

논문 2014-51-7-19

이종 입체영상 카메라의 피사계심도 일치화

(DOF Correction of Heterogeneous Stereoscopic Cameras)

최성인*, 박순용**

(Sung-In Choi[Ⓒ] and Soon-Yong Park)

요약

본 논문에서는 서로 다른 광학적 특성을 가지는 3차원 카메라의 내부 변수 값을 자동으로 결정하여 스테레오 영상의 심도를 일치시키는 기술을 제안한다. 3차원 카메라에서 획득한 스테레오 영상에서 물체의 크기가 다르거나 심도의 차이가 큰 경우에 사람의 눈은 시각적 피로감을 느끼게 된다. 획득된 좌, 우 영상에서 물체의 크기가 동일하도록 카메라의 줌(zoom)을 LUT(Look Up Table)을 이용하여 일치시키고 피사체까지의 거리에 따라 전방심도와 후방심도의 범위를 결정한다. 이들을 이용하여 렌즈의 F-값을 결정하고 카메라의 광학 특성값을 자동으로 조절함으로써 스테레오 영상의 심도를 일치시킨다. 주-부 방식의 3차원 카메라와 GUI 소프트웨어를 통한 실험을 통하여 제안한 방법으로 스테레오 영상의 심도를 자동으로 일치시킬 수 있음을 보였다.

Abstract

In this paper, we propose a DOF (Depth of Field) correction technique by determining the values of the internal parameters of a 3-D camera which consists of stereoscopic cameras of different optical properties. If there is any difference in the size or the depth range of focused objects in the left and right stereoscopic images, it could cause visual fatigue to human viewers. The object size of in the stereoscopic image is corrected by the LUT of zoom lenses, and the forward and backward DOF are corrected by the object distance. Then the F-numbers are determined to adjust the optical properties of the camera for DOF correction. By applying the proposed technique to a main-sub type 3-D camera using a GUI-based DOF simulator, the DOF of the camera is automatically corrected.

Keywords : heterogeneous stereoscopic camera, geometric properties, 3D display, zoom, depth of field, focus

I. 서론

3차원 입체 TV, 모니터, 프로젝터 등 다양한 3차원 디스플레이 장치가 상용화에 성공함으로써 최근 학계에

서는 이러한 3차원 디스플레이 장치에 사용될 수 있는 콘텐츠를 보다 쉽고 빠르게 제작하기 위한 다양한 연구 결과들이 소개되고 있다. 3차원 영상 기술의 핵심은 입체감에 있으며 시청자에게 이러한 입체감을 실감나게 전달하기 위해서는 3차원 카메라가 반드시 필요하다. 3차원 카메라는 다수의 CCD 센서를 이용하여 사물의 다시점 영상을 획득하고 이를 합성하여 3차원 비디오 신호를 생성하는 장치를 말하며, 두 개의 CCD 센서를 사용하는 스테레오 비전 형태가 현재 가장 보편적인 3차원 카메라로 널리 사용되고 있다.

사람의 두 눈은 동일한 광학특성으로 사물을 바라보고 인지하려는 습성을 가지고 있다. 이러한 생물학적 특징을 바탕으로 현업에서는 스테레오 비전 시스템을 구축할 때 동일한 특성을 가진 두 개의 동종 카메라를

* 학생회원, ** 정회원, 경북대학교 IT대학 컴퓨터학부 (School of Computer Science and Engineering, Kyungpook National University)

Ⓒ Corresponding Author(E-mail: ellim5th@naver.com)

※ 본 연구는 국방과학연구소의 민군기술협력진흥센터 및 한국원자력연구원의 지원과 미래창조 과학부 및 정보통신기술진흥센터의 IT/SW 융합산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [10043897, 치료 시간 30% 단축을 위한 자동 병변 추적 기술기반 악성종양 치료용 500cGy급 dual-head 겐트리 방사선 치료시스템 개발]

접수일자: 2014년02월25일, 수정일자: 2014년05월27일
수정완료: 2014년06월27일

사용한다. 3차원 영화 또는 방송제작에 사용되는 스테레오 비전 시스템 역시 마찬가지로 동일한 특성을 가진 고성능 카메라 두 대를 사용하여 제작된다. 고품질 영상 획득에 사용되는 이러한 고성능 카메라는 일반적으로 크기가 매우 크면서 무겁기 때문에 촬영 시 운용적인 측면에서 매우 큰 제약이 뒤따른다. 또한 가격이 일반적으로 고가이기 때문에 비용 문제도 발생한다. 따라서 기존에 사용되고 있는 시스템과 비슷한 성능을 가지면서 시스템 전체의 크기와 무게, 그리고 제작 원가를 한꺼번에 줄일 수 있는 새로운 형태의 스테레오 비전 시스템 개발이 필수적으로 요구된다.

