

초소형 카메라-프로젝터의 광학왜곡 보정을 이용한 위상변이 방식 3차원 스캐닝의 성능 향상

Enhancement of 3D Scanning Performance by Correcting the Photometric Distortion of a Micro Projector-Camera System

박 고 광, 백 승 해, 박 순 용*
(Go Gwang Park¹, Seung-Hae Baek², and Soon-Yong Park²)

¹AR-Vision Inc.

²Kyungpook National University

Abstract: A distortion correction technique is presented to enhance the 3D scanning performance of a micro-size camera-projector system. Recently, several types of micro-size digital projectors and cameras are available. However, there have been few effort to develop a micro-size 3D scanning system. We develop a micro-sized 3D scanning system which is based on the structured light technique. Three images of phase-shifted sinusoidal patterns are projected, captured, and analyzed by the system to reconstruct 3D shapes of very small objects. To overcome inherent optical imperfection of the micro 3D sensor, we correct the vignetting and blooming effects which cause distortions in the phase image. Error analysis and 3D scanning results on small real objects are presented to show the performance of the developed 3D scanning system.

Keywords: structured-light, phase-shift, camera-projector system, micro 3D sensor

I. 서론

최근 3차원 TV, 3차원 카메라, 그리고 마이크로소프트의 키넥트(Kinect) 제품 등의 상용화로 인하여 3차원 스캐닝(scanning) 또는 복원(reconstruction) 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 3차원 스캐닝은 컴퓨터 비전 기술의 하나로 물체의 3차원 형상(shape)을 컴퓨터 모델(model)로 획득하는 것을 말한다[1]. 3차원 스캐닝 기술은 크게 수동형 및 능동형 기술로 구분된다. 카메라 영상만을 사용하는 기술을 수동형(passive) 기술이라 하며 대표적으로 스테레오비전(stereo vision)을 들 수 있다. 그리고 레이저, 프로젝터와 같은 광원을 이용하는 기술을 능동형(active) 기술이라 하며 프로젝터 기반의 구조광(structured light) 기술은 그 중의 하나이다[2]. 구조광 기반 3차원 스캐닝 기술은 속도가 빠르고 정확도가 높은 장점을 가지고 있기 때문에 산업용, 연구용으로 많이 이용된다.

구조광이란 특정한 패턴을 가진 빛을 말한다. 디지털 프로젝터를 이용하면 구조광 생성이 용이하기 때문에 구조광 기반의 3차원 스캐닝 기술은 카메라와 프로젝터를 결합한 카메라-프로젝터 시스템을 주로 이용한다. 카메라-프로젝터 시스템을 이용하는 경우 먼저 프로젝터로 물체의 표면에

구조광을 투영(projection)하고 카메라를 이용하여 그 장면을 획득한다. 그리고 프로젝터로 투영된 구조광 영상과 카메라에서 획득된 구조광 영상에서 일치하는 패턴을 탐색하여 물체의 3차원 정보를 얻어내는 것이다. 구조광 기반 3차원 스캐닝의 핵심기술은 패턴 코드(pattern code)의 생성에 있다. 구조광의 패턴은 영상내의 각 픽셀에서 유일한 코드값을 가지는 것이 좋다. 이는 프로젝터로 투영한 구조광 영상과 카메라로 획득한 영상을 비교하여 동일한 패턴을 탐색하여야 하기 때문이다.

구조광 패턴의 코드화 방법은 크게 3가지로 나눌 수 있으며 각각 시간 변조(time-multiplexing) 기술, 공간 변조(spatial-multiplexing) 기술, 그리고 직접 코딩(direct coding) 기술로 구분된다[3,4]. 이 중에서 시간 변조기술은 서로 다른 모양의 구조광 패턴을 순서대로 투영하고 이들을 획득된 영상으로부터 유일한 코드를 생성해 낸다. 이진 코드(binary codes)와 위상 변이(phase shifting) 등이 이 기술에 속한다. 시간 변조 계열은 유일한 코드를 쉽게 만들어 내고, 카메라로 획득한 영상의 모든 픽셀에서 3차원 좌표를 계산하여 고해상도의 3차원 정보를 획득할 수 있는 장점이 있어 지금까지 많은 연구 및 기술이 개발되어 있다.

한편 구조광 방식의 3차원 스캐닝 장치는 카메라와 프로젝터가 각각 최소 한 개씩 필요하고 그 부피도 적지 않기 때문에 대부분 고정형 장치로 개발되었다. 지금까지 구조광 방식의 3차원 스캔 장치에 대한 많은 연구가 진행되어 왔음에도 불구하고 초소형 스캔 장치가 거의 없는 것은 이런 이유 때문이다. 하지만 최근에는 고해상도이면서 초소형 카메라 및 프로젝터들이 다수 상용화되고 있어 휴대용 3차원 스캔 장치로 개발될 수 있는 가능성이 보이고 있다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 4. 16., 수정: 2013. 1. 8., 채택확정: 2013. 2. 3.

박고광: 에이알비전(주)(ggpark@ar-vision.com)

백승해, 박순용: 경북대학교 IT대학 컴퓨터학부

(eardrops@vision.knu.ac.kr/sypark@knu.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 로봇 비전 연구의 한계 상황 돌파를 위한 핵심 기술 개발 지원사업의 연구 결과로 수행되었음(NIPA-2012-C7000-1101-0006).

본 논문에서 제안하고자 하는 3차원 스캐닝 기술은 휴대 가능한 초소형 3차원 스캐닝 장치를 개발하고자 하는 목적에서 출발하였다. 기존의 구조광 기술 중에서 위상변이 방식의 3차원 스캐닝 기술을 적용하였을 때 초소형 카메라와 프로젝터의 상대적으로 좋지 않은 광학적 특성으로 인하여 발생하는 문제를 해결하고자 한다. 또한 휴대형 3차원 스캐너는 가까운 거리에 놓인 물체를 스캐닝하기 때문에 이때 발생하는 블룸(bloom) 왜곡을 제거하여 3차원 스캐닝 성능을 향상하는 기술을 제안하였다.

