

위상 변위 방식 초소형 3차원 스캐너의 복원 오차 최소화

박고광, 박순용^o

경북대학교 전자전기컴퓨터학부, 경북대학교 IT 대학 컴퓨터학부

pgg@vision.knu.ac.kr, sympark@knu.ac.kr

요약

본 논문에서는 초소형 시스템을 이용하여 기존 구조광 기반의 위상 변위 방식 3차원 복원 알고리즘을 적용했을 때 발생하는 오차를 줄이고자 한다. 카메라와 프로젝터를 사용한 구조광 기반의 3차원 복원 기술은 프로젝터로 투영한 구조광과 카메라로 캡처한 구조광을 분석하여 3차원 정보를 얻는다. 이때 초소형 시스템의 장치들이 가지는 광학적인 결함은 좋지 않은 결과를 야기시킨다. 이 문제점을 해결하기 위하여 블룸 현상을 억제하고 구조광의 패턴으로 사용된 위상을 직접 보정하는 기술을 제안하고 실험을 통하여 작은 물체에 대한 3차원 복원 결과와 오차를 분석하였다.

1. 서론

3차원 복원(reconstruction)은 컴퓨터 비전에서 많은 연구가 진행되고 있는 분야의 하나이다. 3차원 복원은 물체 표면의 형상에서 3차원의 컴퓨터 정보를 획득하는 것을 말한다. 3차원 복원을 위해서는 스테레오(stereo) 카메라 또는 레이저(laser) 등, 물체의 3차원 형상을 센싱(sensing)하기 위한 3차원 센서(sensor) 기술이 필요하다. 그 중 레이저와 같은 광원을 이용하는 기술을 특별히 능동형(active) 3차원 스캐닝 기술이라 하며 구조광(structured light) 기반의 기술도 그 중 하나이다. 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 구조광을 생성하기 용이하기 때문에 구조광 기반 기술은 카메라-프로젝터 시스템을 많이 이용한다. 카메라-프로젝터 시스템에서 구조광 기술은 먼저 프로젝터로 구조광을 생성하여 물체의 표면에 투영(projection)하고 카메라를 이용하여 그 장면을 캡처하는 순서로 진행된다. 그리고 프로젝터로 투영된 구조광과 카메라에서 획득된 구조광을 분석하여 3차원 정보를 얻어내는 것이다.

본 논문에서는 기존의 구조광 기반 위상 변위 방식 3차원 복원 알고리즘을 적용하였을 때 초소형 프로젝터의 광학적 특성으로 인한 문제를 해결하고자 한다. 짧은 거리의 물체를 복원하고자 할 때 발생하는 블룸(bloom) 잡음을 효과적으로 줄이고 위상 오차를 최소화하여 약 5cm 거리의 물체에 대

여 85 μm 의 RMS 오차를 구현하였다.

2. 초소형 3차원 스캐너

본 논문에서는 초소형 카메라와 프로젝터를 이용하여 센서로부터 5cm 정도의 매우 가까운 거리에서 크기가 약 1~2cm 정도의 작은 물체를 복원하고자 한다. 작은 물체의 3차원 좌표를 높은 해상도로 획득하기 위하여 그림 1과 같은 초소형 3차원 스캐닝 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 Point Grey의 1024x768 해상도의 IEEE 1394a 초소형 흑백 카메라와 3M의 1024x768 해상도의 초소형 컬러 프로젝터로 구성되어 있다. 그리고 마커(marker) 기반의 간편한 프로젝터-카메라 보정 알고리즘[1]을 사용하여 시스템의 보정(calibration)을 완료하였다. 또한 일반적으로 감마 함수 혹은 곡선(gamma function, curve)이라고 말하는 카메라와 프로젝터의 응답 함수(response function) 역시 선형적으로 보정하였다.

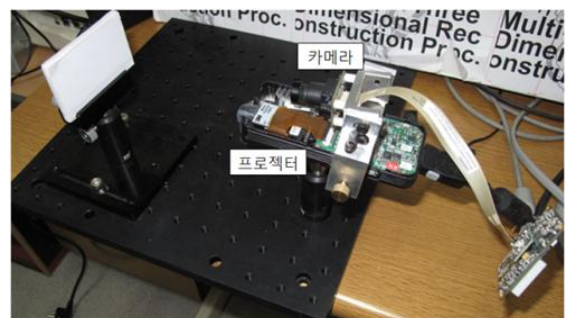


그림 1. 초소형 3차원 스캐너의 구성

본 논문에서는 구조광 기반의 기술 중 높은 정확도와 적은 수의 패턴을 이용하고 해상도가 높은 위상 변위(phase shifting) 알고리즘을 사용한다. 그 중에서도 세 가지의 패턴만을 사용하여 분석이 가능한 P. S. Huang[2][3]이 제안한 TSPS(Three-Step Phase Shifting) 알고리즘을 사용하였다.