3차원 입체영상을 감상할 때 스테레오 카메라로 획득된 양안영상은 각각 사람의 좌, 우 눈에 일대일로 대응된다. 이 때 각 영상의 특성 편차가 크면 사람의 눈은 큰 불편함을 느끼게 되며 심한 경우에는 현기증이나 두통을 겪기도 한다. 스테레오 카메라의 광학특성뿐만 아니라 영상특성의 경우도 마찬가지로 동일해야만 한다. 만약 좌, 우 카메라에서 획득한 영상의 밝기나 색상이 다르다면 눈의 피로감은 더욱더 가중된다^[1]. 본 논문에서는 스테레오 기반 3차원 카메라를 개발하는데 있어 필수적으로 해결되어야 하는 광학특성 일치화 기술을 소개하고자 한다. 특히, 광학적 특성이 서로 다른 이종 카메라 간의 광학특성 일치화에 대해 심도 있게 다루고자 한다. 본 논문에서 사용한 이종 카메라를 각각 주 카메라(main camera)와 부 카메라(sub camera)로 구분하였다. 일반적으로 주 카메라를 표준카메라로 설정하고 부 카메라의 특성을 표준카메라의 특성으로 일치화하지만 그 반대의 경우도 가능하다.

국외의 경우에도 오랜 기간 동안 스테레오 카메라의 광학특성 일치화에 대한 연구가 진행되어 오고 있다^[2~3]. 영국의 Oxford 대학의 Knight와 Reid는 자동으로 스테레오 비전 시스템의 플랫폼을 정렬하는 시스템을 제안하였다^[4]. 실험에 사용된 카메라는 팬/틸트(pan/tilt) 리지에 장착되었으며 2개의 회전축을 가지고 있다. 이 실험에서는 RANSAC과 번들조정(Bundle adjustment) 알고리즘을 이용하여 두 카메라 사이의 광학정렬의 정확도를 향상시켰다. 이에 대한 결과로써 정렬된 3차원 카메라의 매우 정확한 보정정보를 얻을 수 있었다.

영국의 Oxford 대학의 Jones는^[5] 스테레오 카메라 영상에서의 깊이 값 조정에 관한 연구를 하였다. 이 실험에서 제안하는 방법의 특징은 우선 사용자가 쉽고 직관

적으로 측정된 값들을 이해하고 조정할 수 있도록 한다는 점이다. 관찰자의 얼굴을 추적하여 관찰자가 이동할 때에 발생하는 깊이 값 오류를 최소화 한다. 영상획득 공간과 화면공간을 구분하고, 정밀한 조작을 통해 구분된 두 공간 사이의 변환 관계식을 구하였다. 이런 과정을 거쳐서 깊이 값을 조정하면 많은 연산이 필요하지 않으며 정확하게 조정된 깊이 값을 획득할 수가 있다.

캐나다 British Columbia 대학의 Colin Doutre는 서로 다른 줌을 가지는 두 카메라의 영상을 일치하는 보정 방법을 제안하였다^[6]. 이 연구에서는 사람의 눈에 피로를 적게 발생하기 위해 기하학적인 정보를 이용하여 한쪽 영상을 다른 쪽 영상에 정합하였다.

이탈리아 Udine 대학의 Kumar은 이종 카메라를 이용한 스테레오 보정 방법을 제안하였다^[7]. 이종 카메라는 다른 초점거리를 가지게 될 때 줌 정보가 동일하지 않기 때문에 영상내의 객체 크기가 서로 다르게 획득되거나 해상도가 서로 달라지는 특징을 가지고 있다. 이를 보정하는 방법은 초점 비율을 기반으로 한쪽 이미지의 스케일을 상대적으로 보정하고 두 영상 사이의 매칭점들을 획득하여 정류변환(rectification transformation)을 계산하고 또 적용하는 것이다. 이는 에피폴라 기하학(Epipolar geometry)을 이용하기 때문에 직접적인 정류화를 이용하는 것보다 더 좋은 성능을 보였다^[8].

본 논문에서는 이종 카메라 기반 스테레오 비전 시스템의 광학특성을 보정하기 위하여 주 카메라와 부 카메라의 심도(depth of field, 이하 DOF)를 자동으로 일치시키는 기술을 제안한다. 특히 표준카메라(부 카메라)의 광학특성 파라미터들이 주어졌을 때 다른 카메라의 광학특성 파라미터를 자동으로 계산할 수 있도록 주 카메라와 부 카메라의 초점 및 조리개의 관계식을 사용하였다. 본 논문에서 목표로 하는 이종카메라의 심도 일치화는 특정 위치에 놓여있는 물체에 대한 초점을 동일하게 맞출 뿐만 아니라 각 카메라에서 초점이 맺히기 시작하는 깊이의 범위까지 일치시키는 것을 의미한다.

3차원 카메라의 심도 일치화를 진행하기에 앞서 두 카메라 사이의 줌 보정은 [9]에서 제안한 방법을 사용하여 관계식을 미리 계산하였다. 특히 두 카메라 사이의 광학특성이 서로 다르기 때문에 두 카메라의 줌 값의 변화에 대한 영상에서의 물체 크기의 변화를 LUT에 저장하고 부 카메라의 줌 값에 대한 주 카메라의 줌 값을 설정하는 방법을 사용하였다. 줌이 일단 일치되고