제안하는 3차원 위상변이 기반의 구조광 기술은 3개의 정현파 (sinusoidal pattern)를 사용하여 유일한 코드값을 가지는 위상(phase) 영상을 생성한다. 위상 영상의 오차를 최소화하기 위하여 첫째로 카메라와 프로젝터의 비네팅(vignetting)으로 인한 영상 내 패턴 밝기의 차이를 보정한다. 둘째로 정현파의 주기적 특성을 이용하여 블룸 왜곡을 보정하였다. 실험에서는 제안하는 위상 왜곡보정 기술과 기존의 기술을 비교하여 3차원 성능이 향상됨을 보였다. 소형 물체를 대상으로 한 스캐닝 실험에서는 약 5 cm 거리의 1 cm 크기의 물체에 대하여 85 μ m의 RMS 오차를 구현하였다.

II. 위상변이 방식 초소형 3차원 스캐닝 장치

1. 위상변이 방식의 3차원 스캐닝의 원리

본 논문에서 사용한 3차원 스캐닝 기술은 시간 변조 계열을 선택하였고 그 중 적은 수의 패턴을 이용하고 해상도가 높은 위상 변이(phase-shift) 알고리즘을 사용한다. 그 중에서도 세 가지의 패턴만으로 코드를 만들어 낼 수 있는 P. S. Huang [5,6]이 제안한 TSPS(Three-Step Phase Shifting) 알고리즘을 사용하였다. 그림 1은 위상 변이 기반 3차원 스캐닝 기술의 전체적인 흐름을 보여준다.

먼저, 정현파를 생성하기위하여 기준 위상 및 +/-120°로 위상(phase)을 이동한 3개의 코사인(cosine) 함수를 만든다. 이들 함수들을 각각 i_1, i_2, i_3 그리고 각 함수를 영상으로 변환한 것을 I_1, I_2, I_3 라 하면 그 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} i_1(\Phi) &= \cos(\Phi - 2\pi/3) \\ i_2(\Phi) &= \cos(\Phi) \\ i_3(\Phi) &= \cos(\Phi + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (1)$$

$$I_j(x,y) = I_0 + Ai_j(\Phi(x,y)) \quad (j = 1,2,3) \quad (2)$$

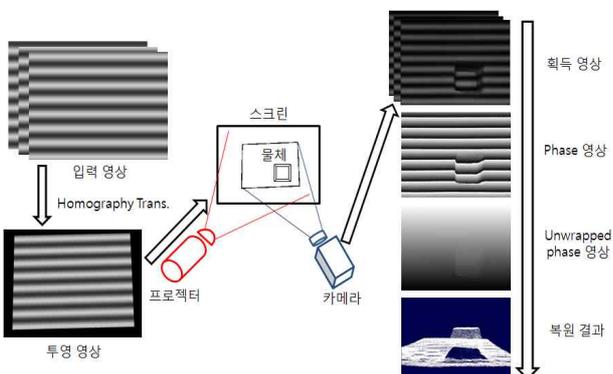


그림 1. 위상 변이 방식의 3차원 스캐닝의 순서도.
Fig. 1. 3D scanning processes of phase-shifted fringe projection.

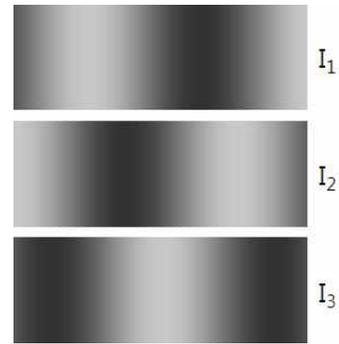


그림 2. 120도 위상차를 가지는 프로젝터 영상의 일부.
Fig. 2. Three phase-shifted projector images.

여기서 Φ 는 위상을 의미하고 영상에서 Φ 는 영상 좌표(x,y)로 표현할 수 있다. 영상의 밝기는 음수를 표현할 수 없기 때문에 평균 밝기 값 I_0 를 각 함수에 더해주었다. A는 진폭으로 코사인 값을 영상 밝기값으로 증폭하기 위하여 사용된다. 그림 2는 프로젝터 영상으로 사용될 I_1, I_2, I_3 의 일부분을 보여주고 있다. 프로젝터의 해상도에 맞게 생성한 I_1, I_2, I_3 는 순차적으로 물체의 표면에 투사된다.

본 논문에서 사용한 프로젝터의 FOV (Field Of View)는 카메라의 FOV 보다 넓기 때문에 투영된 패턴이 카메라 영상에 모두 획득되지 않는다. 따라서 그림 1에서 보이듯이 프로젝터 영상을 그대로 투영하지 않고 카메라와 프로젝터 사이의 호모그래피(homography)를 이용하여 프로젝터 영상을 변환 후 투영 영상을 생성하였다[7].

세 장의 프로젝터 패턴 영상을 물체의 표면에 투영하고 그 장면을 카메라로 획득하였다. 이때 획득된 영상을 카메라 영상이라 하자. 이때 세 장의 카메라 영상 I'_1, I'_2, I'_3 로부터 위상 Φ' 를 다음 식에서 계산할 수 있다[8].

$$\Phi'(x,y) = \arctan\left(\sqrt{3} \frac{I'_1(x,y) - I'_3(x,y)}{2I'_2(x,y) - I'_1(x,y) - I'_3(x,y)}\right) \quad (3)$$

계산된 Φ' 는 그림 3(a)와 같이 0° ~ 360°를 위상을 반복적으로 보여주는 영상으로 생성된다. 이 영상의 위상은 프로젝터 영상에서 코사인 함수가 반복되는 횟수만큼 반복되기 때문에 유일한 코드라고 할 수 없다. 따라서 반복되는 위상을 유일한 코드로 변환하기 위한 언래핑(unwrapping)

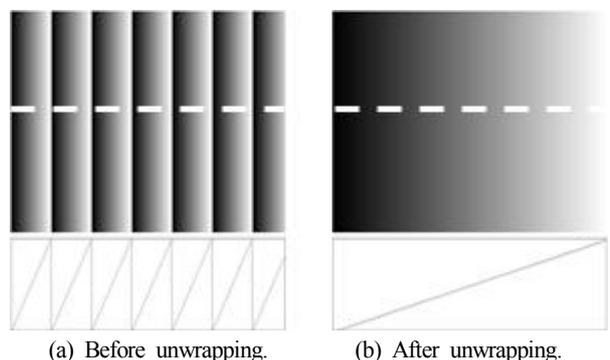


그림 3. 위상영상의 언래핑 (a) 전 (b) 후.
Fig. 3. Phase images of (a) before and (b) after unwrapping.