3. 3 차원 복원 오류 최소화

TSPS 알고리즘을 이용하여 평면에 대한 3 차원 복원을 실시한 결과 그림 2 와 같이 물체의 표면에 물결무늬와 같은 오류가 발생하였다. 이와 같은 오류를 S. Zhang[4][5] 은 프로젝터의 비선형적인 감마 함수를 원인으로 해석하였다. 또한 비선형적인 감마 함수로 인하여 발생하는 오류를 LUT(Look Up Table)로 기록하여 보정하는 방식으로 오류를 줄였다. 이는 모든 구간에서 같은 감마 함수를 지니고 있고 다른 원인이 없을 때 가능하다. 하지만 본 논문에서 사용한 시스템의 경우 감마 함수는 이미 보정된 상태이고 실험 장치들이 또 다른 원인을 제공하기 때문에 위 방법만으로는 해결 할 수 없다.

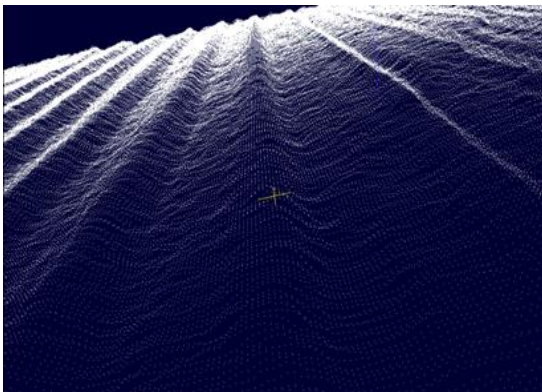


그림 2. 평면 복원 결과의 물결무늬 오류

물결무늬의 오류가 발생하는 원인은 그 종류를 다양하게 추측할 수 있다. 카메라와 프로젝터의 동기가 일치하지 않아서 카메라로 영상을 얻을 때 시스템의 광학적 특징이 조금씩 달라지고 패턴의 밝은 부분이 주위의 밝기에 영향을 주어 마치 빛이 번지는 것과 같은 효과를 내기도 한다. 뿐만 아니라 사용하는 카메라가 흑백 카메라이기 때문에 그림자나 물체 표면의 재질 그리고 잡음에 매우 민감하다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 획득 영상(captured image)을 후처리함으로써 오류를 줄이고자 하며 그 방법을 다음과 같이 제안한다.

3.1 코사인 함수의 평균값 보정

그림 3 은 카메라로 얻은 영상에서 특정한 y 값

에서 x 축을 따라 추출한 세 개의 코사인 함수와 그 평균값을 보여주고 있다. 그림 3 에서 평균값을 보면 일정하지 않고 다르다는 것을 알 수 있다.

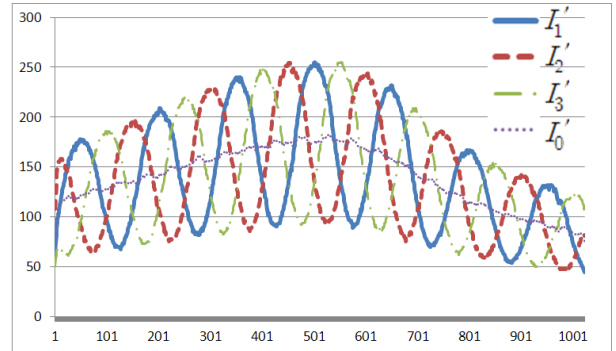


그림 3. 카메라 획득 영상의 코사인 함수

$$I_0'(x,y) = \frac{I_1'(x,y) + I_2'(x,y) + I_3'(x,y)}{3} \quad (1)$$

수식 (1)은 카메라 획득 영상으로부터 평균값의 추정치 I_0' 를 구하는 식이다. 세 장의 획득 영상에서 같은 좌표를 가지는 세 픽셀들의 진폭과 평균값이 같다고 가정했을 때, 모든 픽셀에 대하여 수식 (1)로부터 구해진 I_0' 를 밝기 값에서 빼고 새로운 I_j'' 를 더해줌으로써 모든 픽셀의 평균값을 동일하게 할 수 있다. 이 과정을 식으로 표현하면 다음과 같다.