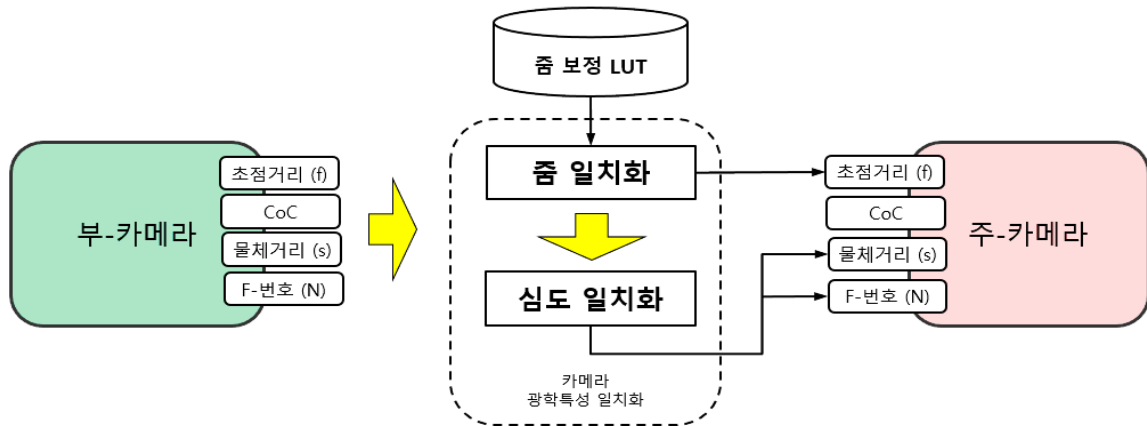


그림 1. 주-부 스테레오 카메라 시스템의 피사계심도 일치화 과정
Fig. 1. Flow of DOF Correction of a Main-sub type stereoscopic camera system.

나면 두 카메라의 심도를 자동으로 일치화하기 위하여 초점과 조리개 값에 대한 카메라의 심도 방정식을 사용한다. 그리고 사용자가 원하는 초점 거리와 심도의 범위에 대한 심도 방정식을 이용하여 두 카메라의 초점과 조리개 값을 자동으로 설정하도록 한다. 그림 1은 본 논문에서 제안하는 이중 스테레오 카메라의 심도 일치화 과정을 보여준다. 그림 1에서 착락원(circle of confusion, 이하 CoC)는 심도 계산에 사용되는 값이지만 카메라의 CCD에 중속되는 상수 값이기 때문에 따로 계산하지 않고 카메라의 명세서에 주어진 값을 그대로 사용하였다. 따라서 본 논문에서 목표로 하는 심도 일치화는 부 카메라의 심도가 결정되었을 때 주 카메라의 심도가 일치되기 위한 초점거리, 물체거리 그리고 F-번호(조리개) 값을 자동으로 계산하는 과정으로 정의할 수 있다.

서론에 이어서 II절에서는 본 논문에서 사용한 이중 입체카메라 시스템의 구성에 대한 내용을 소개한다. III절에서는 주 카메라와 부 카메라 사이의 심도 일치화에 대한 과정을 심도 있게 다루며, 이어지는 IV절에서는 제안한 방법에 대한 실험결과를 통해 정확도를 검증한다. 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 이중 입체카메라 시스템 구성

본 논문에서 사용한 스테레오 카메라는 이전 관련연구에서 제안된 방법을 기반으로 새롭게 제작하였다^[9]. 3차원 카메라 시스템은 수직 리그 (rig)방식으로 제작하

표 1. 주-부 스테레오 카메라 제원
Table 1. Main-sub stereoscopic camera specificationz.

카메라	주 카메라	부 카메라
모델명	PWM-EX3	AG-HPX250
이미지센서	1/2인치 ExmorCMOS	1/3인치 CMOS
초점거리	5.8~81.2mm	3.9~86mm
줌 배수	광학 14배	광학 22배
대각선화각	70.87~8.14도	69.13~5.64도



그림 2. 주-부 방식 스테레오 카메라 시스템
Fig. 2. Main-sub type stereoscopic camera system.

였고 이중의 주 카메라와 부 카메라로 이루어진 주-부 방식의 방송용 Full HD급 카메라를 사용하였다. 실험에 사용된 주 카메라는 Sony사의 PWM-EX3이며, 부 카메라는 Panasonic의 AG-HPX250이다. 본 논문에서는 화질이 상대적으로 우수한 소니 PWM-EX3 카메라를 주 카메라로 설정하였다. 표 1에서는 주 카메라와 부 카메라의 사양을 보였다.

그림 2는 수직방식 리그에 장착된 주 카메라와 부 카메라를 보여준다. 주 카메라는 반투명 유리(half mirror)

에 투과된 영상을 그리고 부 카메라는 반투명 유리에 반사된 영상을 획득한다. 시차 발생을 위한 두 카메라 사이의 수평이동은 레일(rail) 형태의 카메라 헤드를 부착하여 해결하였다. 레일 헤드에 부착된 수평 길이 조절장치를 통해 주 카메라를 좌 또는 우 방향으로 이동 시킴으로써 주-부 카메라 사이의 시차를 발생시킨다.

이종 입체카메라 구성에 사용된 주 카메라와 부 카메라는 줌, 초점 그리고 조리개 값을 출력하는 인터페이스를 제공하지 않는다. 따라서 각 카메라의 광학 특성 값을 컴퓨터에서 획득하기 위해서 각 카메라의 줌, 초점, 조리개 링에 인코더를 부착하였다. 그리고 실제 아날로그 광학 특성 값들에 대한 인코더의 디지털 출력 값을 맵핑하기 위한 보정을 진행하였다^[9]. 인코더-카메라 보정 이후에는 두 카메라 사이의 줌을 일치시키기 위한 LUT를 생성한다. 각 카메라에 사용한 인코더는 Autronics사의 E20S2-100-3-N-5-R이며, 인코더 값을 읽기 위한 인터페이스 카드는 Phidget의 1047-Encoder HighSpeed 4-Input을 사용하였다.