과정이 필요하다. 이 과정은 반복되는 위상영상을 360° 단위로 누적하는 원리이다. 다시 말하면 첫 번째 360°(=0°)를 지나서 다시 반복되는 1°는 361°가 되는 것이다. 언래핑 과정을 수행하기 위하여 Goldstein 알고리즘[9]을 사용하였다.

그림 3(a)는 카메라 영상에서 식 (3)을 이용하여 계산된 위상의 모습을 나타내고 그림 3(b)는 언래핑 과정을 수행한 후 위상의 모습을 보여준다. 그리고 그림 3에서 상단에 있는 영상은 위상을 영상으로 표현한 것이고 하단의 그래프는 상단의 영상에서 점선으로 표시한 부분의 위상을 표현한 것이다. 카메라의 언래핑된 위상영상을 얻었다면 프로젝터의 위상영상과 서로 비교하여 동일한 위상을 가진 영상 좌표를 찾아야한다. 위상이 일치하는 좌표들은 삼각법(triangulation)으로 물체의 3차원 좌표를 획득하는데 사용된다[10]. 본 논문에서는 카메라와 프로젝터가 x와 y축으로 모두 이동하여 설치되어 있기 때문에 x, y축 두 방향의 위상을 모두 구하여 정합에 사용하였다.

III. 3차원 스캐닝 장치의 광학왜곡 보정

II 장에서 소개한 초소형 카메라-프로젝터 장치와 스캐닝 기술로 3차원 스캐닝을 수행한 결과 그림 4와 같이 평면 물체를 복원한 3차원 모델의 표면에 물결무늬 형태의 오류가 발생하였다. 이와 같은 오류를 S. Zhang [11,12]은 프로젝터와 카메라의 비선형적인 감마 함수를 원인으로 해석하였다. 또한 이들은 비선형적인 감마 함수로 인하여 발생하는 오류를 LUT (Look Up Table)로 기록하여 보정하는 방식으로 오류를 줄였다. 하지만 본 논문에서 사용한 장치의 경우 감마 함수는 이미 보정된 상태이기 때문에 이러한 오류가 다른 원인으로 발생하는 것으로 판단할 수밖에 없다.

물결무늬의 오류가 발생하는 원인은 다양하게 추측할 수 있다. 초소형 카메라-프로젝터의 경우 광학 장치의 특성이 고가의 장치에 비하여 상대적으로 나쁘기 때문에 투영된 구조광 패턴의 밝은 부분이 카메라 영상에서 주변의 밝기에 영향을 주어 마치 빛이 번지는 것과 같은 블룸(bloom) 효과를 내기도 한다. 뿐만 아니라 흑백 카메라는 그림자나 물체 표면의 재질 및 잡음에 매우 민감하다. 이러한 광학적 왜곡으로 인한 3차원 스캐닝 오류를 해결하기 위하여 카메라 영상을 후처리함으로써 3차원 스캐닝의 성능을 향상하고자 다음과 같은 방법을 제안한다.

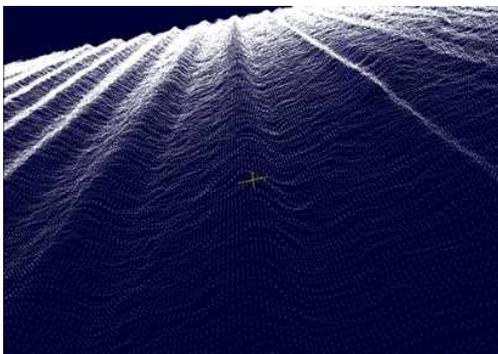


그림 4. 평면물체의 스캐닝 결과의 물결무늬 오류.
Fig. 4. Wave-pattern error of the 3D scanning of a planar object.

1. 정현파 영상의 평균값 보정

그림 5는 세 개의 카메라 영상의 특징한 y값에서 x축을 따라 추출한 코사인 그래프와 그 평균값을 보여주고 있다. 그래프의 x축은 영상 좌표의 x축과 일치하며 y축은 영상의 밝기값이다. 그림에서 보듯이 평균값이 일정하지 않다는 것을 알 수 있다. 여기서 말하는 평균값은 식 (2)의 평균 밝기값 I_0 를 뜻한다.

영상의 위치에 따라서 정현파 함수의 평균값이 차이는 나는 이유는 프로젝터와 카메라 렌즈의 비네팅(vignetting) 때문이다. 식 (4)는 카메라 영상으로부터 평균값의 추정치 I'_0 를 구하는 식이다.

$$I'_0(x,y) = \frac{I'_1(x,y) + I'_2(x,y) + I'_3(x,y)}{3} \quad (4)$$

세 장의 카메라 영상에서 동일한 좌표를 가지는 세 픽셀들의 진폭과 평균값이 같다고 가정했을 때, 모든 픽셀에 대하여 수식 (4)로부터 구해진 I'_0 를 영상의 밝기값에서 뺀 다음 새로운 I_0'' 를 더함으로써 모든 픽셀의 평균값을 동일하게 보정하였다. 이 과정을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$I''_j(x,y) = I'_j(x,y) - I'_0(x,y) + I_0'' \quad (j=1,2,3) \quad (5)$$

수식 (5)에서 I''_j 은 평균값이 동일하게 보정된 영상의 밝기를 의미한다. 평균값 I_0'' 를 150으로 정하였을 때 그림 5의 카메라 영상은 그림 6과 같이 보정된다.

