

일반논문 (Regular Paper)

방송공학회논문지 제24권 제2호, 2019년 3월 (JBE Vol. 24, No. 2, March 2019)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2019.24.2.281>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

단일 카메라를 이용한 3D 깊이 추정 방법

김 승 기^{a)}, 고 영 민^{a)}, 배 철 균^{a)}, 김 대 진^{a)}†

3D Depth Estimation by a Single Camera

Seunggi Kim^{a)}, Young Min Ko^{a)}, Chulkyun Bae^{a)}, and Dae Jin Kim^{a)}†

요 약

3D 카메라 기술 중에서 초점의 흐려짐을 이용한 깊이 추정은 카메라의 초점거리 평면의 물체는 선명한 상이 맷히지만 카메라의 초점거리 평면으로부터 멀어진 물체는 흐린 영상을 만들어낸다는 현상을 이용해 3D 깊이를 추정한다. 본 논문에서는 단일 카메라를 이용하여 촬영한 영상의 흐림 정도를 분석하여 3D 깊이를 추정하는 알고리즘을 연구하였다. 단일 카메라의 1 개의 영상 또는 단일 카메라의 초점이 서로 다른 2 개의 영상을 사용하여 초점의 흐려짐을 이용한 3D 깊이를 추정하는 방법을 통해 최적화된 피사체 범위를 도출하였다. 1 개의 영상을 이용한 깊이 추정에서는 스마트폰 카메라와 DSLR 카메라 모두 250 mm의 초점거리를 사용하는 것이 가장 좋은 성능을 보였다. 2개의 영상을 이용한 깊이 추정에서는 스마트폰 카메라 영상은 150 mm와 250 mm로 그리고 DSLR 카메라 영상은 200 mm와 300 mm로 초점거리를 설정하였을 때 가장 좋은 3D 깊이 추정 유효 범위를 갖는 것으로 나타났다.

Abstract

Depth from defocus estimates the 3D depth by using a phenomenon in which the object in the focal plane of the camera forms a clear image but the object away from the focal plane produces a blurred image. In this paper, algorithms are studied to estimate 3D depth by analyzing the degree of blur of the image taken with a single camera. The optimized object range was obtained by 3D depth estimation derived from depth from defocus using one image of a single camera or two images of different focus of a single camera. For depth estimation using one image, the best performance was achieved using a focal length of 250 mm for both smartphone and DSLR cameras. The depth estimation using two images showed the best 3D depth estimation range when the focal length was set to 150 mm and 250 mm for smartphone camera images and 200 mm and 300 mm for DSLR camera images.

Keyword : Depth from Defocus, Focus Distance of Camera, 3D Depth Estimation, Depth Camera

a) 전남대학교 전자컴퓨터공학과(Dept. of Electronics and Computer Engineering, Chonnam National University)

† Corresponding Author : 김대진(Dae Jin Kim)

E-mail: djinkim@jnu.ac.kr

Tel: +82-62-530-1756

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0767-2526>

※ This study was financially supported by Chonnam National University (Grant number: 2017-2864).

※ 이 논문의 연구 결과의 일부는 “2018년도 한국방송·미디어공학회 학제학술대회”에서 발표한 바 있음.

· Manuscript received September 4, 2018; Revised February 18, 2019 ; Accepted February 22, 2019.

I. 서 론

현재 광범위하게 사용되는 디지털 카메라는 필름 없이 전자 이미지 센서를 이용하여 영상을 감지하고 그 영상 정보를 디지털 영상 파일 형식이나 디지털 동영상 파일 형식으로 저장한다^[1]. 디지털 카메라는 VR(Virtual Reality)과 AR(Augmented Reality)의 등장과 함께 3D 깊이 추정이 가능하도록 발전하였다. 3D 카메라는 카메라와 물체 사이의 깊이 정보를 얻을 수 있다. 즉 3D 카메라를 이용하면 xy-평면으로 나타나는 영상 대신 xyz-공간의 3차원 정보를 획득할 수 있다. 현재 3D 카메라 기술로는 스테레오 카메라를 이용한 방법, 구조광을 이용한 방법, 비행시간(ToF; Time of Flight)을 이용한 방법, 그리고 초점의 흐려짐을 이용한 깊이 추정(DFD; Depth from Defocus)를 이용한 방법들이 활발하게 연구되고 있다. 스테레오 카메라, 구조광 방법, 비행시간 방법을 사용한 3D 카메라는 모두 한 개의 디지털 카메라 외에 깊이를 측정할 수 있도록 추가적인 장치가 필요하다. 이는 3D 카메라의 물리적 크기가 커지고 단가가 상승할 수 있다는 단점을 가진다.

최근 많은 연구가 진행되고 있는 DFD 방법을 이용한 3D 깊이 추정은 단일 디지털 카메라를 통해 얻은 영상만을 이용한다. 따라서 DSLR 카메라나 스마트폰을 이용한 영상으로도 3D 깊이 추정이 가능하다. DFD는 카메라의 초점거리 평면의 물체는 선명한 상이 맷히지만, 카메라의 초점거리 평면으로부터 멀어질수록 물체가 점점 더 흐리게 보이는 현상을 이용하여 3D 거리를 추정한다^{[2][3]}. 본 논문에서는 DFD의 성능을 향상시키는 방법을 연구한다.

DFD 알고리즘은 물체의 경계 부분에서 깊이 정도를 검출하기 때문에, 가장 먼저 영상에서 물체의 경계를 추출해야 한다. 경계를 추출할 때 설정하는 문턱값에 따라 추출되는 경계가 다르게 나타난다. 문턱값이 너무 낮거나 높은 경우 DFD를 통한 3D 거리 추정에 오류가 생길 수 있다. 영상의 종류에 따라 적절한 경계 추출 문턱값이 달라질 수 있는데, 본 연구에서는 100 mm부터 2,000 mm까지의 물체를 테스트 영상으로 사용하였다. 테스트 영상에서 DFD를 이용한 3D 거리 추정에 적절한 경계 추출 문턱값을 찾을 수 있도록 다양한 영상에서 문턱값을 다르게 설정하여 실험을 진행함으로써 적정한 문턱값을 도출하여 사용하였다.