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

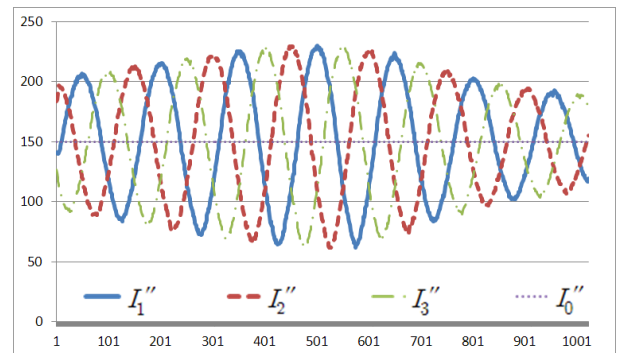


그림 4. 평균값이 보정된 영상의 코사인 함수

수식 (2)에서 I_0'' 는 평균값이 동일하게 보정된 영상의 밝기를 의미한다. 평균값을 I_0'' 로 보정하고 보정된 영상에서 그림 3 에서 추출한 값들의 좌표에서 동일하게 추출하여 나타낸 것이 그림 4 이다.

이상적인 3 차원 복원에서는 위상 계산 시 진폭과 평균값은 무시되는 부분이기 때문에 사실 이 과

정만으로는 결과에 영향을 미치지 않는다. 하지만 실제 실험에서는 평면의 잡음등으로 인하여 갑자기 어두워지는 부분에 대해서 평균값을 동일하게 보정해줌으로써 후처리 시 발생할 수 있는 오류를 억제해 주기 때문에 꼭 필요한 과정이다.

3.2 코사인 함수의 교차점을 이용한 보정

물결무늬의 오류를 유발하는 원인을 분석한 결과, 영상의 블룸 현상이 오류의 원인중 하나임을 발견할 수 있었다. 블룸 현상은 영상의 밝은 부분 근처에서 그 밝기가 밝은 부분으로 인하여 더 밝아지는 현상을 말한다. 그림 5 에서 알 수 있듯이 획득 영상의 코사인 함수에서 밝은 부분에 해당하는 높은 피크(peak)점 부근이 이상적인 경우와 비교하여 넓게 퍼져있는 것을 볼 수 있다.

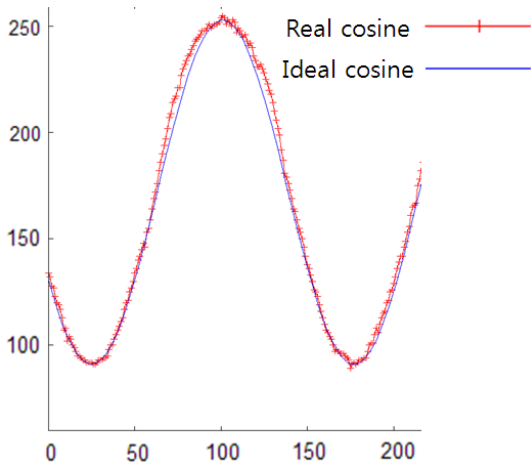


그림 5. 획득된 코사인 함수와 이상적인 코사인 함수

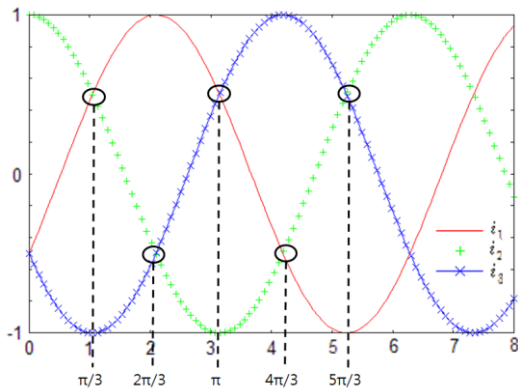


그림 6. 이상적인 코사인 함수와 교차점

그림 5 는 획득 영상에서 추출한 코사인 함수와 이상적인 코사인 함수를 한주기 정도를 비교하여 보여준다. 블룸 현상을 완화하기 위해 세 가지의 코

사인 함수가 서로 교차하는 교차점의 정보를 이용한다. 교차점은 반드시 60 도 단위로 반복되어 나타나고 이상적인 값을 쉽게 추정할 수 있다.