이론적으로 위상변이 알고리즘을 이용한 3차원 스캐닝 기술에서는 정현파 영상의 진폭과 평균값이 위상의 계산에 영향을 미치지 않는다. 하지만 실제 실험에서는 물체 표면

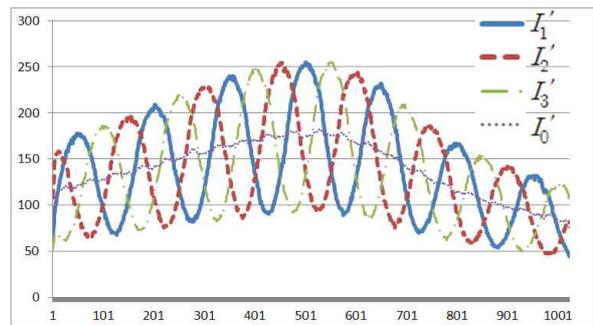


그림 5. 카메라 영상의 코사인 함수 그래프.

Fig. 5. Cosine function in camera images.

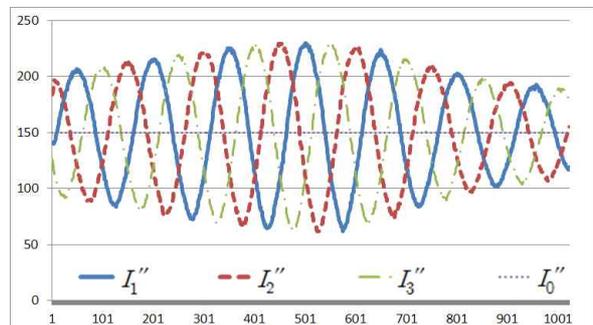


그림 6. 평균값이 보정된 코사인 영상.

Fig. 6. Cosine images after average corrected.

의 미세한 요철로 인한 밝기값의 변화를 평균값을 동일하게 보정해줌으로써 후처리 시 발생할 수 있는 오류를 억제해주기 때문에 꼭 필요한 과정이다.

2. 코사인 함수의 교차점을 이용한 블룸 보정

카메라 영상에서 물결무늬와 같은 스캐닝 오류를 유발하는 또 하나의 원인은 블룸(bloom) 현상임을 알 수 있었다. 블룸 현상은 영상의 밝은 부분 주위에서 실제 밝기보다 더 밝아지는 현상을 말한다. 그 예로 카메라 영상의 일부를 그림 7에 보였다. 그림 7에서 카메라로 획득한 코사인 영상의 밝기가 높은 부분의 주위에서 이상적인 코사인 곡선에 비해 왜곡된 모습을 볼 수 있다. 코사인 영상의 꼭지점(peak)은 밝기값이 255로 최대값으로 유지되지만 주변의 밝기값은 이상적인 것보다 더 밝은 것을 알 수 있다. 이러한 오류는 위상변이의 계산에 오류를 유발하고 결과적으로 3차원 스캐닝의 성능을 저하하는 요인이 된다.

본 논문에서는 이러한 블룸 현상을 해결하기 위하여 세 개의 코사인 영상이 서로 교차하는 교차점의 정보를 이용하여 보정하는 기술을 제안한다. 즉, 코사인 함수(영상)의 교차점은 반드시 60° 위상의 주기로 반복되어 나타나기 때문에 이상적인 밝기값을 쉽게 추정할 수 있다. 그림 8에서 이러한 주기적 특성을 설명하고자 한다. 그림에서 프로젝터 영상에 사용되는 세 개의 이상적인 코사인 함수(영상)를 표현하고 서로 다른 두 개의 코사인 함수가 교차하는 점을 표시하였다. 교차점이 $\pi/3$, 즉 60° 위상주기로 발생함을 알 수 있다. 따라서 교차점에서의 코사인값을 알 수 있고 따라서 카메라 영상에서 이상적인 교차점의 밝기값 또한 식 (2)에서 알 수 있다.

한편 세 장의 카메라 영상의 모든 픽셀의 위상값은 식 (3)으로 계산할 수 있다. 그러나 교차점의 위상값만 이용하는 이유는 다음과 같다. 카메라 영상이 이상적일 경우는 모든 영상 픽셀의 위상이 정확히 계산되지만 블룸 오류를 가지고 있는 영상의 경우 위상의 계산에 오차가 발생한다. 따라서 식 (3)으로 계산된 위상이 이상적인 위상값인지 판단

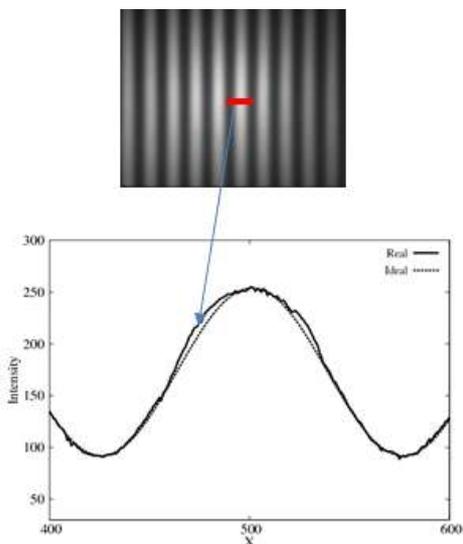


그림 7. 카메라 영상의 코사인 함수와 이상적인 코사인 함수.
Fig. 7. Captured and ideal cosine function.

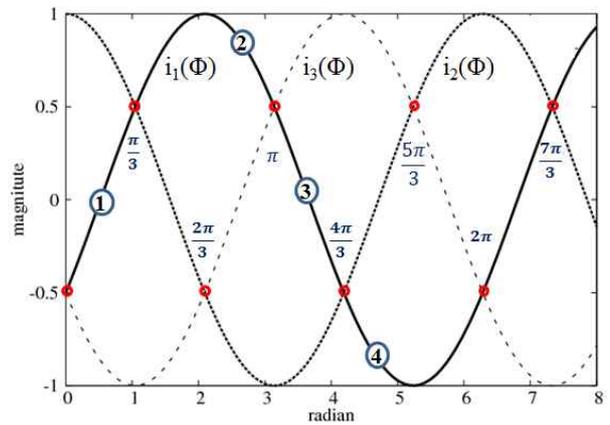


그림 8. 이상적인 코사인 함수와 교차점.
Fig. 8. Ideal cosine functions and crossing points.