카메라의 초점거리는 카메라와 초점이 맞은 피사체 사이의 거리를 나타낸다^[4]. 카메라의 초점거리에 따라 흐림 정도와 영상의 피사계 심도가 달라지기 때문에 DFD 성능에 영향을 준다. 모든 물체가 초점거리보다 멀리 위치하도록 초점을 가깝게 설정하면, 물체의 거리가 멀어질수록 흐림 정도가 커진다. 그러나 먼 거리의 물체는 흐림 정도의 변화가 적어서 추정된 3D 거리에 오차가 커진다. 초점을 멀리하게 되면 먼 거리의 물체는 깊이 추정이 잘 되지만, 초점보다 가깝게 위치한 물체는 추정된 3D 거리에 오차가 생긴다. 본 논문에서는 1개의 영상을 이용한 DFD 깊이 추정과 2개의 영상을 이용한 DFD 깊이 추정 방식을 연구하였다. 두 가지 방식에 대하여 카메라의 초점을 변화시키면서 실험을 진행하여 3D 거리 추정의 유효 범위를 측정하여 최적의 카메라 초점거리를 도출하였다.

II. 3D 깊이 추정 방법

1. 초점의 흐려짐을 이용한 깊이 추정

[그림 1]은 카메라에서 상이 맷히는 기하학적 구조를 나타낸다. 물체로부터 방사된 빛은 렌즈에 의해 굽절되어 초점면의 점 I_f 에 모아진다. 렌즈의 초점이 F 인 얇은 렌즈를 갖는 카메라의 경우 렌즈로부터 초점이 맞는 물체 평면까지의 초점거리 D_{OL} 과 초점이 맞춰진 영상에서 렌즈까지의 거리 D_{LF} 간의 관계는 얇은 렌즈 법칙에 의해 식 (1)과 같이 표현된다^[5].

$$\frac{1}{D_{OL}} + \frac{1}{D_{LF}} = \frac{1}{F} \quad (1)$$

하지만 이미지 센서 평면이 초점면과 일치하지 않으면, 이미지 센서에 맷힌 상은 반지름이 R 인 원형으로 나타난다. 이때, 렌즈와 피사체 사이의 거리 D_{OL} 과 R 사이의 관계식은 식 (2)와 같다.

$$D_{OL} = \frac{FD_{LS}}{D_{LS} - F - 2fR} \quad (2)$$

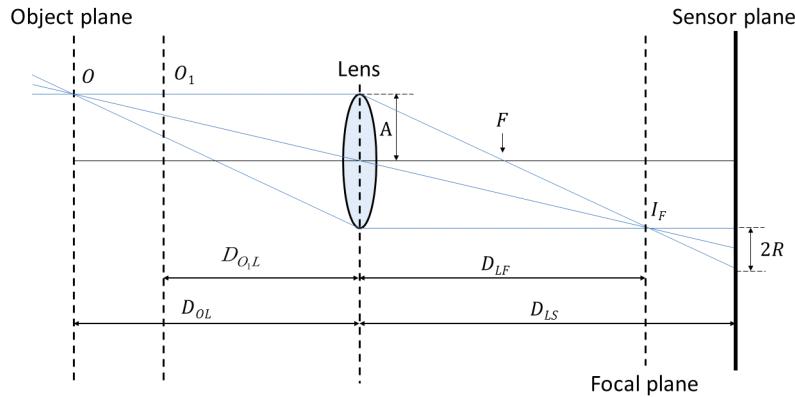


그림 1. 카메라에 상이 맺히는 기하학적 구조
 Fig. 1. The geometric structure of a camera

따라서 영상에서 피사체의 흐림 정도를 분석하면 카메라와 피사체 사이의 거리를 추정할 수 있다. 여기서 f 는 카메라의 f_{number}(f-number)이며, D_{LS} 는 렌즈에서 이미지 센서까지의 고정된 깊이로써 초점길이를 나타낸다.

2. 1개의 영상을 이용한 DFD

초점의 흐려짐을 이용한 깊이 추정에 사용하는 영상 $i(x)$ 는 선명한 영상 $f(x)$ 와 점 확산 함수의 컨벌루션으로 모델링된다. 이때 점 확산 함수가 가우시안 함수로 모델링 된다.

$$i(x) = f(x) \otimes g(x, \sigma) \quad (3)$$

여기서 $g(x, \sigma)$ 는 표준 편차 σ 를 갖는 가우시안 함수이다.

물체의 경계가 아닌 표면에서는 흐림 정도의 크기를 계산하기 어렵기 때문에, 영상에서 물체의 경계를 추출해야 한다. 초점이 맞는 물체의 경계는 경계면에서 흐림 효과가 전혀 없어서 선명한 계단함수 모양으로 모델링되지만, 초점이 맞지 않는 물체의 경계는 경계면 주변이 흐려져 [그림 2]의 첫 번째 박스와 같은 모양을 갖는다. 흐림 효과를 명확하게 만들기 위하여 추출된 경계를 가우시안 커널 σ_1 을 이용하여 더 흐려지게 만든다. 이후 기존의 흐린 경계 i 와 다시 흐려지게 한 영상의 경계 i_1 에서 미분값 ∇i , ∇i_1 을 계산하고, 각 미분값의 비율 $\nabla i / \nabla i_1$ 을 통해 흐림 정도를 추정한다^[6]. [그림 1]의 피사체 O_1 에 의해 카메라 센서에 맺힌 흐려진 원의 지름 $2R$ 은 다음과 같다.