3차원 카메라의 광학 특성 일치화는 다음과 같은 단계로 진행된다. 우선 부 카메라의 줌을 사용자가 원하는 값에 맞춘다. 그리고 미리 생성해 놓은 LUT에 따라



(a)



(b)

그림 3. 광학식 인코더 설치
 (a) 주 카메라 (b) 부 카메라
 Fig. 3. Mounted optical encoders.
 (a) main (b) sub cameras

부 카메라의 줌을 조절하여 두 카메라의 줌을 일치시킨다. 주-부 카메라의 줌이 일치되면 이어서 두 카메라 사이의 심도를 일치화 시킨다. 기준이 되는 부 카메라의 줌, 초점, 그리고 조리개 값을 결정하면 부 카메라의 심도가 결정되기 때문에, 결정된 심도를 바탕으로 주 카메라의 초점과 조리개 값을 결정한다.

III. 이종 입체 카메라의 심도 일치화

1. 심도의 정의

영상의 심도는 카메라 렌즈를 사용하여 피사체를 촬영하는 경우 카메라의 영상 면에 형성되는 피사체의 형상이 뚜렷하게 맺히게 되는 가장 가까운 거리와 가장 먼 거리 사이의 범위를 뜻한다. 그림 4는 초점거리가 55mm, 렌즈의 F-번호가 16인 렌즈로 카메라의 초점을 10m에 맞췄을 때의 심도 범위 예를 보여주며, 이때 카메라의 5m 전방부터 거의 무한대 거리에 이르는 피사체는 모두 피사체의 상이 뚜렷하게 나타난다.

영상의 심도는 카메라의 줌, 초점 그리고 조리개 값 (F-번호)의 조합으로 결정된다. 따라서 본 논문에서 주-부 카메라의 심도 일치화는 기준 카메라인 부 카메라의 줌, 초점, 조리개 값으로 일치시켜야 할 심도의 범위가 이미 결정되었다고 가정했을 때 주 카메라의 줌과 초점 그리고 조리개 값을 찾는 문제로 정의할 수 있다.

우선 두 카메라의 줌은 LUT을 이용하여 보정했기 때문에 심도 일치화는 부 카메라의 심도 값에 대한 주 카메라의 초점 및 조리개 값을 찾아야 한다. 주-부 카메라 사이의 심도를 일치시키는 이유는 초점이 일치하는 영상을 획득하기 위해서다. 따라서 일치된 심도를

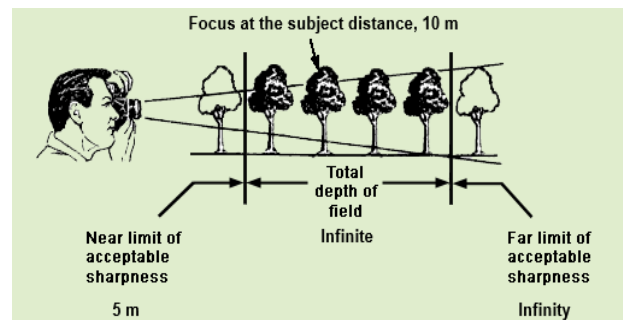


그림 4. 피사계 심도의 예 (55mm/f16, 초점거리 10m)
 (그림참조: <http://www.dofmaster.com/dofjs.html>)

Fig. 4. Example of depth of field.

확인하기 위한 직관적인 방법은 사용자의 눈으로 두 영상의 초점이 정확하게 일치하는지 판단하는 것이다. 하지만 실험을 진행하는 사용자에게 따라 심도 일치화 결과에 대한 판단이 각각 다를 수 있다. 따라서 사용자의 주관적 판단에 의존하지 않고 정량적으로 심도를 비교하는 방법을 제안한다.

주-부 카메라의 심도의 비교를 위하여 영상의 윤곽선(edge) 성분을 이용하였다. 동일한 심도의 영상은 유사한 강도의 윤곽선을 가지기 때문이다. 본 논문에서 제안한 방법으로 주-부 카메라의 심도를 일치화한 후 주 카메라와 부 카메라의 영상에서 서로 정합되는 특징 점 주위의 영상 윤곽선의 강도를 측정하고 그 차이를 사용자에게 GUI(Graphic User Interface)로 피드백함으로써 심도 일치화의 결과 확인에 도움이 되도록 하였다.

2. DOF (Depth of Field) 계산

일반적인 카메라에서 사용하는 대칭렌즈를 기준으로 피사계 심도는 그림 5와 같이 설명할 수 있다. 그림 5에서 s 는 초점이 맞는 물체까지의 거리, 즉 물체거리(object distance)라 한다. 또한 v 는 렌즈로부터 CCD까지의 거리를 나타내는 영상거리(image distance)를 뜻한다. D_n 과 D_f 는 전방 피사계 심도(forward DOF) 그리고 후방 피사계 심도(backward DOF)라고 부르며 각각 초점이 또렷이 맺히기 시작하는 거리와 끝나는 거리를 나타낸다. V_n 과 V_f 는 D_n 과 D_f 에 대한 영상거리를 말한다. 그림 5의 대칭렌즈는 수식 (1)과 수식 (2)를 만족한다^[10].