하기 어렵다. 이러한 문제를 풀기위해서 세 개의 코사인 영상의 교차점을 이용하였다. 이는 블룸 오류가 있다고 하더라도 코사인 함수의 교차점은 항상 $\pi/3$ 의 배수에서 발생하기 때문이다.

이와 같이 세 개의 코사인 함수($i_j(\Phi)$) 또는 영상($I_j(x,y)$)의 주기적인 교차점들을 활용하기위하여 한 개의 코사인 함수를 그림 8과 같이 ①, ②, ③, 및 ④의 네 구간으로 나누고 각 구간의 밝기값을 각각 보정하였다. 네 구간의 위상은 각각 $(0, \pi/3)$, $(\pi/3, \pi)$, $(\pi, 4\pi/3)$, 그리고 $(4\pi/3, 2\pi)$ 이며 각 구간의 최대 밝기값 $I_{j,max}''$ 과 최소밝기값 $I_{j,min}''$ 을 구하고 새로운 보정영상 $I_j^c(x,y)$ 를 생성하였다.

$$I_j^c(x,y) = \frac{I_j''(x,y) - I_{j,min}''}{I_{j,max}'' - I_{j,min}''} (I_{max}^c - I_{min}^c) + I_{min}^c \quad (j=1,2,3) \quad (6)$$

여기서 I_{min}^c 과 I_{max}^c 는 보정영상에서 해당 구간의 최소 및 최대 밝기값으로 이상적인 코사인 영상에서 결정할 수 있다.

블룸 오류를 보정하기위한 밝기값 오차의 보정은 식 (6)의 1차방정식에 의하여 이루어진다. I_{min}^c 과 I_{max}^c 에 해당하는 상수값에 의하여 밝기값을 보정하는 것은 교차점 사이의 밝기값의 곡선 모습을 그대로 펼치기 (stretching) 위함이다. 이는 밝기값의 곡선 모습이 바로 물체의 형상 정보를 포함하기 때문이다. 반면 코사인 곡선의 교차점 중에서 $\pi/3, \pi, 5\pi/3, 7\pi/3$ 에서의 영상값은 상당히 높기 때문에 이들 교차점에서의 밝기값에 이미 블룸왜곡이 포함될 수 있다. 따라서 식 (6)의 보정을 이용하여 교차점의 블룸 왜곡을 이상적인 값으로 보정함으로써 교차점 사이의 밝기값 또한 자연스럽게 보정되는 효과를 가져올 수 있다.

그림 9는 코사인 영상의 보정의 예를 보여준다. 그림의 좌측은 카메라 영상에서 동일한 y축에서 추출한 세 개의 코사인 함수의 일부를 보여주고 우측은 블룸 보정 이후의 결과를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 높은 피크점과 상단의 교차점, 상단의 교차점과 하단의 교차점 그리고 하단의 교차점과 낮은 피크점 사이에서 이상적인 코사인 함수로 보정됨을 알 수 있다. 블룸 효과로 인하여 상대적으로 밝은 부분의 교차점들의 보정효과가 많은 것을 알 수 있다.

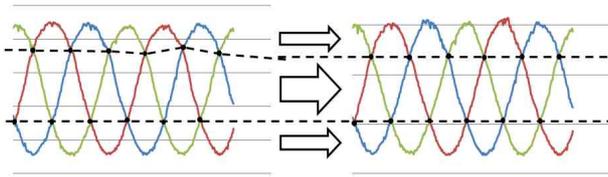


그림 9. 교차점 정보를 이용한 코사인 함수 보정.
Fig. 9. Cosine function remapping by using crossing points.

IV. 실험

1. 초소형 3차원 스캐닝 장치의 구성

본 논문에서는 초소형 카메라와 프로젝터를 이용하여 3차원 스캐너로부터 약 5 cm 정도의 매우 가까운 거리에서 크기가 1~2 cm 정도의 작은 물체를 스캐닝하고자 한다. 작은 물체의 3차원 정보를 고해상도로 획득하기 위하여 그림 10과 같은 초소형 3차원 스캐닝 장치를 구성하였다. 이 장치는 Pointgrey의 1024x768 해상도의 IEEE1394a 초소형 흑백 카메라와 3M사의 1024x768 해상도의 초소형 컬러 프로젝터로 구성되어 있다. 그리고 본 연구실에서 제안한 마커(marker) 기반의 간편한 프로젝터-카메라 보정(calibration) 알고리즘을 사용하여 프로젝터와 카메라 사이의 기하관계에 대한 보정을 완료하였다[8]. 또한 카메라와 프로젝터의 응답 함수(response function)를 보정하기 위하여 참고문헌 [7]에서 제안한 방법을 이용하여 카메라와 프로젝터의 감마 곡선(gamma curve)을 계산하고 이를 선형화하였다.

2. 프로젝터 영상의 생성 및 카메라 영상의 보정

초소형 카메라-프로젝터의 프로젝터 영상은 8-bit 흑백 영상으로 코사인 영상의 한 주기를 102픽셀로 고정하였다. 코사인 영상은 평균값 $I_0=125$ 를 기준으로 진폭 75를 가지도록 하여 전체 범위 50~200의 밝기값으로 영상을 생성하였다. 그림 11은 x 및 y축 방향에 대하여 각각 만들어진 프로젝터 영상이다. 또한 각 방향에서 위상이 다른 세 장의 영상을 생성하였다. 프로젝터 영상은 호모그래피를 이용하여 그림 12와 같이 변환하였고 변환된 영상을 프로젝터 투영 영상으로 사용하였다.

투영 영상을 프로젝터를 통하여 물체의 표면에 투영하고 투영된 모습을 획득하여 카메라 영상을 얻었다. 획득된 카메라 영상을 평균값 보정을 수행하여 새로운 평균값의 카메라 영상으로 변환하였다. 그리고 교차점 정보를 이용하여 코사인 영상을 변환하고 블룸효과가 제거된 영상을 획득하



그림 10. 초소형 3차원 스캐닝 시스템의 구성.
Fig. 10. Components of a micro 3D scanning system.