$$2R = \frac{|D_{O_1L} - D_{OL}|}{D_{OL}} \frac{F^2}{f(D_{OL} - F)} \quad (4)$$

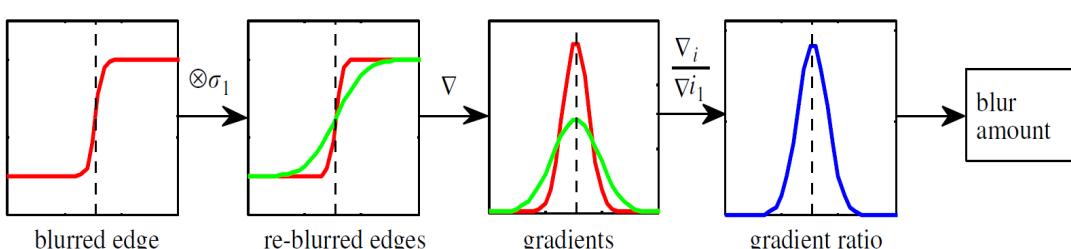


그림 2. 1개의 영상을 이용한 DFD에서 흐림 정도의 크기 계산 방법
 Fig. 2. Calculation method of blur size by using a DFD image

식 (4)를 통해 흐려진 원의 지름 $2R$ 로부터 $D_{OL} - D_{OL}$ 을 유도할 수 있어 깊이 맵을 구할 수 있다.

물체의 흐림 정도는 물체의 위치와 카메라의 초점거리에 따라 달라진다. 물체가 카메라의 초점거리 평면으로부터 멀어지면 멀어질수록, 물체는 점점 더 흐린 영상을 만들어낸다. 그런데 물체가 카메라의 초점거리 평면으로부터 카메라에 가까운 쪽으로 멀어졌는지 면 쪽으로 멀어졌는지는 구분하기 어렵다. 이 어려움을 다음 절에서 2개의 영상을 이용한 DFD 방식으로 해결하고자 한다. 카메라의 초점을 짧게 설정하면 물체가 카메라의 초점보다 멀리 있게 되므로 영상의 흐림 정도가 3D 깊이를 의미한다. 그러나 멀리 있는 물체는 흐림 정도의 변화가 적어서 3D 깊이를 구하면 오류가 크게 된다. 카메라의 초점을 길게 설정하면 멀리 있는 물체의 흐림 정도의 변화가 커져서 3D 깊이를 좀 더 정확하게 구할 수 있다. 그러나 카메라와 카메라의 초점거리 평면 사이에 위치하는 물체는 3D 깊이 정보에 심각한 오류가 생긴다.

3. 2개의 영상을 이용한 DFD

2개의 영상을 연속해서 촬영할 때 카메라의 모든 파라미터는 동일하게 설정한 후 카메라의 초점만을 조절한다. 그리고 촬영기간 동안 피사체는 움직이지 않도록 한다. 두 초점거리를 어떻게 설정하느냐에 따라 유효범위는 크게 달라

질 수 있어서 두 초점을 적절하게 설정하는 것이 중요하다. 왜냐하면 가까운 물체는 작은 초점으로 촬영한 영상에서 정확한 깊이 정보를 구할 수 있고, 멀리 있는 물체는 긴 초점으로 촬영한 영상에서 정확한 깊이 영상을 구할 수 있기 때문이다.

2개의 영상을 이용한 DFD 알고리즘은 렌즈의 초점길이 D_{LS} 와 조리개 구경 A , 두 영상에서 초점을 맞춘 거리 F_1 , F_2 를 파라미터로 사용한다. 이때 [그림 3]과 같이 똑같은 흐림 정도를 가지고 있는 서로 다른 물체의 거리를 알맞게 추정하기 위하여 2개의 영상에 서로 다른 커널을 적용하여 흐림 정도의 크기를 측정한다. 이때 두 영상은 초점거리가 다르기 때문에 같은 물체에 대해서 서로 다른 흐림 정도의 크기를 갖는다. 따라서 두 흐림 정도의 크기 비교를 통해 가까운 거리의 피사체인지 면 거리의 피사체인지 추정이 가능하다.

이 알고리즘에서 렌즈의 초점길이가 D_{LS} , 조리개의 구경이 A 이고 카메라의 초점거리 설정을 각각 F_1 , F_2 로 설정한 두 영상이 얇은 렌즈 모델을 따를 때 카메라로부터 거리 d 만큼 떨어진 물체의 흐림 정도의 크기 $r(d)$ 는 참고문헌 [7]로부터 정리하면 다음과 같이 정의된다.

$$r_n(d) = A\left(1 - \frac{F_n}{D_{LS}}\right) + AF_nd \quad n = 1, 2 \quad (5)$$

위 식 (5)은 하나의 물체에 대하여 서로 다른 두 가지의

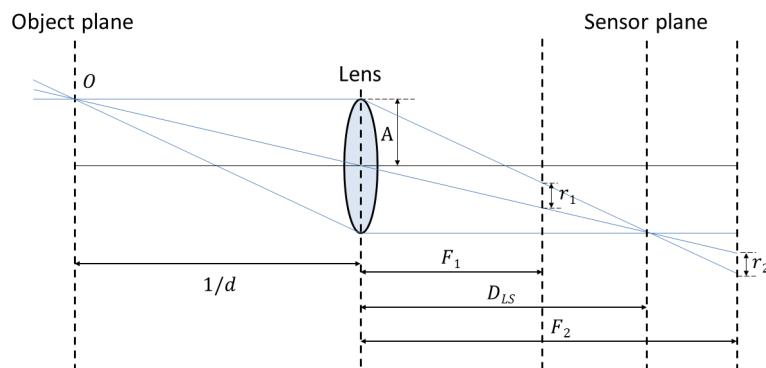


그림 3. 얇은 렌즈 모델의 기하학적 형태. 거리 d 에서 초점이 맞은 피사체는 렌즈 안쪽의 길이 D_{LS} 지점에 초점을 맞추고, 입력으로 사용하는 영상의 흐림 정도의 커널은 반지름 r_1 , r_2 를 각각 갖는다.

