D. Huynh, "Calibration of a Structured Light System: A Projective Approach," Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '97), pp. 225-230, 1997.

[9] M. Kimura, M. Mochimaru, T. Kanade, "Projector Calibration using Arbitrary Planes and Calibrated Camera," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 18-23 2007.

[10] J. Mosnier, F. Berry and O. Ait-Aider, "A New Method for Projector Calibration Based on Visual Servoing," IAPR Conference on Machine Vision Applications, 2009.

[11] R. Raskar, P. Beardsley, "Self Correcting Projector," IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Vol.2, pp.504-508, 2001.

[12] P. Song, S. Winkler, and J. Tedjokusumo, "A Tangible Game Interface Using Projector-Camera Systems," HCI 2007. LNCS, Vol.4551, pp.956 - 965, 2007.

[13] E. Trucco, A. Verri, "Introductory Techniques for 3-D Computer Vision", Prentice Hall, 1998.

[14] K. Yamauchi, H. Saito and Y. Sato, "Calibration of a Structured Light System by Observing Planar Object from Unknown Viewpoints," 19th International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2008), 2008.

[15] Z. Zhang, "A Flexible New Technique for Camera Calibration," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.22, No.11, pp.1330-1334, 2000.

[16] S. Zhang, P. Huang, "Novel Method for Structured Light System Calibration," Optical Engineering, Vol.45, No.9, pp.

083601, 2006.

[17] F. Zhou, G. Zhang, "Complete Calibration of a Structured Light Stripe Vision Sensor Through Planar Target of Unknown Orientations," Image and Vision Computing, Vol. 23, No. pp.59-67, 2004.

[18] F. Zhou, G. Zhang, "Complete Calibration of a Structured Light Stripe Vision Sensor Through Planar Target of Unknown Orientations," Image and Vision Computing, Vol. 23, pp.59 - 67, 2005.



박 순 용

e-mail : sypark@knu.ac.kr

1991년 경북대학교 전자공학과(공학사)

1993년 경북대학교 전자공학과(공학석사)

2003년 미국 뉴욕주립대학교 스토니브룩 (공학박사)

1993년~1999년 한국원자력연구소 로봇기
반연구실 선임연구원

2004년~2005년 한국전자통신연구원 디지털콘텐츠연구단 선임
연구원

2005년~현 재 경북대학교 IT대학 컴퓨터공학부 조교수

관심분야: 3차원복원, 3차원정합, 로봇비전, 입체영상



박 고 광

e-mail : pgg@vision.knu.ac.kr

2009년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부(공
학사).

2009년~현 재 경북대학교 전자전기 컴
퓨터학부 석사과정

관심분야: 카메라보정, 3차원복원, 구조광



Lei Zhang

e-mail : zhanglei@vision.knu.ac.k

2010년 경북대학교 컴퓨터공학과(공학사)

2010년~현 재 경북대학교 전자전기 컴
퓨터학부 석사과정

관심분야: 3차원정합, 로봇비전