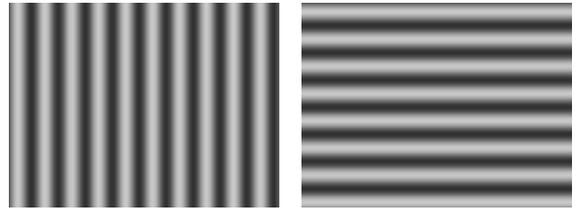


그림 11. x축, y축에 대한 프로젝터 영상.
Fig. 11. Projector images of x and y directions.

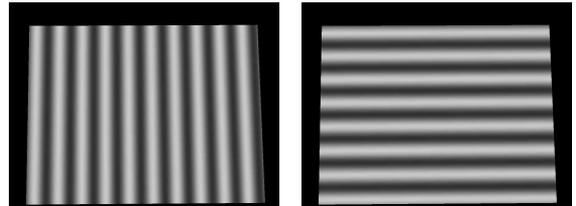
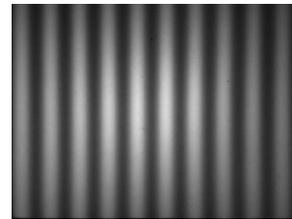
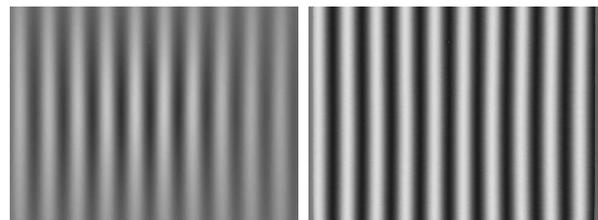


그림 12. x축, y축에 대한 투영 영상.
Fig. 12. Projection images of x and y directions.



(a) Captured camera image.



(b) After average correction. (c) After bloom correction.

그림 13. 카메라 영상과 보정된 영상.
Fig. 13. Captured camera image and corrected images.

였다. 그림 13은 깨끗한 흰색 A4용지를 평면에 붙여 실험을 실시하여 얻은 카메라 영상, 새로운 평균값의 영상, 그리고 교차점 정보를 이용하여 코사인 영상을 보정한 영상을 보여주고 있다. 그림 13(a)의 카메라 영상에 비하여 블룸효과와 평균밝기값이 보정된 것을 알 수 있다.

보정된 카메라 영상으로부터 위상을 구하고 언래핑을 구현하여 각 픽셀의 위상 코드를 계산하였다. 그리고 입력 영상에서 역시 코드를 계산하고 동일한 코드를 갖는 좌표를 프로젝터 영상에서 탐색하였다. 동일한 코드의 프로젝터 좌표는 프로젝터 영상을 투영할 때와 마찬가지로 호모그래피를 이용하여 변환하고 프로젝터와 카메라 좌표 모두 렌즈 왜곡을 고려한 보정을 실시하여 3차원 좌표를 계산하였다. 다시 말해서, 프로젝터 영상과 카메라 영상에서 동일한 코드를 가진 픽셀의 좌표값을 탐색한 후 전통적인 삼각법으로 해당 픽셀의 3차원 좌표를 계산하였다.

3. 3차원 스캐닝 성능 비교

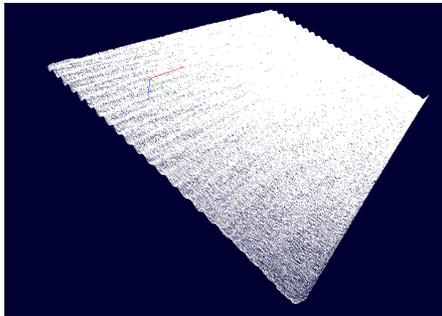
3차원 스캐닝의 성능을 비교하기 위하여 기존의 위상 보정 기술의 대표적 방법인 S. Zhang 및 P. Huang [11]이 제안한 방법의 결과와 본 논문의 보정 방법을 비교하였다. 그림 14(a)는 평면물체의 표면을 아무런 보정을 하지 않은 3차원 스캐닝 결과이다. 그림 14(b)는 S. Zhang의 위상 보정 기술을 적용한 결과를 보여준다. 14(a)의 결과에 비하여 14(b)에서는 물체 표면의 물결무늬 오류가 상당히 줄어들음을 알 수 있다. 그러나 여전히 오류가 남아있음을 알 수 있다. 14(c)는 S. Zhang의 위상보정에 추가로 제안한 보정기술을 적용한 결과이다. 제안한 결과는 복원된 물체의 표면이 거의 평면에 가깝다는 것을 알 수 있다. S. Zhang의 보정기술도 위상의 오차를 상당히 해결하지만 블룸 현상에 의한 오류를 해결하지 않고서 좋은 결과를 얻을 수 없다는 것을 그림 14를 통하여 알 수 있다.

그림 15(a)는 흰색 바둑알을 아무런 보정을 하지 않고 3차원 스캔한 결과이다. 그리고 평면의 경우와 마찬가지로 보정 후의 스캐닝 결과를 구하였고 그림 15(b), (c)에 나타

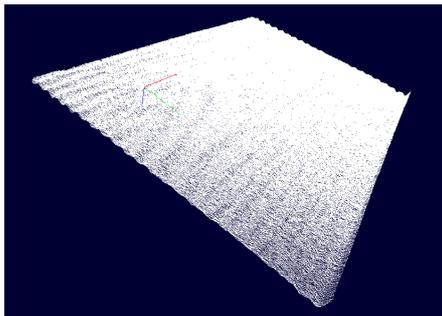
내었다.

평면에 대한 실험과 유사하게 위상 보정만을 수행한 결과인 그림 15(b)는 보정 전에 비하여 오류가 줄어들었지만 상단의 바둑알 곡면에서 여전히 오류가 남아있다는 것을 알 수 있다. 그리고 모든 보정을 수행한 결과인 그림 15(c)를 보면 상단의 곡면에서도 오류가 크게 줄어들음을 알 수 있다.

