

초소형 카메라-프로젝터 시스템의 응답 함수와 비네팅 보정

박고광⁰, 박순용

경북대학교 컴퓨터공학과

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

요 약

구조광을 이용한 3차원 복원 기술에 카메라-프로젝터 시스템이 많이 사용되고 있다. 카메라-프로젝터 시스템에서 기하학적인 관계를 안다면, 프로젝트로 투사한 구조광을 카메라를 통해 획득하고 그 영상을 분석하여 3차원 정보를 얻을 수 있다. 그러나 초소형의 카메라와 프로젝터를 사용하여 가깝고 좁은 공간에서 영상을 얻고자 하면, 좋지 않은 광학적 특성으로 인하여 원치 않는 결과를 얻게 된다. 본 논문에서는 프로젝트-카메라의 응답 함수와 비네팅 보정 기술을 제안한다. 우선 카메라의 응답 함수와 비네팅을 영상처리로 보정하고 프로젝트의 응답 함수는 센서를 사용하여 보정하였다. 그리고 보정된 카메라를 이용하여 프로젝트의 비네팅을 보정하였다. 카메라-프로젝터 시스템의 보정 결과를 실험에서 보여주고 개선된 위상기반 구조광을 획득하였다.

1. 서론

구조광을 이용한 3차원 복원에 대하여 이미 많은 연구자들이 다양한 연구를 진행해왔다. 구조광이란 것은 특정한 패턴을 가지는 빛을 말한다. 이 패턴을 바탕으로 영상을 분석하여 물체의 3차원 정보를 얻을 수가 있다. 구조광 기술을 이용하기 위하여 주로 카메라와 프로젝트가 많이 쓰인다. 구조광을 프로젝트로 투사하고, 그 장면을 카메라를 통하여 획득하고, 획득된 영상을 프로젝트와 카메라 간의 기하학적인 관계를 이용하여 3차원 정보를 얻을 수 있다.

기존의 연구들은 고성능의 카메라와 프로젝터를 이용하거나 충분한 거리와 공간에서 수행되었다. 하지만 초소형의 카메라와 프로젝터를 이용하여 근거리의 좁은 공간에서 구조광을 이용하여 3차원의 정보를 얻기란 쉽지 않은 일이다. 카메라 또는 프로젝트의 크기가 작을수록 광학적 특성이 떨어진다. 예를 들어, 균일한 밝기를 가지는 영상을 프로젝트로 투사하고 그 장면을 카메라로 획득하게 되면 카메라와 프로젝트의 렌즈 특성으로 인하여 중심부와 주변부의 밝기가 서로 다른 현상이 발생하게 된다. 이러한 현상을 ‘비네팅(vignetting)’ 이라고 한다.

W. Yu[1]가 정리한 바에 의하면 비네팅 현상을 극복하기 위한 방법은 크게 두 가지로 분류 될 수 있다. 첫 번째는 비네팅 정도를 픽셀 단위로 모두 저장하고 이 정보를 그대로 이용하여 보정하는 LUT (Look Up Table) 방식이다. 두 번째로는 비네팅 정도를 획득한 후, 이 값들을 하나의 비선형

함수로 변환하고 이 함수를 이용하여 보정하는 함수 근사 방식이다. LUT 방식은 정확도가 높지만 픽셀단위의 많은 정보를 저장해야 하는 단점이 있으며, 함수 근사 방식은 그에 반대되는 특성을 가지고 있다.

한편, 비네팅의 보정은 빛에 대한 영상의 밝기 변화율이 선형적이라는 것을 전제로 한다. 하지만 카메라와 프로젝트는 사람의 눈과 같은 동적 특성을 얻기 위하여 특유의 비선형적인 변환 함수가 내제되어 있다. 이 비선형 함수를 ‘응답 함수(response function)’라고 한다. 이 응답 함수를 보정하여 영상의 밝기 변화를 선형적인 빛의 변화로 만들어야 비네팅의 정도를 얻어 낼 수 있다. 그리고 이러한 응답 함수는 HDR(High Dynamic Range) 영상을 구할 때 많이 사용된다.

P. E. Debevec 등[2]과 S. Mann 등[3]은 HDR 영상을 구하기 위하여 카메라 응답 함수를 구하였다. 같은 장면을 노출을 서로 달리하여 카메라로 획득하고 이때 사용된 노출값의 비를 카메라로 들어온 빛의 양 차이의 비와 같다고 보고 밝기 값에 대한 빛의 양을 구해냄으로써 응답 함수를 구하였다.