Fig. 3. Geometry of the thin-lens model. A scene point at depth d is in focus at distance D_{LS} behind the lens. Its blur kernel in the input images has radius r_1 and r_2 , respectively

초점에 따른 두 가지의 흐림 정도를 나타낸다. 첫 번째 초점을 깊게 설정하면 모든 물체가 초점거리보다 멀리 위치하게 되어 거리가 멀수록 물체의 흐림 정도가 크게 된다. 두 번째 초점을 깊게 설정하면 멀리있는 물체의 흐림 정도의 변화를 크게 하여 깊이 정보의 정확도를 높일 수 있다. 그래서 초점거리가 다른 두 개의 영상을 이용하면 깊이 추정의 오류를 줄이고 유효범위를 크게 할 수 있다.

III. 3D 깊이 추정을 최적화하기 위한 파라미터 설계

[그림 4]는 물체의 경계 부분의 흐림 정도의 크기를 이용한 DFD 알고리즘의 순서도를 나타낸다. 먼저 카메라를 통해 얻은 영상과 촬영에 사용된 카메라 파라미터를 입력한다. 이후 물체의 경계 부분을 찾기 위해 경계선(Edge) 검출을 수행하고, 경계선에서 흐림 정도 크기를 구한 다음 DFD를 수행하여 최종적으로 깊이 맵이 출력되는 구조를 가진다. 다초점 렌즈를 장착한 DSLR 카메라의 경우 $f\text{-값}$, 렌즈의 초점길이, 피사체와 카메라의 거리 등 다양한 파라미터

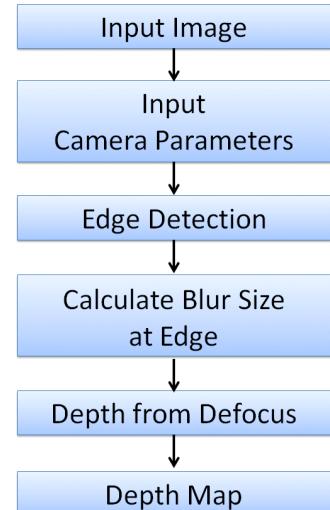


그림 4. 물체의 경계 부분에서 흐림 정도의 크기를 이용한 DFD 알고리즘 순서도

Fig. 4. Flowchart of DFD algorithm using blur size of boundary of object

를 조절함으로써 영상으로부터의 흐림 정도의 크기를 조절할 수 있다. 하지만 대부분의 스마트폰 카메라는 고정된 초점길이를 갖는 렌즈와 고정된 $f\text{-값}$ 을 사용한다. DSLR 카메

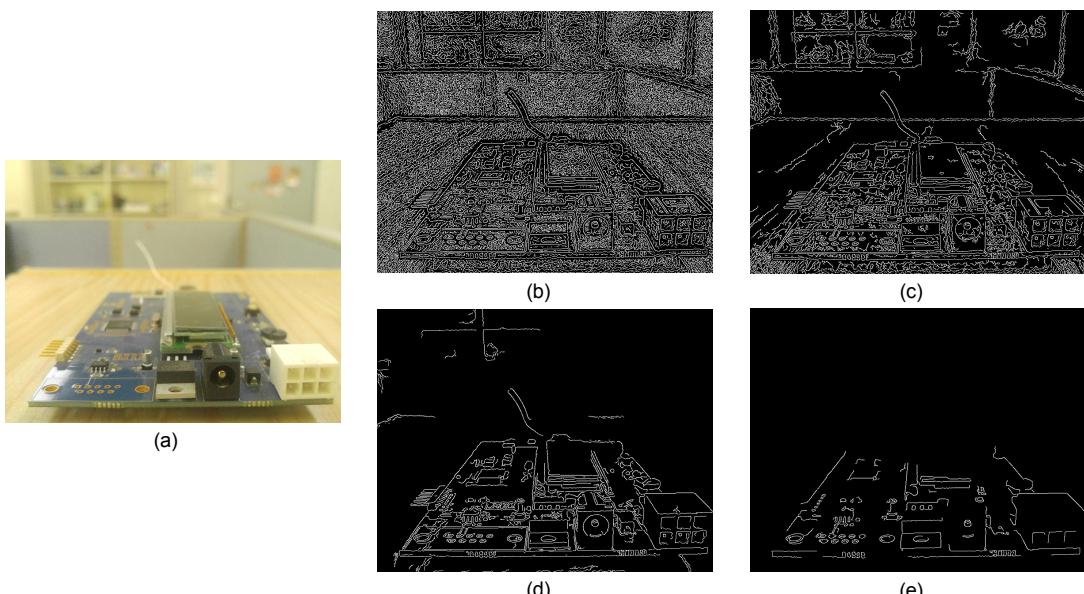


그림 5. (a) 문턱값 추출을 위한 테스트 사진, (b)-(e) 문턱값에 따라 추출된 경계, 문턱값은 (b)부터 (e)까지 각각 0.01, 0.03, 0.05, 0.07이다.

Fig. 5. (a) is test image for threshold extraction, (b)-(e) boundary images are extracted according to the threshold of 0.01, 0.03, 0.05, and 0.07, respectively

라 중에서도 단일 초점길이를 갖는 DSLR 카메라는 렌즈의 초점길이를 변경시킬 수 없다. 영상에서 흐림 정도의 크기를 변화시키는 파라미터 중 카메라의 초점은 스마트폰을 포함한 모든 카메라가 조절이 가능하다. 어느 거리에 있는 물체에 초점을 맞추는지에 따라서 영상의 흐림 정도의 크기가 달라지기 때문에 깊이 맵 추출하는데 카메라의 초점 설정이 중요하다.