$$\frac{V_n - v}{V_n} = \frac{c}{d} \quad (1)$$

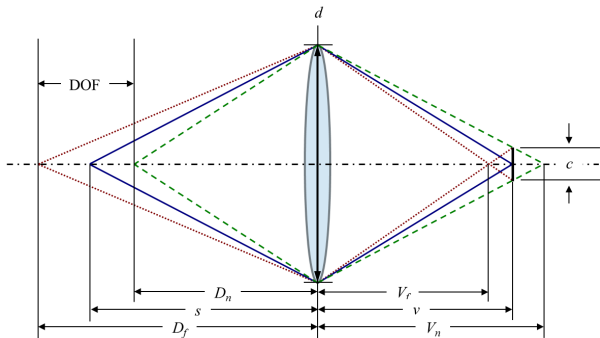


그림 5. 대칭렌즈(symmetrical lens)를 위한 DOF
Fig. 5. DOF in a symmetrical lens.

$$\frac{v - V_f}{V_f} = \frac{c}{d} \quad (2)$$

수식 (1)에서 d 와 c 는 각각 조리개의 직경크기와 영상의 또렷한 정도를 결정하는 허용 착란원이다(CoC). 카메라 렌즈의 F-번호 N 은 카메라의 초점거리(focal length) f 와 조리개의 직경 d 에 따라 수식 (3)과 같이 정의된다.

$$N = \frac{f}{d} \quad (3)$$

수식 (3)을 d 에 관한 식으로 정리하여 수식 (1)과 (2)에 대입하고 정리하면 수식 (4)와 같다.

$$\frac{V_n - v}{V_n} = \frac{v - V_f}{V_f} = \frac{Nc}{f} \quad (4)$$

수식 (4)로 부터 V_n 과 V_f 에 관한 식으로 각각 전개하면 수식 (5)와 수식 (6)과 같다.

$$V_n = \frac{fv}{f - Nc} \quad (5)$$

$$V_f = \frac{fv}{f + Nc} \quad (6)$$

Thin 렌즈 모델의 정의에 따라 렌즈의 물체거리 s , 영상거리 v , 그리고 초점거리 f 는 수식 (7)과 같은 관계를 가진다.

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (7)$$

수식 (7)과 유사하게 V_n 과 D_n , 그리고 V_f 와 D_f 의 관계를 정리하면 수식 (8)과 수식 (9)와 같으며, D_n 과 D_f 에 대한 식으로 수식 (8)과 수식 (9)를 다시 전개하면 수식 (10)과 수식 (11)과 같다.

$$\frac{1}{D_n} + \frac{1}{V_n} = \frac{1}{f} \quad (8)$$

$$\frac{1}{D_f} + \frac{1}{V_f} = \frac{1}{f} \quad (9)$$

$$D_n = \frac{f V_n}{V_n - f} \quad (10)$$

$$D_f = \frac{f V_f}{V_f - f} \tag{11}$$

수식 (7)을 영상거리 v 대한 식으로 전개한 뒤, 수식 (5)와 수식 (6)에 대입하면 V_n 과 V_f 는 수식 (12)와 수식 (13)과 같이 다시 정리된다.

$$V_n = \frac{sf^2}{(f - Nc)(s - f)} \tag{12}$$

$$V_f = \frac{sf^2}{(f + Nc)(s - f)} \tag{13}$$

수식 (12)와 수식 (13)를 각각 수식 (10)과 수식 (11)에 대입하면 D_n 과 D_f 는 수식 (14)와 수식 (15)와 같이 카메라의 초점거리 f 와 카메라 렌즈의 F-번호 N , CoC 값인 c , 그리고 렌즈의 물체거리 s 로 정리된 식이 만들어 진다.

$$D_n = \frac{sf^2}{f^2 + Nc(s - f)} \tag{14}$$

$$D_f = \frac{sf^2}{f^2 - Nc(s - f)} \tag{15}$$

마지막으로 수식 (14)와 (15)를 이용하면 DOF를 계산하는 최종적으로 수식 (16)과 같이 정리된다.

$$DOF = D_f - D_n = \frac{2Ncf^2s(s - f)}{f^4 - N^2c^2(s - f)^2} \tag{16}$$

3. 전 · 후방 DOF로 s 와 N 계산하기

수식 (14)와 수식 (15)을 이용하여 부 카메라의 전방 피사계 심도와 후방 피사계 심도가 결정되고 나면 주 카메라의 줌, 초점 그리고 조리개 값을 조절하여 부 카메라의 심도와 일치시켜야 한다. 앞서 설명한대로 조절해야 하는 주 카메라의 줌 거리는 주-부 카메라 줌 일치화 LUT로 이미 결정되었으므로, 주 카메라의 초점거리 및 조리개 값만 조절하여 부 카메라와 일치되는 심도를 획득하도록 한다.