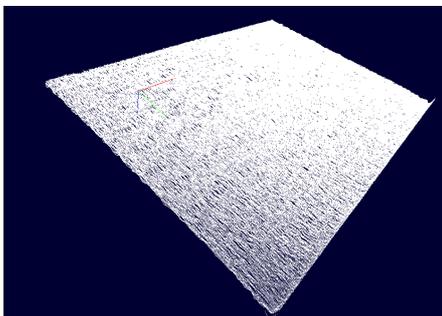
3차원 스캐닝 성능의 정량적 비교를 위하여 NextEngine사의 개인용 데스크탑 3차원 스캐너를 이용하여 실험에 사용한 바둑알을 스캔하고 그 결과를 다른 방법의 결과와 비교하였다. 참고로 상용 3차원 스캐너는 라인 레이저 방식의 스캐너로 129×96 mm의 측정영역에 대하여 최대 16points/mm의 해상도와 0.13 mm의 정밀도를 가진다. 3차원 스캐너를 통하여 얻은 비교 대상과 논문에서 제안한 방법으로 생성한 모델을 비교하기 위하여 먼저 3차원 정합 알고리즘인 ICP (Iterative Closest Point) 알고리즘[13]을 이용하여 보정 전과 후의 결과를 비교 대상과 각각 정합하였다. 그리고 가장 가까운 점들 사이의 거리를 구하여 오류를 측정하였다. 제안 방법 및 레이저 기반의 스캐닝 결과는 모두 3차원 점



(a) Before correction.



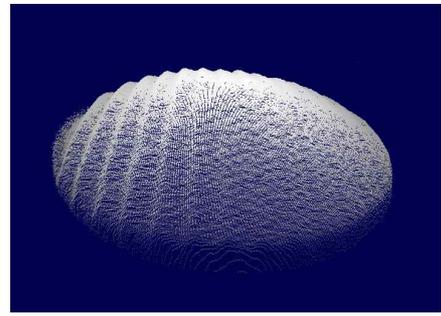
(b) Result of S. Zhang's method [10].



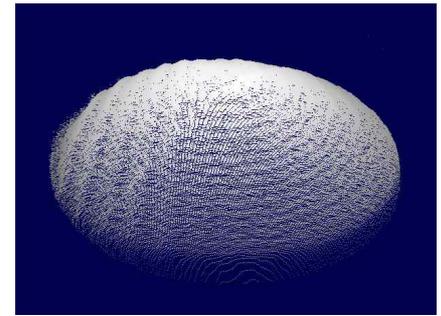
(c) Result of the proposed method.

그림 14. 평면물체의 복원 결과.

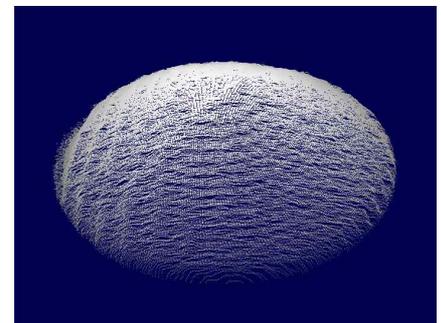
Fig. 14. 3D scanning results of a planar object.



(a) Before correction.



(b) Result of S. Zhang's method [10].



(c) Result of the proposed method.

그림 15. 바둑알의 복원 결과.

Fig. 15. 3D scanning results of a GO stone.

표 1. 3차원 스캐닝 오차의 비교 (mm).

Table 1. Comparison of 3D scanning error (mm).

	보정 전	보정 후
최대값	0.345807	0.273591
평균값	0.083105	0.068511
RMS오차	0.106186	0.084686
표준 편차	0.066099	0.049779

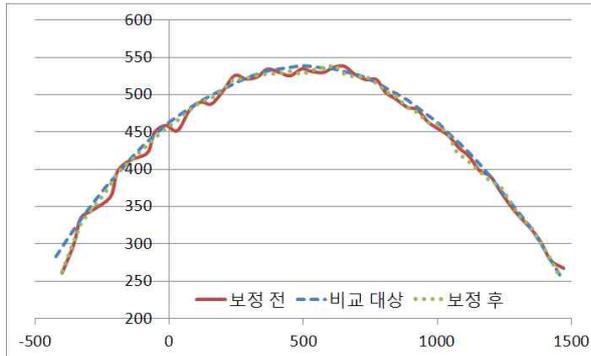
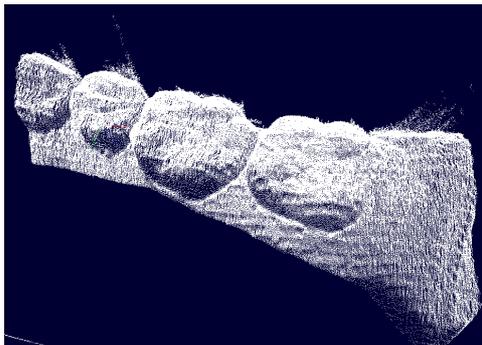
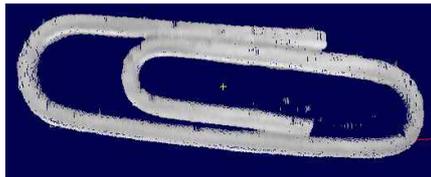


그림 16. 바둑알 복원 결과의 수직 단면 (단위 10μm).

Fig. 16. Vertical section of Go stone reconstruction result.



(a) Two small objects.



(b) Result.

그림 17. 두 개의 소형 물체의 스캔 결과.

Fig. 17. Two small objects and their 3D scanning results.

군(points cloud)로 표현되기 때문에 ICP를 쉽게 적용할 수 있다. 레이저 결과와의 비교는 표 1과 같다. 제안된 보정기술을 적용한 후의 결과가 레이저 기반의 결과와 유사함을 알 수 있다.

그림 16은 바둑알의 레이저 스캐닝의 비교 대상과 보정 전, 후의 복원 결과에서 물체 곡면의 한 단면을 2차원 그래

표 2. 3차원 스캐닝 시간의 비교 (sec).