3D 깊이를 구할 때 경계선을 정확히 추출하는 것이 매우 중요하며, 물체의 경계선을 추출할 때 사용하는 문턱값이 깊이 맵의 결과에 영향을 준다^[8]. 본 논문에서는 경계 검출 기법으로 오류율이 낮으며 잡음에 강한 장점이 있는 캐니 경계선 검출기(Canny Edge Detector)를 사용하였다. 깊이 맵 추출 알고리즘은 MATLAB을 기반으로 구현되었는데, MATLAB에서 캐니 경계선 검출기는 문턱값을 조정하면서 실험하는 것이 가능하다. 문턱값이 낮아질수록 얇은 경계까지도 검출할 수 있지만 너무 낮은 값에서는 영상의 잡음이나 헛빛의 반사면, 물체의 표면에 나타난 무늬들까지도 경계부분으로 판단하는 오류가 발생한다. 이러한 오류를 줄이기 위해 여러 영상에서 캐니 경계선 검출기의 문턱값을 다양하게 변경해가며 적절한 깊이 맵을 찾는 실험을 진행하였다.

[그림 5]는 적절한 문턱값을 얻기 위한 영상 테스트 결과의 한 예이다. [그림 5]에서 (a)는 원본 영상이며, (b), (c), (d), (e)는 문턱값에 따라 추출된 경계선이다. [그림 5]의 (b)와 같이 문턱값을 0.01로 낮게 설정한 경우에는 실제 물체의 경계선 뿐만 아니라 물체 표면에서 약간의 밝기 변화 또는 패턴의 변화도 경계선으로 인식하여 오류가 나타나게 된다. 반대로 [그림 5]의 (e)와 같이 문턱값을 0.07로 크게 설정한 경우에는 카메라로부터 먼 곳의 경계를 추출하지 못해 깊이 맵을 제대로 생성하지 못한다. 문턱값이 0.05인 경우보다 문턱값이 0.03인 경우에 멀리 있는 물체의 경계를 더 잘 찾는 것을 확인할 수 있었다. 여러가지의 다른 영상을 이용한 동일한 절차의 실험에서 0.03에서 0.04사이의 문턱값을 갖는 캐니 경계선 검출기를 사용한 DFD가 가장 좋은 성능을 나타낸다는 것을 확인하였다. 그래서 본 논문에서는 캐니 경계선 검출기의 문턱값을 0.03으로 설정하여 실험을 진행하였다.

IV. 실험 결과

1. 3D 깊이 맵 생성을 위한 실험 환경 구축

본 논문에서는 DFD를 적용한 3D 깊이 추정 실험을 실내에서 수행하였다. 추정한 깊이와 실제 거리의 차이를 확인하기 위하여 피사체를 [그림 6]와 같이 배치하였다. 각각의 피사체 거리를 카메라로부터 50 mm 간격으로 100 mm부터 2000 mm까지 배치하였다. 그리고 스마트폰 카메라와 DSLR 카메라 두 종류를 사용하여 실험을 진행하였다.

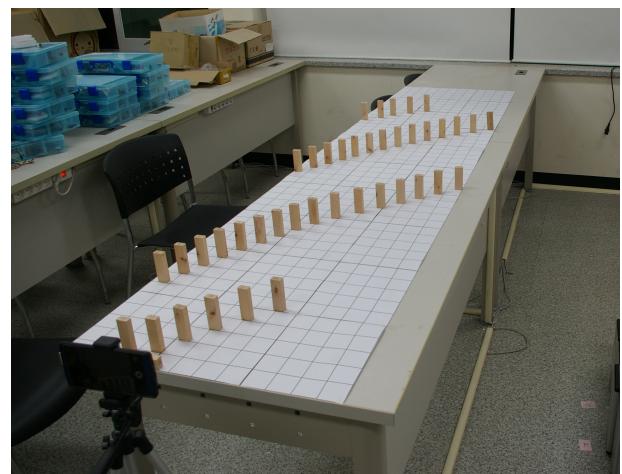


그림 6. DFD를 적용한 3D 거리 추정에 사용된 테스트 환경
Fig. 6. The test environment used for 3D depth estimation with DFD

실험에 사용한 스마트폰 카메라는 렌즈의 초점길이가 4.43 mm로 고정되어 있으며, 렌즈의 구경은 4 mm, 조리개 f값은 1.8, 그리고 ISO는 50으로 설정하였다. 실험에 사용된 DSLR 카메라의 파라미터는 다음과 같다. 600만 화소의 APS-C 1.5 크롭바디를 사용하고, 그 위에 52 mm 렌즈를 장착하여 사용하였다. 사용된 렌즈는 초점길이 조절이 가능하고 렌즈의 구경은 52 mm인 줌렌즈이다. 렌즈의 초점길이는 36 mm로 설정하였으며, 조리개 f값은 4, ISO는 200으로 설정하여 실험을 진행하였다.

본 논문에서 피사체의 거리 측정의 정확도 판단 기준으로 깊이 추정 오차(Depth Error)를 정의하였다. 깊이 추정 오차는 실제 피사체의 거리와 측정 오차의 백분율로 식 (6)

과 같이 정의된다. 이때 z 는 렌즈와 물체 사이의 실제 거리, \hat{z} 는 DFD 방식으로 추정된 거리를 나타낸다.

$$\text{depth error} = \frac{|z - \hat{z}|}{z} * 100 \quad (6)$$

깊이 추정 오차의 절대적 크기를 판단 기준으로 사용하지 않는 이유는 가까운 물체의 깊이 추정 오차의 절대적 크기보다 멀리 있는 물체의 깊이 추정 오차의 크기가 더 크기 때문이다. 그래서 깊이 추정 오차가 10% 이하인 영역을 3D 깊이 추정의 유효 범위로 산정하였다.