응답 함수와 비네팅을 포함한 카메라의 모델을 수식으로 정립하여 함께 보정하는 방법도 있다. A. Litvinov 등[4]은 응답 함수에 증폭 값과 비네팅 함수를 곱하여 카메라의 모델을 정의하고 최소자승법을 통해 응답 함수와 비네팅 함수를 함께 구하였다. D. B Goldman 등[5]도 비슷한 방법을 사용하였으나 차이점은 증폭 값이 아니라 카메라 센서의 노

출 시간을 사용했으며 반복적인 계산을 통하여 원하는 값을 얻어 냈다.

앞서 설명한 바와 같이 일반적인 카메라-프로젝터 시스템과는 다르게 초소형의 시스템의 경우 근거리의 좁은 공간을 사용한다. 일반적으로는 프로젝터의 비네팅 현상은 무시할만한 수준이지만 초소형 시스템의 경우 프로젝터의 비네팅 현상으로 인한 밝기 차이가 짧은 거리 안에서 반사를 통하여 카메라로 획득하는 영상에 치명적인 오류를 유발시킨다.

본 논문에서는 컴퓨터그래프를 이용하여 카메라의 응답 함수를 구하고, 선형적인 밝기 변화상에서 비네팅을 보정한다. 프로젝터의 응답 함수는 프로젝터의 밝기 변화를 조도계와 같은 센서를 이용하여 측정하고, 응답 함수를 보정하여 밝기 변화를 선형적으로 만든다. 그리고 이미 보정이 완료된 카메라를 이용하여 선형적인 밝기 변화를 가지게 된 프로젝터의 비네팅을 보정한다.

2. 카메라-프로젝터 보정

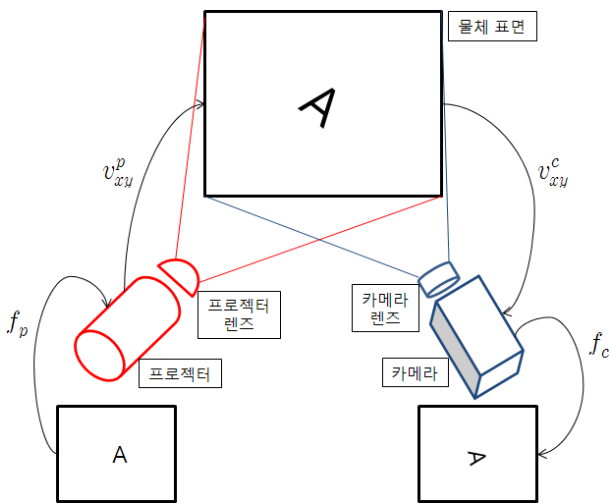


그림 1. 카메라-프로젝터 시스템

그림 1과 같이 카메라-프로젝터 시스템의 구성을 전체적으로 살펴보면 사용자가 프로젝터를 통해 구조광을 투사할 때 입력된 밝기 값은 프로젝터의 응답 함수 f_p 를 거쳐 투사하는 빛의 세기가 결정되고, 이 빛은 프로젝터의 렌즈의 특성인 비네팅 v_{xy}^p 통하여 물체의 표면에 투사된다. 이 장면은 카메라의 렌즈를 통하여 비네팅 v_{xy}^c 를 거쳐 카메라 센서에 빛이 들어오고 이 빛들은 카메라의 응답 함수 f_c 를 거쳐 영상이 된다. 시스템에서 각 현상들이 서로 연관되어 얽혀있지만 하나씩 풀어 최종적으로 두 장치의 비네팅 현상을 보정하고자 한다.

2.1 카메라의 응답 함수 및 비네팅 보정

이상적인 카메라의 경우, 노출시간을 달리하여 영상들을 획득 할 경우 카메라에 들어오는 빛의 양의 차이 비율과 노출시간 차이의 비율은 같다. 이 점을 이용하면 하나의 영상을 기준으로 다른 영상의 빛의 양에 노출시간 차이의 비를 곱하게 되면 같은 위치에 대해 서로의 빛의 양이 같아진다.

$$f_c(i_{ref}) = k_n f_c(i_n) \quad (1)$$

수식 (1)에서 $f_c()$ 는 카메라의 응답 함수, i_{ref} 는 기준 영상의 밝기 값, k_n 은 기준 영상과 비교 영상간의 노출시간 차이의 비, i_n 은 비교 영상의 밝기 값을 의미한다.