Table 2. Comparison of 3D scanning time (sec).

실험물체	광학 왜곡 보정	위상 언래핑	코드탐색 및 3차원 좌표계산 (775,716개)	왜곡보정 불포함
				왜곡보정 포함
평면	1.31	4.96	35.94	40.9
				42.21
바둑알	1.32	5.0	36.48	41.48
				42.8
치아모형	1.32	4.96	37.77	42.73
				44.06

프로 표현한 것이다. 그림의 x축은 단면 방향을 의미하고 y 축은 스캐닝 결과의 z축, 즉 높이값을 의미한다. 그래프에서 x축과 y축의 단위는 10μm 이다.

그림 17은 두 개의 소형 물체를 대상으로 3차원 스캐닝을 실시한 결과이다. 첫 번째 물체는 작은 클립이고 두 번째 물체는 석고 재질의 치아 모형이다. 두 물체의 스캔 결과는 모두 3차원 점군으로 표현하여 출력하였다. 물체의 크기가 작기 때문에 약 5 cm의 거리에서 물체를 스캐닝하였다. 클립의 실제 높이는 약 1.2 mm이고 실험 결과에서 높이는 약 1.2258 mm로 측정되었다. 치아 모형의 경우 상당히 많은 3차원 점군 정보로 치아의 모델이 생성됨을 알 수 있다.

제한한 광학왜곡보정을 3차원 복원 실험에 적용하였을 때와 적용하지 않았을 때의 수행시간 비교를 표 2에서 보여주고 있다. III 장에서 제한한 광학왜곡의 보정 방법은 연산량이 많지 않기 때문에 비교적 빠른 수행시간을 보인다. 표 2에서 보이듯이 광학왜곡보정에 걸리는 시간은 전체 3차원 복원의 수행시간에 비하여 매우 짧다. 따라서 광학왜곡보정이 추가되어도 전체 3차원 복원에 걸리는 시간에는 거의 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 구조광 기반의 기술 중에서 세 개의 정현파 함수의 위상변위 방식의 알고리즘을 사용하여 휴대 가능한 초소형 3차원 복원 시스템을 구현하였다. 구현된 시스템은 40μm 내외의 해상도를 가지고 있으며 3차원 스캐닝 성능 향상을 위하여 광학적 왜곡을 보정하는 기술을 제안하였다. 제안한 기술은 카메라 영상에서의 정현파 영상의 평균값을 보정하고 서로 다른 위상의 정현파 함수가 가지는 교차점의 위상이 주기적으로 발생하는 특성을 이용하여 영상의 블룸 왜곡을 보정하였다. 보정 후 실시한 3차원 스캐닝 결과는 보정 전에 비해서 성능이 향상됨을 실험을 통하여 확인하였다.

참고문헌

[1] C. W. Chu, J. Y. Park, H. W. Kim, J. C. Park, S. J. Lim, and B. K. Koo, "Recent trends of 3D reconstruction technology," *ETRI Electronics and Telecommunications Trends (in Korean)*, vol. 22, no. 4,

- 2007.
- [2] S. H. Baek, S. Y. Park, and S. H. Kim, "A 3-D tube reconstruction based on axis alignment of multiple laser scanning," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 11, pp. 1159-1167, 2011.
- [3] J. Pages, J. Salvi, R. Garcia, and C. Matabosch, "Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 133-138, Sep. 2003.
- [4] J. Salvi, J. Pages, and J. Batlle, "Pattern codification strategies in structured light systems," *Pattern Recognition*, vol. 37, no. 4, pp. 827-849, 2004.
- [5] P. S. Huang, C. Zhang, and F. P. Chiang, "High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection," *Opt. Eng.*, vol. 42, no. 1, pp. 163-168, 2003.
- [6] P. S. Huang and S. Zhang, "Fast three-step phase-shifting algorithm," *Applied Optics*, vol. 45, pp. 5086-5091, Jul. 2006.
- [7] G. G. Park and S.-Y. Park, "Correction of photometric distortion of a micro camera-projector system for structured light 3D scanning," *Journal of Sensor Science and Technology*, vol. 21, no. 2, pp. 96-102, 2012.
- [8] S. Y. Park, G. G. Park, and L. Zhang, "An easy camera-projector calibration technique for structured light 3-D reconstruction," *Journal of Information Processing Society (in Korean)*, vol. 17-B, no. 3, pp. 215-226, Jun. 2010.
- [9] D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms and Software*, John Wiley & Sons, 1998.
- [10] E. Trucco and A. Verri, *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*, Prentice Hall, 1998.
- [11] S. Zhang and P. S. Huang, "Phase error compensation for a 3-D shape measurement system based on the phase-shifting method," *Opt. Eng.*, vol. 46, no. 6, 2007.
- [12] S. Zhang and S. T. Yau, "Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector," *Applied Optics*, vol. 46, no. 1, pp. 36-43, 2007.
- [13] P. J. Besl and N. D. McKay, "A method for registration of 3-D shapes," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, no. 2, pp. 239-259, 1992.



박 고 광

2009년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 졸업. 2011년 동 대학 전자전기컴퓨터학부 석사졸업. 2011년~현재 에이알비전(주) 연구원. 관심분야는 카메라 보정, 능동 3차원 복원.



백 승 해

2004년 경북대학교 컴퓨터공학과 졸업. 2010년 동 대학 전자전기컴퓨터학부 석사졸업. 2010년~현재 동 대학 박사과정. 관심분야는 스테레오 정합, 카메라 보정, 3차원 복원.



박 순 용

1991년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1993년 동 대학 석사졸업. 2003년 미국 뉴욕주립대학교 스토니브룩 박사졸업. 1993년~1999년 한국원자력연구소 로봇기반연구실 선임연구원. 2004년~2005년 한국전자통신연구원 디지털콘텐츠연구단 선임연구원. 2005년~현재 경북대학교 컴퓨터학부 부교수. 관심분야는 3차원복원, 3차원정합, 로봇비전, 3DTV.