그림 6 은 입력 영상(input image)에 사용되는 세 가지의 이상적인 코사인 함수를 표현하고 서로 다른 두 개의 코사인 함수가 만나는 교차점을 나타낸 그림이다. 교차점이 발생하는 위상은 정해져 있다. 따라서 교차점에서의 코사인 값 또한 알 수 있고 이로 인하여 획득 영상에서 이상적인 교차점의 밝기값 역시 추정할 수 있다.

이상적인 밝기값이 추정되면 원래의 획득 영상의 밝기값을 추정된 이상적인 밝기값으로 변환하고 교차점과 피크점 사이사이의 값들은 정규화하여 재배치(remapping)한다.

$$I_j^u(x,y) = \frac{(I_j(x,y) - i_{min}) / (i_{max} - i_{min})}{(i_{max}^u - i_{min}^u) + i_{min}^u} \quad (j = 1, 2, 3)$$

재배치는 두 개의 교차점 사이마다 각각 수행된다. 수식 (3)에서 I_j 는 영상의 밝기값, i_{max} 와 i_{min} 은 두 교차점 중에서 영상의 밝기값이 각각 크고 작은 값, i_{min}^u 과 i_{max}^u 는 i_{min} 과 i_{max} 의 이상적인 밝기값이다. 그리고 I_j^u 는 재배치가 수행된 후의 밝기 값이다.

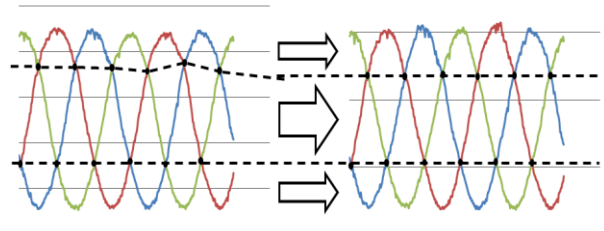


그림 7. 교차점 정보를 이용한 코사인 함수 재배치

그림 7 은 위에서 설명한 내용을 그림으로 나타낸 것이다. 좌측은 획득 영상의 세 코사인 함수를 표현하였고 우측은 재배치 후의 세 코사인 함수를 표현하였다. 그림에서 알 수 있듯이 높은 피크점과 상단의 교차점, 상단의 교차점과 하단의 교차점 그리고 하단의 교차점과 낮은 피크점 사이에서 수식 (3)에 의해 재배치되고 재배치 후에는 교차점들이 일정하게 정렬된다.

3.3 평면을 이용한 위상 보정

앞서 소개한 기술을 이용하여 획득 영상을 후처리하여 카메라-프로젝터 시스템의 광학적 오류를 보정하였다. 하지만 코사인 함수를 재배치하여 획득 영상의 패턴을 이상적인 코사인 함수에 가깝게 만들었으나 오류를 완벽하게 해결한 것은 아니다. 이것은 이상적인 코사인 함수로 피팅(fitting)한 것이

아니라 단지 정규화를 이용하여 재배치를 실시했기 때문이다. 또한 이상적인 코사인 함수로 피팅할 경우, 평면에 대한 위상은 정확하게 나오지만 물체로 인하여 왜곡된 함수의 모양마저 변형되기 때문에 적합한 방법이 아니다.

위상의 오차를 확인하기 위해 평면에 대한 획득 영상에서 계산된 위상을 주기 단위로 이상적인 위상과 비교하여 오차를 누적시켰다. 그림 8 은 누적된 오차의 평균을 표현한 것이며 그림 8 의 y 축은 위상 오차를 나타내고 x 축은 한 주기를 샘플링 (sampling) 색인(index)을 나타낸다.

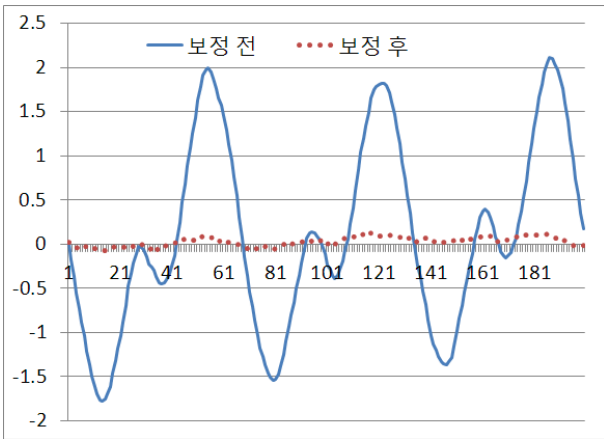
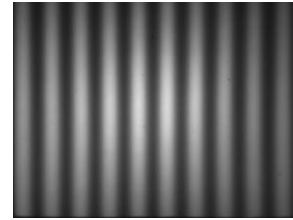