2. 스마트폰 카메라를 이용한 DFD의 3D 깊이 추정 결과

스마트폰으로 촬영한 1장의 영상을 이용한 3D 깊이 추정에서는 피사체가 렌즈로부터 500 mm 이내에 가깝게 위치한 경우 스마트폰의 초점을 100 mm에 맞춘 후 촬영한 영상으로도 충분히 DFD를 이용한 깊이 추정이 가능하였다. 또한 250 mm 초점 영상을 사용했을 때, 추정 가능한 거리가 250 mm부터 750 mm로 가장 넓게 분포되어 있었다. [표 1]은 단일 스마트폰 카메라로 촬영한 1개, 또는 2개의 영상을 이용하여 DFD 방식으로 추정한 3D 깊이의 유효 범위를

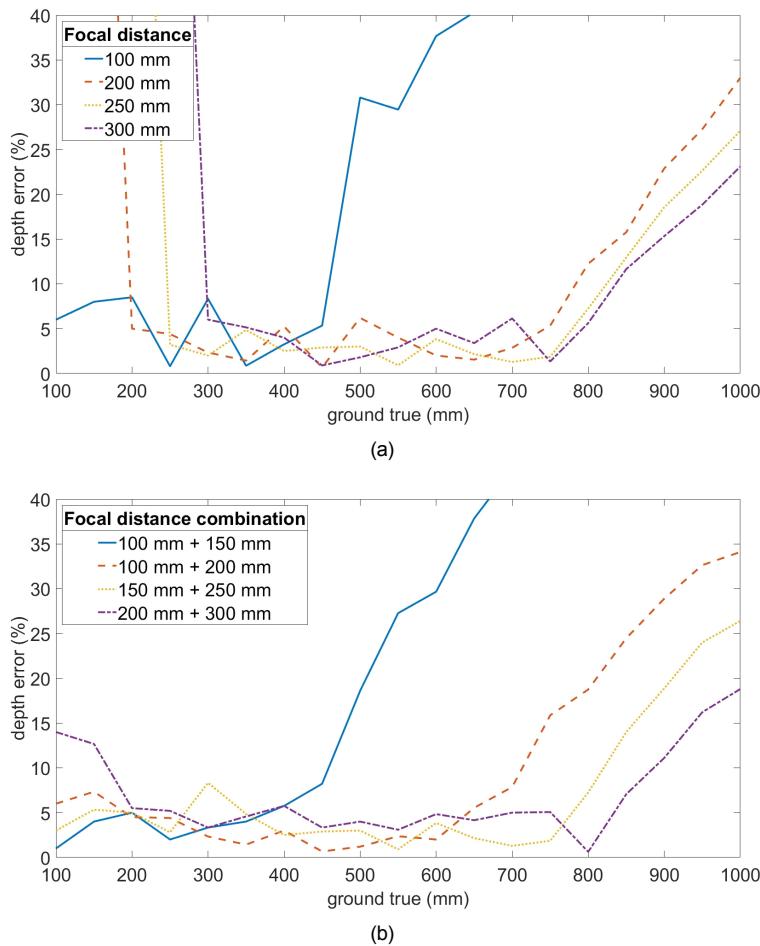


그림 7. (a) 스마트폰 카메라에서 촬영한 1개의 영상을 이용하여 추정한 3D 깊이의 오류 정도, (b) 스마트폰 카메라에서 촬영한 2개의 영상을 이용하여 추정한 3D 깊이의 오류 정도

Fig. 7. (a) Depth error of 3D depth estimated using one image taken by a smartphone camera. (b) Depth error of 3D depth estimated using two images taken by a smartphone camera

표 1. 단일 스마트폰 카메라로 촬영한 영상의 깊이 유효 범위. (a) 1개의 영상을 이용하여 추정한 3D 깊이의 유효 범위. (b) 2개의 영상을 이용하여 추정한 3D 깊이의 유효 범위

Table 1. The effective 3D depth with a single smartphone camera. (a) The effective 3D depth range estimated using one image. (b) The effective 3D depth range estimated using two images

focal distance (mm)	3D effective depth range (mm)	Length of effective 3D depth (mm)
100	100 ~ 450	350
150	150 ~ 500	450
200	200 ~ 750	550
250	250 ~ 800	550
300	300 ~ 800	500

(a)

focal distance (mm)		3D effective depth range (mm)	Length of effective 3D depth (mm)
Image 1	Image 2		
100	150	100 ~ 450	350
100	200	100 ~ 700	600
150	200	100 ~ 750	650
150	250	100 ~ 800	700
150	300	150 ~ 800	650
200	250	150 ~ 750	600
200	300	200 ~ 800	600

(b)

수치적으로 보여주고 있다.

그리고 1개의 영상을 이용하여 추정한 깊이 추정보다 2개의 영상을 결합하여 추정한 깊이 추정 방법이 유효범위가 더 넓은 것으로 나타났다. 첫 번째 영상의 초점거리를 150 mm, 두 번째 영상의 초점거리를 250 mm로 설정하여 촬영한 두 장의 영상을 이용하면 가까운 거리 100 mm부터 멀리 있는 800 mm의 물체까지 깊이 추정이 가능한 것으로 나타났다.

3. DSLR 카메라를 이용한 DFD의 3D 깊이 추정 결과

표 2. DSLR 카메라로 촬영한 1개의 영상의 유효 깊이 범위
Table 2. The effective depth range estimated by one image with a DSLR camera

focal distance (mm)	3D effective depth range (mm)	Length of 3D distance effective range (mm)
100	100 ~ 500	400
150	150 ~ 550	400
200	200 ~ 800	600
250	250 ~ 850	600
300	300 ~ 850	550
350	350 ~ 850	500
400	400 ~ 850	450
450	450 ~ 900	450
500	500 ~ 900	400

DSLR 카메라로 촬영한 1개의 영상을 이용한 DFD에서 3D 깊이 추정을 실험한 결과, 카메라로부터 250 mm 떨어진 거리의 피사체에 초점을 맞쳤을 때 깊이 추정의 유효범위가 가장 넓은 것으로 나타났다. 스마트폰 카메라를 이용한 DFD에서와 비슷하게 카메라의 초점거리를 100 mm 또는 150 mm로 설정한 경우 3D 깊이 추정 유효 범위의 길이가 짧아지는 것을 확인하였다. 반대로 카메라의 초점거리를 500 mm로 매우 먼 곳에 초점을 맞쳤을 때에도 깊이 추정 유효 범위가 짧게 나타났다.