$$F(i_{ref}) - F(i_n) = K_n \quad (2)$$

$$\vec{AF} = \vec{K}_n \quad (3)$$

수식 (2)는 수식(1)을 log함수를 통하여 변환한 것으로 $F()$ 는 $\log f_c()$, K_n 은 $\log k_n$ 을 의미한다. 수식 (2)에서 밝기 값 0~255에 대한 항들을 벡터로 만들고, K_n 또한 밝기 값에 맞춰서 벡터화 하면 수식 (3)이 된다. 수식 (3)에서 A 는 계수로 이루어진 최소행렬이며, \vec{F} 는 $\{F(0), F(1) \dots F(255)\}$, \vec{K}_n 은 $\{K_n, K_n \dots K_n\}$ 이다.

수식 (3)에서 최소자승법을 통하여 \vec{F} 를 구해내고 역변환을 통하여 최종적으로 응답 함수 $f_c()$ 를 구해낸다.

추가적으로 얻어지는 응답 함수의 신뢰도를 높이기 위해 가중치를 두고 계산할 수도 있다. 가중치는 기준 영상과 비교 영상간의 컴퓨터그래프를 구하여 그 값의 제곱근을 이용한다. 컴퓨터그래프 (comparagram)이란 기준 영상과 비교 영상의 같은 좌표상의 영상 밝기 값들에 대한 합동 히스토그램 (joint histogram)이다. 이 가중치로 인하여 A 와 K_n 의 값들이 가중치가 곱해진 값으로 변하게 되고, 비중이 낮은 부분은 0 혹은 0에 가까운 작은 값이 되어 무시된다.

응답 함수를 구함으로써 빛에 대한 영상의 밝기 변화를 선형적으로 구해 낼 수 있다. 이 선형적인 밝기 변화를 바탕으로 비네팅 현상을 보정한다. 비네팅에 대한 보정에는 일정한 빛을 비추주는 광원이나 보정판 따위가 필요하다. 표면이 모두 같은 밝기를 가지는 보정판을 카메라로 찍게 되면 카메라의 모든 픽셀에 대하여 일정한 세기를 가지는 빛이 렌즈를 통해 카메라로 들어오지만 비네팅 현

상으로 인하여 얻어진 영상의 밝기 값들은 고르지 않게 된다. 이 영상을 참조 영상으로 사용하며, 참조 영상에서 비네팅의 정도를 알아 낼 수 있다.

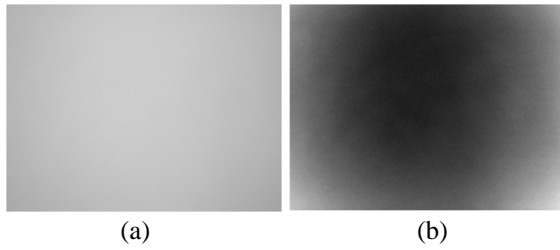


그림 2. (a)참조 영상 (b)정규화된 비네팅 정도(v_{xy}^c)

$$v_{xy}^c = i_o / i_{xy} \quad (4)$$

v_{xy}^c 는 영상의 (x,y) 지점에서의 비네팅 정도를 나타내고, i_o 는 비네팅이 없는 영상의 밝기 값, 그리고 i_{xy} 는 영상의 (x,y) 지점에서의 밝기 값이다. i_o 는 비네팅이 없는 영상의 중심부의 값이나 밝은 점의 값을 이용한다. 그림 2 (a)의 영상에서 밝은 부분의 점을 i_o 로 이용하고 수식 (4)를 이용하면 그림 2 (b)와 같은 v_{xy}^c 를 구할 수 있다.

비네팅의 보정은 LUT방식으로 비네팅의 정도 v_{xy} 를 각 픽셀 단위로 모두 저장하고, 이것을 이용하여 수식 (5)와 같이 비네팅 현상을 보정한다.

$$i'_{xy} = i_{xy} \times v_{xy} \quad (5)$$

2.2 프로젝터의 응답 함수 및 비네팅 보정

프로젝터는 원하는 영상을 빛으로 투사하여 특정 표면에 상을 맺어 사람의 눈에 보이게끔 하는 장치이기 때문에 카메라와는 달리 영상의 분석으로는 보정할 수 없다. 그렇기 때문에 프로젝터를 보정해 주기 위해서는 카메라 혹은 조도계와 같은 다른 장치가 필요하다.