그림 8. 평면에 대한 위상의 누적 평균 오차

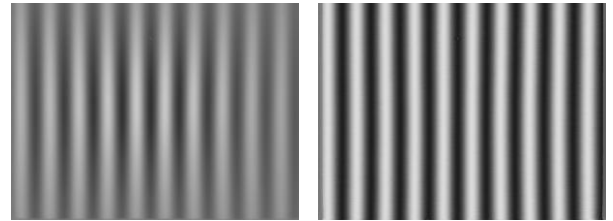
평균값을 보정하고 교차점 정보를 이용하여 획득 영상의 코사인 함수를 재배치한 후, 위상을 계산하고 그림 8 에서 보정 전의 곡선을 얻었다. 이로부터 계산된 모든 위상은 보정 전의 곡선과 같은 위상 오차를 가지고 있다고 할 수 있다. 따라서 계산된 위상에서 보정 전의 오차를 빼주어 위상 오차에 대한 보정을 실시했다. 이와 같은 방법으로 위상 오차를 보정해주고 다시 이상적인 위상과 비교하여 오차를 계산하고 평균을 구해 보정 후의 곡선을 얻을 수 있었다. 그림 8 에서 알 수 있듯이 2 도 내외의 오차를 가지던 위상이 0.1 도 안팎의 오차를 가지게 된다. 이로써 위상 오차의 평균을 이용하여 위상을 직접 보정함으로써 위상을 보정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

4. 실험 결과 및 분석

3 차원 복원 실험을 위하여 사용한 입력 영상은 8 비트 흑백 영상으로 한 주기를 102 픽셀로 하고 평균값 125 에서 진폭 75 를 가져 50~200 의 밝기 값 분포를 가진다. 입력 영상은 카메라와 프로젝터 사이의 FOV(Field Of View)를 고려하여 호모그래피를 이용하여 변환하였고 변환된 영상을 투영 영상 (projection image)으로 사용하였다.



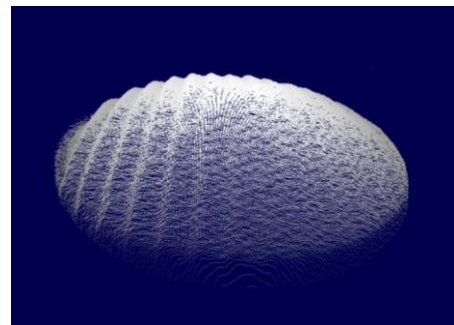
(a) Captured image



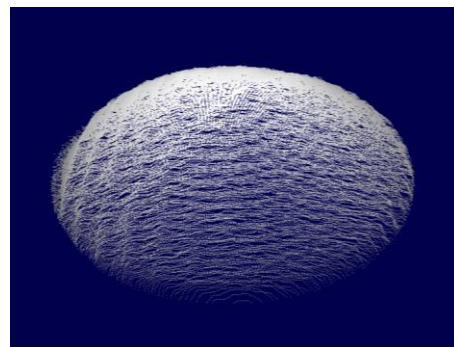
(b) After average correction (c) After cosine function remapping

그림 9. 획득 영상과 보정 결과 영상

투영 영상을 프로젝터를 통하여 물체의 표면에 투영하고 카메라로 캡처하여 획득 영상을 얻었다. 획득 영상은 평균값 보정을 실시하여 새로운 평균값의 획득 영상이 된다. 이어서 교차점 정보를 이용하여 코사인 함수를 재배치하였다. 그림 9 는 깨끗한 A4 용지를 평면에 붙여 실험을 실시하여 얻은 보정된 영상들을 나타낸다.



(a) Before correction



(b) After correction

그림 10. 바둑알 3 차원 복원 결과

그림 10 은 바둑알을 대상으로 실험하여 3 차원 복원까지 실시한 결과이다. 보정을 실시한 복원 결

과인 그림 10(b)를 보면 바둑알 표면의 오류가 줄어들었으며 상단의 곡면에서도 오류가 거의 보이지 않는다는 것을 알 수 있다.