부 카메라의 전방 심도 값인 D_n 과 후방 심도 값인 D_f 를 알고 있다고 가정하였을 때 심도를 일치시키기 위한 주 카메라 렌즈의 초점거리 s 를 구하는 과정은 다음과 같다. 수식 (14)와 수식 (15)을 각각 $Nc(s - f)$

에 대한 식으로 전개한 뒤 전개된 수식을 서로 조합하면 Nc 가 제거된 수식 (17)을 구할 수 있다.

$$\frac{(s - D_n)f^2}{D_n} = \frac{(D_f - s)f^2}{D_f} \tag{17}$$

s 를 계산하기 위하여 수식 (17)을 s 에 대한 식으로 재정리하면 수식 (18)과 같다. 수식 (18)에 따라 주-부 카메라의 심도를 일치시키기 위한 주 카메라의 물체거리 s 는 결국 부 카메라의 전방 피사계 심도 값인 D_n 과 후방 피사계 심도 값인 D_f 를 이용하여 계산된다.

$$s = \frac{2D_nD_f}{D_n + D_f} \tag{18}$$

부 카메라와의 심도 일치화를 위한 주 카메라의 조리개 값 N 은 수식 (14)와 수식 (15)을 조합하여 N 에 대한 식으로 먼저 전개한 뒤, 수식 (18)에서 구한 s 를 대입하면 수식 (19)와 같이 구할 수 있다.

$$N = \frac{f^2}{c} \frac{D_f - D_n}{2D_nD_f - (D_n + D_f)f} \tag{19}$$

4. 심도 일치화 시뮬레이터

광학 특성이 서로 다른 카메라의 심도를 서로 일치시키기 위해서는 결국 전방 피사계 심도 값 D_n , 후방 피사계 심도 값 D_f , 그리고 카메라의 조리개 값이 반드시 결정되어야 한다. 본 논문에서는 주-부 카메라의 광학 특성 값들을 직접 변경하기 전에 물체의 거리에 따른 심도 일치화를 위한 시뮬레이터를 구현하였다. 3차원 카메라로 영상을 획득하기 위해서는 결정할 파라

표 2. CCD 크기에 따른 일반적인 허용 CoC 크기 (Full-HD 및 3픽셀의 CoC 기준)
Table 2. Acceptable CoC size vs CCD size. (Based on Full-HD and 3-pixel CoC)

CCD 크기	허용 CoC 크기(mm)	비 고
1"	0.02	
2/3"	0.014	
1/2"	0.01	Sony EX3
1/3"	0.0075	Panasonic AG-HPX250
1/4"	0.0055	

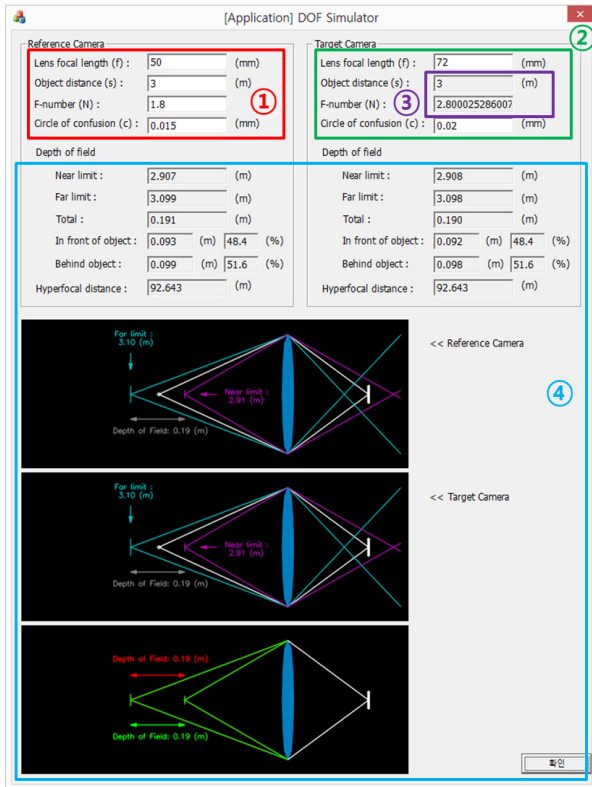


그림 6. 주-부 DOF 일치화 시뮬레이터
Fig. 6. GUI simulator for DOF correction.

미터가 많기 때문에 기존 기술들에서도 여러 형태의 시뮬레이터를 사용하고 있다^[11].

그림 6은 심도 일치화를 위해 제작한 시뮬레이터의 GUI를 보여준다. 먼저 기준 카메라인 부 카메라 렌즈의 초점거리, 물체거리, F-번호, 그리고 CoC 값을 입력한다(①). 다음으로 주 카메라 렌즈의 초점거리 및 CoC 값을 입력한다(②). 주 카메라 렌즈의 초점거리는 줌 일치화 LUT를 사용하여 입력한다. 또한 각 카메라의 CoC는 CCD의 크기에 따라 결정되는 상수 값으로써 표 2를 참고하여 입력한다^[8].

주 카메라의 초점거리 및 CoC를 입력하고 나면 부 카메라의 심도와 일치하기 위하여 조절해야 하는 주 카메라의 물체거리와 F-번호가 출력된다(③). 또한 심도가 일치되거나 불일치 된 것을 효과적으로 표현하기 위하여 주 카메라 및 부 카메라 각각에 대한 전/후방 피사계 심도거리, 심도의 범위, 초점이 맺힌 물체거리로부터 전/후방 피사계 심도거리의 비율 등을 출력한다. 또한 추가적으로 사용자의 이해를 돕기 위해 그림으로 각 카메라의 심도를 표현하도록 하였다(④).