프로젝터의 밝기값을 일정한 간격으로 변화시키며 투사하고 그 값을 측정할 수 있는 센서를 이용하여 비네팅이 없는 혹은 없다고 가정하는 중심부에서 그 값을 측정한다. 투사한 영상의 밝기 값과 측정된 값의 관계는 불연속적인 응답 함수를 의미하게 되고 이를 정규화하여 프로젝터의 밝기 변화를 비선형적인 것에서 선형적인 것으로 변환 할 수 있다.

프로젝터의 비네팅 보정을 위하여 고정되어 있으며 기하학적인 관계를 알고 있는 카메라를 사용한다. 카메라와 프로젝터사이의 호모그래피 관계는 이미 알고 있으며, 카메라는 비네팅 현상의 보정이 완료된 상태이고 다른 왜곡이 없는 영상 센서로 가

정한다. 흰색의 깨끗한 표면위에 똑같은 밝기값으로 만들어진 영상을 투사하고, 이 장면을 카메라로 획득한다. 이렇게 얻어진 영상을 카메라와 같은 방법으로 수식 (4)를 이용하여 프로젝터의 비네팅 정도를 알아낸다. 이때, 만약 프로젝터가 최고의 밝기값으로 투사하고 있다면 주변부가 어둡다고 할지라도 더 밝게 만들 수 없다. 그래서 카메라는 중심의 비네팅이 없는 부분을 기준으로 어두운 부분을 보정하는데 반해 프로젝터는 비네팅이 심한 어두운 부분을 기준으로 다른 밝은 부분을 어둡게 만들어 전체적으로 균일한 밝기값을 가질 수 있도록 한다. 즉, i_o 를 영상 중심부의 밝은 부분의 값이 아니라 주변부의 어두운 값으로 대체하여 프로젝터의 비네팅 정도를 구한다. 이렇게 구해진 비네팅 정도는 프로젝터의 좌표가 아닌 카메라의 좌표로 되어 있기 때문에 호모그래피 관계를 이용하여 프로젝터의 좌표로 변환하고 수식 (5)를 이용하면 프로젝터의 비네팅 보정이 완료된다.

3. 실험 결과 및 분석

실험에는 그림 3과 같이 1024x768의 해상도를 가지는 초소형 프로젝터와 1394a 흑백 카메라를 사용하였다.

3.1 카메라 보정 결과

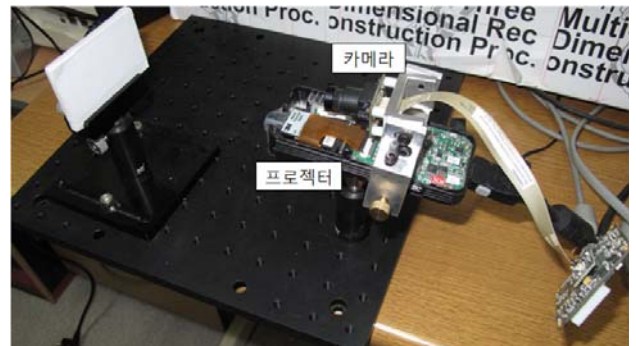


그림 3. 카메라-프로젝터 실험장치

먼저, 카메라의 노출 시간을 2배로 늘려가며 같은 장소를 촬영하여 컴패러그램을 구하였다.

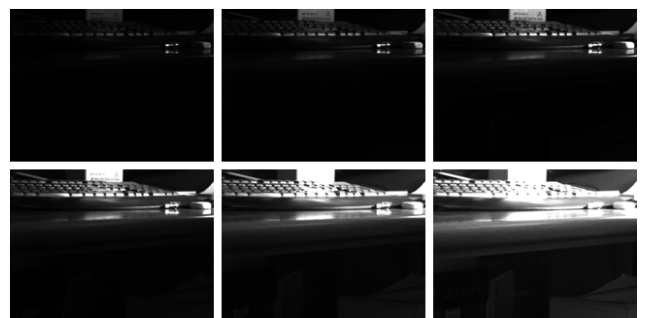


그림 4. 컴패러그램을 구하기 위한 영상들

그림 4는 좌측 상단에서부터 노출 시간을 2배씩 늘려가며 촬영한 영상들이다. 그림 4의 영상들을 이용하여 그림 5 (a)와 같은 컴패러그램을 얻어 내었다.