수치적인 비교를 위하여 NextEngine 의 개인용 데스크탑 3 차원 스캐너를 이용하여 바둑알을 스캔하였고 스캔 결과를 비교 대상으로 사용하였다. 참고로 이 3 차원 스캐너는 라인 레이저 방식의 스캐너로 129×96 mm의 측정영역을 대상으로 최대 16points/mm의 해상도와 0.13 mm의 정밀도를 가진다. 3 차원 스캐너를 통하여 얻은 비교 대상과 보정 전과 모든 보정이 완료된 후의 결과를 비교하기 위하여 먼저, 3 차원 정합 알고리즘인 ICP(Iterative Closest Point) 알고리즘[6]을 이용하여 보정 전과 후의 결과를 비교 대상과 각각 정합하였다. 그리고 가장 가까운 점들 사이의 거리를 구하여 오류를 측정하였다. 측정된 오류는 표 1 과 같다.

표 1. 3 차원 복원 오류(mm)

	보정 전	보정 후
최대값	0.345807	0.273591
평균값	0.083105	0.068511
R. M. S.	0.106186	0.084686
표준 편차	0.066099	0.049779

그림 11 은 비교 대상과 보정 전, 후의 복원 결과에서 곡면의 y 축과 평행한 단면을 선택하여 2 차원으로 표현한 것이다. 그림 11 의 x 축은 복원 결과에서 단면의 진행 방향인 y 축을 의미하고 y 축은 복원 결과의 z 축을 의미한다. 데이터는 비교 대상의 복원 결과에서 특정 x 축 값을 선택하여 좌표의 x 축 값이 가까운 좌표들을 획득하고 획득된 좌표에서 가장 가까운 좌표들을 보정 전과 후의 복원 결과에서 각각 획득하여 같은 x 축 값을 가진다고 가정하여 사용하였다.

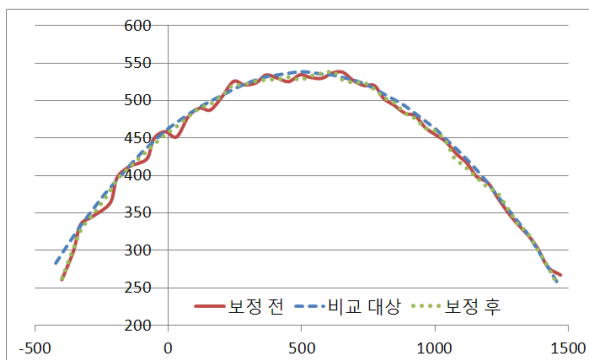


그림 11. 바둑알 복원 결과의 수직 단면 (단위 10 μm)

5. 결론

본 논문에서는 구조광 기반의 기술 중 TSPS 알고리즘을 사용하여 휴대 가능한 초소형 3 차원 복원 시스템을 구현하였다. 구현된 시스템은 40 μm내외의 해상도를 가지고 있으며 또한 3 차원 복원 시 발생하는 오류를 최소화하는 기술을 제안하였다. 제안한 기술은 획득 영상에서의 평균값을 보정하고 세 가지 서로 다른 위상의 코사인 함수가 가지는 교차점의 성질을 이용하여 코사인 함수를 재배치하였다. 그리고 평면에서 나타나는 위상을 바탕으로 위상을 직접적으로 보정하였다. 보정 후 실시한 3 차원 복원의 결과는 보정 전에 비해서 작은 오류를 가지며 실험을 통하여 그 사실을 확인하였다.

감사의 글

감사의 글은 2-3 줄로 짧게 기술하기 바랍니다.

참고문헌

- [1] 박순용, 박고광, Lei Zhang, “ 구조광 방식 3 차원 복원을 위한 간편한 프로젝터-카메라 보정 기술,” 정보처리학회 논문지, 제 17-B 권, 제 3 호, 215-226 쪽, 2010 년 6 월
- [2] P. S. Huang, C. Zhang, F. P. Chiang, "High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection," Opt. Eng., Vol. 42, no. 1, pp. 163-168, 2003.
- [3] P. S. Huang and S. Zhang, "Fast three-step phase-shifting algorithm," Appl. Opt. Vol. 45, pp. 5086-5091, July, 2006.
- [4] 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.
- [5] S. Zhang and S. T. Yau, "Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector," Appl. Opt., Vol 46, no. 1, pp 36-43, 2007.
- [6] P. J. Besl and Neil 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.