IV. 실험

본 논문의 II장에 소개한 주-부 방식의 이중 스테레오 카메라를 이용하여 심도 일치화 실험을 수행하였다. 주-부 카메라로부터 1080i 해상도의 HD 영상을 획득하여 실험에 사용하였다. 실험에 사용된 컴퓨터는 인텔 i5-2550 CPU에 4GB의 메모리가 탑재되어 있다. 구현된 모든 프로그램은 MFC 기반 C++으로 작성되었다.

심도는 앞서 설명한 바와 같이 초점거리, 물체거리, F-번호, CoC로 결정된다. 줌 일치화 이후에는 초점거리는 이미 결정되어 있으며 CoC 또한 CCD 센서의 고유한 특성으로 이미 결정된 상태이다. 따라서 부 카메라와의 심도 일치화에 필요한 주 카메라의 물체거리 식 (18), 그리고 조리개 값인 F-번호는 식 (19)를 이용하여 구한다. 실험은 총 2회에 걸쳐서 진행했으며 각각 근거리와 원거리 줌 거리의 심도 일치화로 분류한다.

주-부 카메라 사이의 심도를 비교하기 위하여 영상 사이에 동일하게 매칭되는 특징점들에 대해 에지강도(edge strength)를 각각 계산하였다. 특징점 추출을 위해 영상의 회전 및 스케일 변화에도 강건한 SURF 알고리즘을 사용하였다^[12]. 특징점들의 에지강도는 Sobel 연산자를 사용하여 계산한다. 주-부 영상사이에 매칭으로 판단되는 각 특징점들의 위치에서 3x3 마스크 행렬을 사용한 Sobel 연산자를 적용하여 에지의 강도를 측정한다. 어떤 영상 I의 한 영상점 $p = [x \ y]^T$ 가 주어졌다고 가정했을 때, 점 p 의 에지강도는 수식 (20)부터 수식 (22)를 통해서 결정된다.

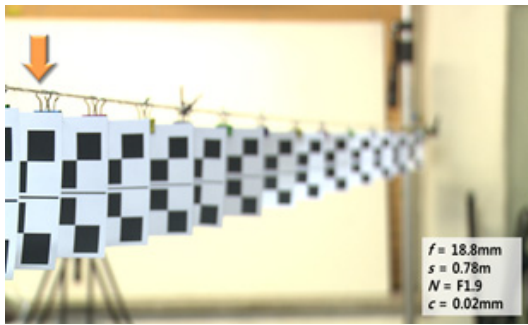
$$G_x(I(p)) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * I(p) \quad (20)$$

$$G_y(I(p)) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * I(p) \quad (21)$$

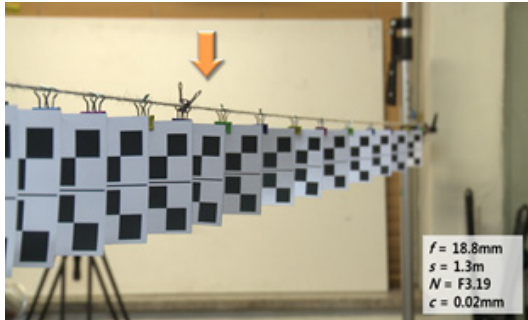
$$G(I(p)) = \sqrt{G_x(I(p))^2 + G_y(I(p))^2} \quad (22)$$

주 카메라의 영상과 부 카메라의 영상을 각각 I와 I' 그리고 SURF 특징점 매칭으로 결정된 대응점을 각각 p와 q라고 다시 가정했을 때, 영상점 p와 q의 에지강도의 차이는 수식 (23)과 같이 계산하였다.

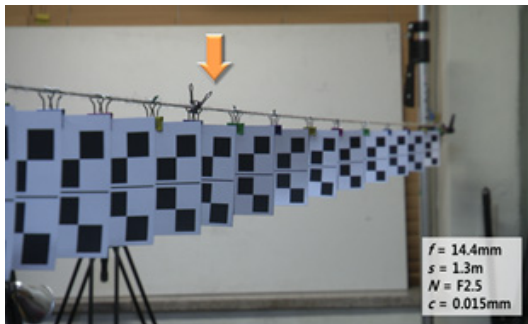
$$M(I(p), I'(q)) = G(I(p)) - G(I'(q)) \quad (23)$$



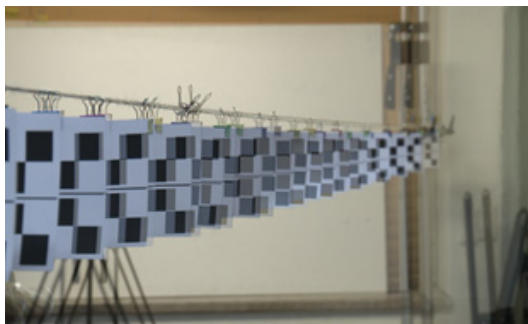
(a)



(b)



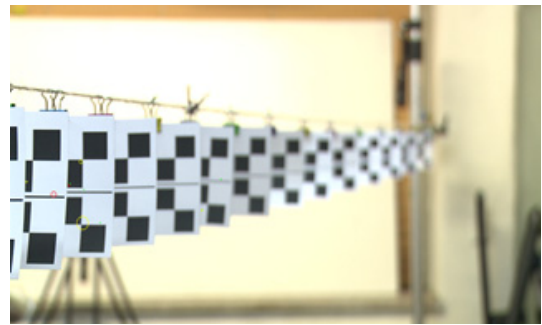
(c)