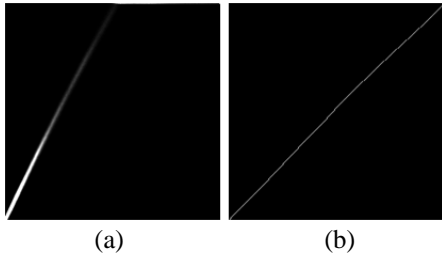


그림 5. (a)컴패러그램 (b)카메라 응답 함수

실험에 사용된 카메라의 경우 카메라 응답 함수가 그림 5 (b)와 같이 거의 직선에 가까운 형태로 나타났다. 그래서 보정 없이 그대로 사용하였다.

다음으로 균일한 흰색을 가진 판을 카메라로 찍어 그림 2. (a) 참조 영상을 얻고 참조 영상에서 수식 (4)를 이용하여 그림 2. (b)와 같은 비네팅 정도를 얻어 내었다. 이를 이용하여 비네팅을 보정하였다.

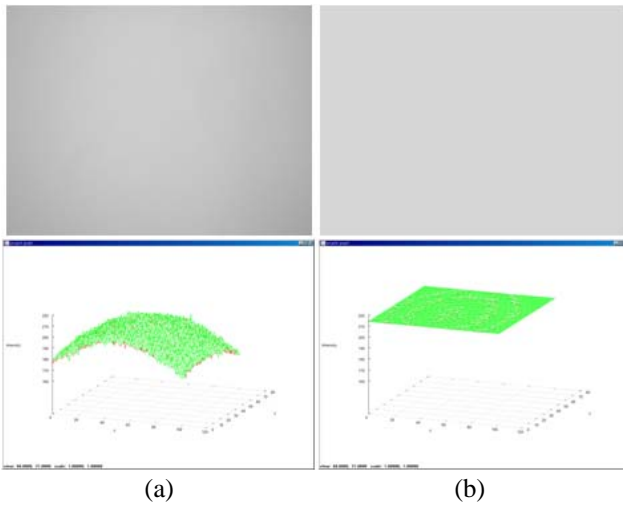


그림 6. 카메라의 비네팅 보정 결과
(a)보정 전 (b)보정 후

그림 6은 보정 전, 후의 영상과 그 밝기 값을 그래프로 출력한 영상이다. 그림 6 (b)에서 보정 전보다 밝기 값이 매우 균일하다는 것을 알 수 있다.

3.2 프로젝터 보정 결과

프로젝터의 응답 함수를 구하기 위하여 그림 7과 같이 디지털 조도계를 사용하였다. 이 조도계는 1~100000 lux의 측정 범위를 가지고 있다.

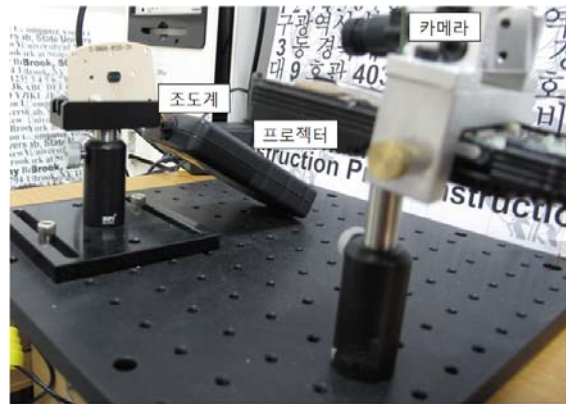


그림 7. 카메라-프로젝터 실험장치와 조도계

프로젝터가 투사하는 장면의 중심부에 조도계 센서를 놓고 빛의 강도를 밝기 값 10 단위로 측정하여 그림 8 (a)와 같이 프로젝터의 응답 함수를 구하였다. 그리고 측정된 값을 0 ~ 255로 정규화하고 정수단위로 그에 해당하는 밝기 값을 역으로 찾아내어 그림 8 (b)와 같은 변환표를 만들었다. 이때, 10 보다 낮은 단위의 값들은 보간을 통하여 얻어 내었다.