DSLR 카메라로 촬영한 2개의 영상을 이용한 DFD에서 3D 깊이 추정 실험 결과, 두 영상의 초점거리의 차이가 많이 나는 경우 오히려 깊이 추정 유효 거리가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 예를 들어 두 영상의 초점거리가 각각 100 mm와 500 mm인 경우 깊이 측정 유효 범위는 250 mm부터 750 mm로 성능이 좋지 않았다. 100 mm 초점거리에서 촬영한 1개의 영상을 이용한 DFD의 경우에 먼 거리의 피사체에서 오차가 커지고, 반대로 500 mm 초점거리에서 촬영한 1개의 영상을 이용한 DFD의 경우 가까운 거리의 피사체에서 흐림 정도의 크기가 너무 커져서 이 두 가지 영상을 결합할 경우 극단적으로 가깝거나 먼 부분에서 오차가 크게 나타나는 것으로 판단된다. DSLR 카메라로 촬영한 2개의 영상을 이용한 DFD에서 유효 범위를 도출한 결과 두 영상의 초점거리가 각각 200 mm와 300 mm일 때 가장 넓은 깊이 측정 유효 범위를 갖는 것으로 나타났다. 이 경우 카메라로부터 100 mm부터 900 mm 사이에 위치하는 피사체 거리 추정이 가능하였다.

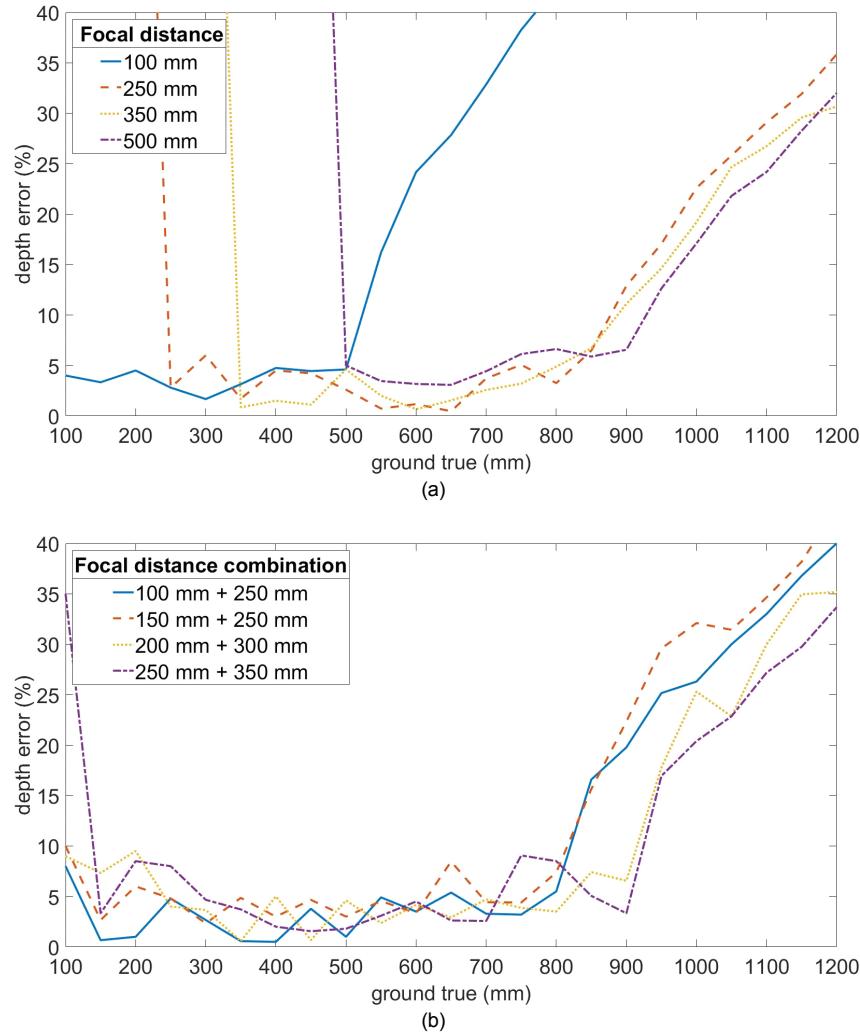


그림 8. (a) DSLR 카메라에서 촬영한 1개의 영상을 이용하여 추정한 3D 깊이의 오류 정도, (b) DSLR 카메라에서 촬영한 2개의 영상을 이용하여 추정한 3D 깊이의 오류 정도

Fig. 8. (a) Depth error of 3D depth estimated using one image taken by a DSLR camera. (b) Depth error of 3D depth estimated using two images taken by a DSLR camera

초점거리가 다른 2개의 영상이 기하학적으로 완전하게 일치하지 않을 수 있다. 기하학적으로 완전히 일치하는 2개의 영상을 이용하여 3D 깊이를 구하는 것이 이상적이기 때문에 보정을 거쳐 3D 깊이를 구하는 것이 오차를 줄일 수 있지만, 본 논문에서의 실험은 초점거리가 150 mm와 250 mm 또는 200 mm와 300 mm로 크게 차이가 나지 않기 때문에 기하학적 불균형으로 발생하는 오차는 무시할 수 있

었다. 2개의 영상으로부터 깊이 맵을 추정하기 위하여 카메라의 초점거리를 변화시켜야 하는데, 스마트폰 카메라에서는 개발자 모드에서 초점거리를 조정하였다. 핸드폰의 초점거리를 바꾸는 것이 가능하기 때문에 초점 거리를 150 mm와 250 mm로 조정하여 2개의 영상을 얻은 후 3D 깊이 맵을 구하는 알고리즘을 스마트폰에 추가하는 것은 어렵지 않을 것이다.