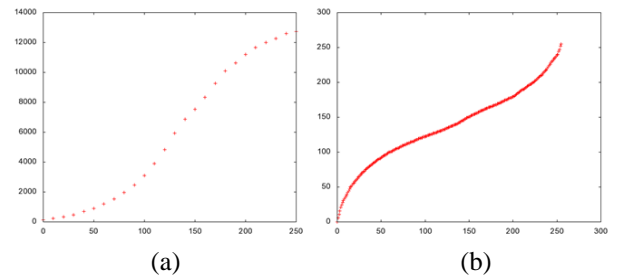


그림 8. (a)프로젝터 응답 함수(f_p) (b)변환표

얻어진 변환표로 0 ~ 255의 밝기 값을 변환하여 10단위로 투사하고 조도계로 측정하면 그림 9와 같이 프로젝터 응답 함수가 선형적으로 보정되었다는 것을 알 수 있었다.

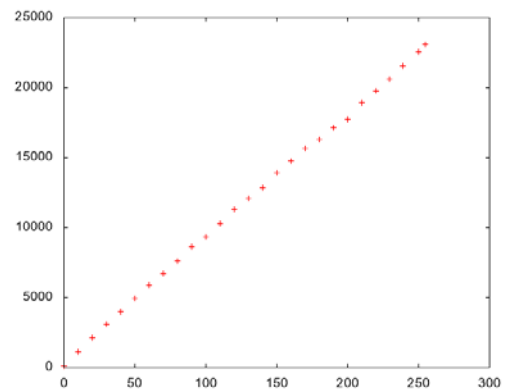


그림 9. 보정 후 프로젝터 응답 함수(f_p')

프로젝터의 비네팅 정도를 알아내기 위하여 먼저 균일한 흰색의 판에 균일한 밝기를 가진 영상을 프로젝터로 투사하고 그 장면을 카메라를 통하여 영상으로 얻어내었다. 얻어진 영상에서 먼저 카메라의 비네팅 현상을 보정하여 그림 10 (a)와 같은 영상을 얻었고, 이 영상에서 프로젝터의 비네팅 정도를 얻어내었다. 얻어진 비네팅 정도를 균일한 밝기를 가진 영상에 적용시켜 그림 10 (b)와 같은 영상을 얻었다. 이 영상을 프로젝터로 투사하기 전 응답 함수에 대한 보정으로 변환표를 이용하여 밝기 값을 변환하여 그림 11 (a)와 같은 영상을 얻었다. 마지막으로 호모그래피 관계를 이용하여 그림 11 (b)와 같이 프로젝터의 좌표에 맞는 영상을 만들고 프로젝터로 투사하였다.

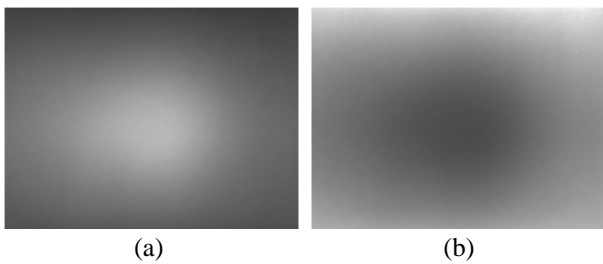


그림 10. (a)프로젝터 비네팅 보정 전 영상
(b) 균일한 밝기에 비네팅 정도가 곱해진 영상

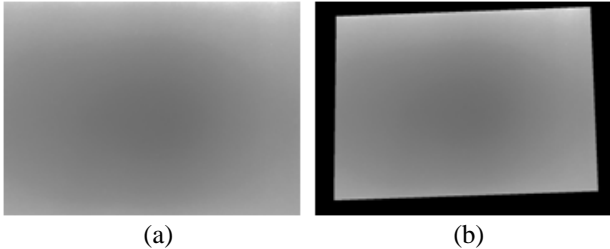


그림 11. (a)그림 10 (b) 영상을 변환표로 변환한 영상
(b)프로젝터의 좌표로 변환한 영상

그림 11 (b)영상을 프로젝터로 투사하고, 그 장면을 카메라로 획득하여 영상을 만들고 그 영상의 카메라 비네팅을 보정하여 프로젝터의 비네팅 보정 결과를 확인하였다. 그 결과는 그림 12 (b)와 같이 균일한 밝기 값을 가진 다는 것을 알 수 있었다.

구조광 기술 중 한 예로 페이즈(phase) 기반의 사인(sine) 패턴[9]을 만들어 평면에 대하여 보정 전과 보정 후 각각의 결과를 얻어 보았다. 그림 13 (a)에서 알 수 있듯이 보정 전의 경우, 왜곡이 발생하였고, 그림 13 (b)와 같이 보정 후의 경우, 보정 전에 비해 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

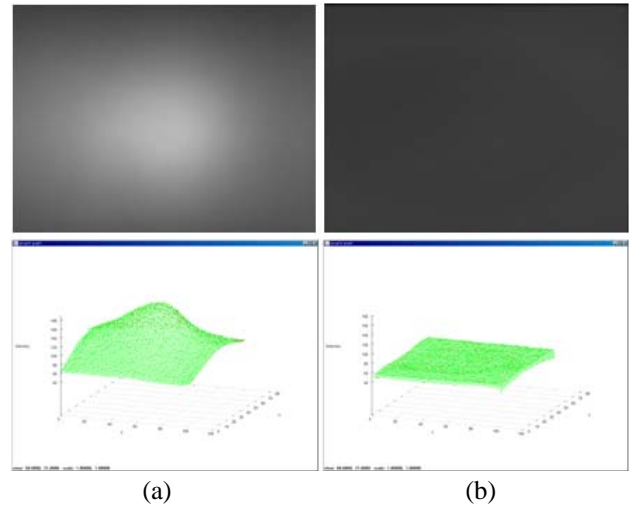


그림 12. 프로젝터의 비네팅 보정 결과
(a)보정 전 (b)보정 후

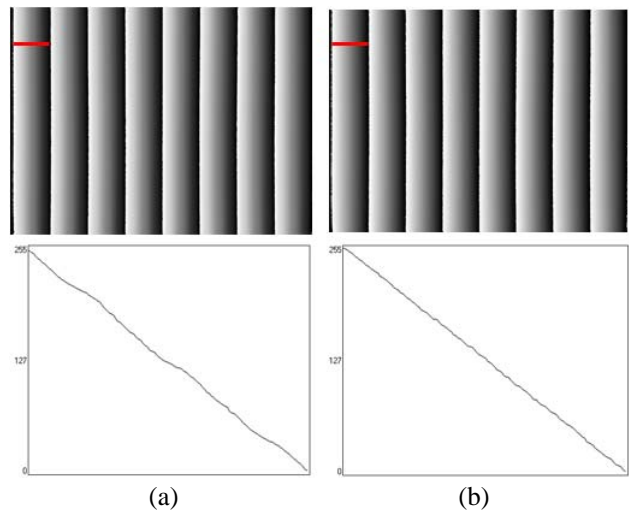


그림 13. 평면에 대한 Phase shift 알고리즘 결과
(a)보정 전 (b)보정 후

4. 결론

초소형의 카메라-프로젝터 시스템에서는 관찰 공간이 가깝고 좁다. 그로 인하여 보통의 경우와는 달리 비네팅 현상으로 인해 생기는 문제들이 무시할 수 없는 커다란 걸림돌이 된다. 이러한 비네팅 현상에 대해 카메라뿐만 아니라 프로젝터 또한 보정하고자 제안하였으며, 제안한 방법을 통해 보정 전에 비하여 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 / 한국산업기술진흥원 융복합로봇전문인력양성사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] Wonpil Yu, "Practical Anti-vignetting Methods for Digital Cameras," IEEE Trans. on Consumer Electronics, vol. 50, no. 4, pp.975-983, 2004.
- [2] Paul E. Debevec, Jitendra Malik, "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs," SIGGRAPH, 1997.
- [3] Steve Mann, Richard Mann, "Quantigraphic Imaging: Estimating the camera response and exposures from differently exposed images," Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.842-849, 2001.
- [4] Anatoly Litvinov, Yoav Y. Schechner, "Addressing Radiometric Nonidealities: A Unified Framework," Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, vol. II, pp.52-59, 2005.
- [5] Dan B Goldman, Jiun-Hung Chen, "Vignette and Exposure Calibration and Compensation," Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision, pp.899-906, 2005.
- [6] Rahul Sukthankar, Robert G. Stockton, Matthew D. Mullin, "Smarter Presentations: Exploiting Homography in Camera-Projector Systems," Proceedings of International Conference on Computer Vision, vol. 1, pp.247-253, 2001.
- [7] Ramesh Raskar, Paul Beardsley, "A Self Correcting Projector," In IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, pp.626-631, 2001
- [8] 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, 2003.
- [9] Peisen S. Huang, Song Zhang, "Fast three-step phase-shifting algorithm," Appl. Opt. vol. 45, Issue 21, pp.5086-5091, 2006.