표 3. DSLR 카메라로 촬영한 2개의 영상의 유효 범위

Table 3. The effective depth range calculated by two images with a DSLR camera

focal distance (mm)		3D effective depth range (mm)	Length of 3D distance effective range (mm)	focal distance (mm)		3D effective depth range (mm)	Length of 3D distance effective range (mm)
Image 1	Image 2			image 1	image 2		
100	150	100~500	400	200	400	200~900	700
100	200	100~750	650	200	450	200~900	700
100	250	100~800	700	200	500	200~850	650
100	300	100~750	650	250	300	150~850	700
100	350	150~750	600	250	350	150~900	750
100	400	250~700	450	250	400	200~900	700
100	450	250~700	450	250	450	200~900	700
100	500	250~750	500	250	500	200~900	700
150	200	100~750	650	300	350	200~850	650
150	250	100~800	700	300	400	200~900	700
150	300	100~750	650	300	450	200~900	700
150	350	150~750	600	300	500	200~900	700
150	400	150~750	600	350	400	200~900	700
150	450	150~750	600	350	450	200~900	700
150	500	200~700	500	350	500	200~900	700
200	250	100~850	750	400	450	250~900	650
200	300	100~900	800	400	500	250~900	650
200	350	150~850	700	450	500	250~900	650

V. 결 론

스마트폰에 3D 영상 촬영 기능을 이용하여 DFD 방식으로 추정한 3D 깊이의 유효 범위를 탐색하는 있는 추세이다. 본 논문에서는 저가의 3D 기능을 스마트폰에 탑재하기 위한 연구로 초점이 서로 다른 2 개의 영상을 사용하여 초점의 흐려짐을 이용한 3D 깊이를 추정하는 알고리즘을 설계하고 테스트하였다. 실험을 통하여 경계 추출 문턱값을 도출하고, 두 개 초점의 다양한 조합으로 실험을 수행하여 가장 넓은 깊이 측정 유효 범위를 갖는 초점의 조합을 도출하였다. 실험 결과, 1개의 영상을 이용한 DFD에서는 스마트폰 카메라와 DSLR 카메라 모두 250 mm의 초점거리를 사용하는 것이 가장 좋은 성능을 보였다. 2개의 영상을 이용한 DFD에서는 스마트폰 카메라 영상은 150 mm와 250 mm로 그리고 DSLR 카메라 영상은 200 mm와 300 mm로 초점거리를 설정하였을 때 가장 좋은 3D 깊이 추정 유효 범위를 갖는 것으로 나타났다. 초점이 다른 2개의 영상으로 3D 깊이를 추정하는 알고리즘은 영상의 종류에 따라 경계선 검출을 위한 적절한 문턱값을 자동으로 설정하는데 어려움이 있다. 인공신경망의 CNN(Convolution Neural Network) 모델을 이용한 딥러닝을 적용하면 문턱값 조절 및 깊이 정보 추정에서 성능이 개선될 것으로 예측이 되며, 추후 연구할 내용이다.

참 고 문 헌 (References)

- [1] Jong O Ban, *Digital cameras and virtual reality*, Yeonhaksa, pp.33, 2011.
- [2] H. Tang, S. Cohen, B. Price, and S. Schiller, “Depth from defocus in the wild”, *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Nov. 2017, doi: 10.1109/CVPR.2017.507.
- [3] S. Suwajanakorn, C. Hernandez, and M. Seitz, “Depth from focus with your mobile phone”, *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp.3497-3506, Oct. 2015, doi: 10.1109/CVPR.2015.7298972.
- [4] W. Balley, I. Echevarria, B. Bodenhelmer, and D. Gutierrez, “Fast depth from defocus from focal stacks”, *The Visual Computer*, Vol.31, No.12, pp.1697-1708, Dec. 2015.
- [5] C. Bae, Y. Ko, S. Kim, and D. Kim, “3D depth estimation by using a single smartphone camera”, *Proceedings of the Korean Society of Broadcast Engineers Conference*, pp.240-243, Jul. 2018.
- [6] S. Zhuo and T. Sim, “Depth map estimation from a single image”, *Pattern Recognition*, Vol.44, No.9, pp. 1852-1858, Sep. 2011.
- [7] H. Tang, S. Cohen, B. Price, S. Schiller, and K. N. Kutulakos, Supplementary material for depth from defocus in the wild, <http://www.dgp.toronto.edu/WildDFD/supp.pdf> (accessed Oct. 1, 2017).
- [8] J. Canny, “A computational approach to edge detection”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.PAMI-8, No.6, pp.679-698, Nov. 1986, doi: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.

저자 소개

김 승 기



- 2014년 2월 : 전남대학교 전자공학과 학사
- 2017년 8월 : 전남대학교 전자컴퓨터공학과 석사과정
- 2017년 9월 ~ 현재 : 전남대학교 전자컴퓨터공학과 박사과정
- 2018년 10월 ~ 현재 : 인천국제공항공사 재직
- 주관심분야 : 디지털 통신, 무선 통신, IoT

고 영 민



- 2015년 2월 : 전남대학교 토목공학과 학사
- 2017년 8월 : 전남대학교 전자컴퓨터공학과 석사과정
- 2017년 9월 ~ 현재 : 전남대학교 전자컴퓨터공학과 박사과정
- 주관심분야 : 디지털 통신, IoT, 인공지능

배 철 균



- 2015년 8월 : 전남대학교 전자공학과 학사
- 2015년 9월 : 전남대학교 전자컴퓨터공학과 석사과정
- 2017년 9월 ~ 현재 : LG이노텍
- 주관심분야 : 디지털 통신, 무선 통신, IoT

김 대 진



- 1984년 2월 : 서울대학교 전자공학과 학사
- 1986년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
- 1991년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
- 1991년 7월 ~ 1996년 12월 : LG전자 멀티미디어연구소 책임연구원
- 2009년 3월 ~ 2011년 2월 : 지식경제부/한국산업기술평가관리원 디지털TV/방송 PD
- 1997년 1월 ~ 현재 : 전남대학교 전자컴퓨터공학부 교수
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0767-2526>
- 주관심분야 : 디지털방송, 디지털통신, IoT