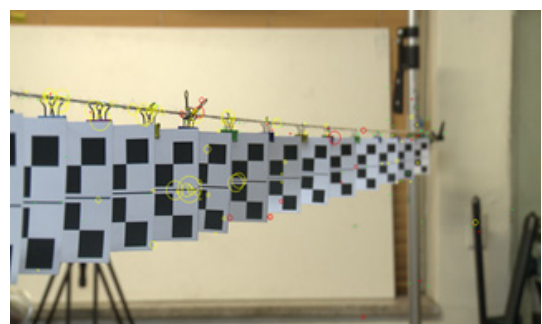
(d)

그림 7. 근거리에 대한 심도 일치화 실험 (a) 주카메라 심도보정 전 (b) 주카메라 심도 보정 후 (c) 부카메라 영상 (기준영상) (d) 주-부 카메라의 합성 영상

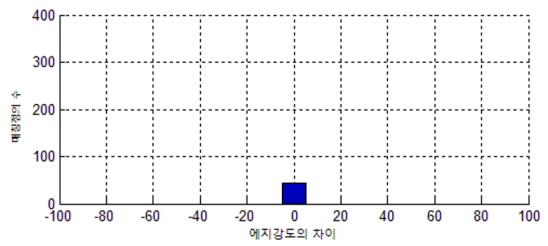
Fig. 7. DOF experiment for close range (a) Before and (b) After DOF correction of the main camera (c) Image of the sub-camera (d) Stereoscopic images acquired from the camera.



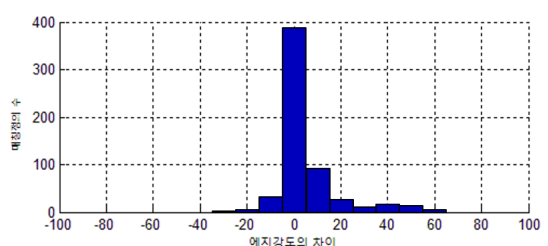
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 8. 에지강도 측정을 통한 주-부 영상의 심도오차 비교 (a) 심도 보정 전과 (b)후 의 에지(edge)강도의 차이 (c) 보정전과 (d)후의 에지강도의 히스토그램

Fig. 8. DOF comparison using edge strength measurement. Edge strength of (a) before and (b) after correction. Edge histogram of (c) before and (d) after correction.

그림 7부터 그림 8까지는 근거리 물체에 대한 심도 일치화 결과를 보여준다. 그림 7(a)와 그림 7(b)

는 각각 심도 일치화 이전과 이후에 대한 주 카메라의 영상을 보여주며 그림 7(c)는 기준 영상인 부 카메라의 영상을 나타낸다. 그림 7(a)에서 그림 7(c) 사이의 각 영상에는 화살표로 현재 초점이 맞은 부분을 표시하였으며, 영상 획득 시점의 줌, 물체거리, F-번호, CoC 값 또한 제시하였다.

심도 일치화 이후 주 카메라와 부 카메라 영상에 화살표가 가리키는 위치를 보면 초점이 맞은 물체의 거리가 거의 일치함을 알 수 있다. 이는 그림 8의 심도오차 비교 GUI를 통해서도 확인할 수 있다. 그림 8(a)와 그림 8(c)는 심도오차 보정 이전 그리고 그림 8(b)와 그림 8(d)는 심도오차 보정 이후 결과이다.

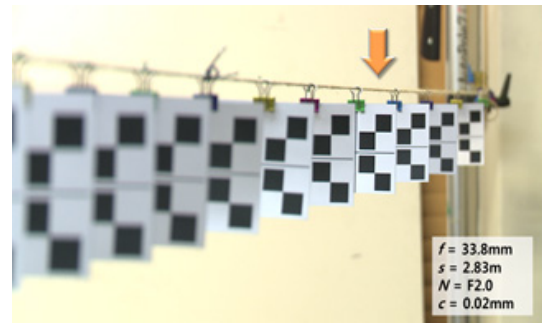
그림 8(a)와 그림 8(c)에서 보이듯이 매칭 된 특징점이 거의 없는 것을 알 수 있는데 그 이유는 심도의 차이가 크기 때문이다. 반면 그림 8(b)와 그림 8(d)에서는 심도 일치화가 정상적으로 진행되었기 때문에 많은 수의 특징점들이 매칭에 성공할 수 있었다. 그림 8(d)에서 그래프의 중앙에 히스토그램 값이 크게 나타나는 것은 심도오차가 0에 가까운 특징점들이 많다는 것을 의미한다. 표 3에서 근거리 실험에 대한 심도 일치화의 결과로 전방피사계 심도는 약 1.05m, 후방피사계 심도는 1.69m인 것을 보여준다.

그림 9와 그림 10은 원거리 물체에 대한 심도 일치화 실험 결과를 보여준다. 심도 일치화 실험의 특성으로 인하여 앞선 근거리 실험보다 매우 멀리 떨어진 물체에 대한 실험은 불가능하여 실내에서 동일한 방법으로 약간 원거리의 실험을 진행하였다. 그림 9(a)와 그림 9(b)는 각각 심도 일치화 이전과 이후에 대한 주 카메라의 영상을 나타내며 그림 9(c)는 기준 영상인 부 카메라의 영상이다. 실험에 사용된 주-부 영상에는 초점이 맞은 물체를 화살표로 표시하였다.

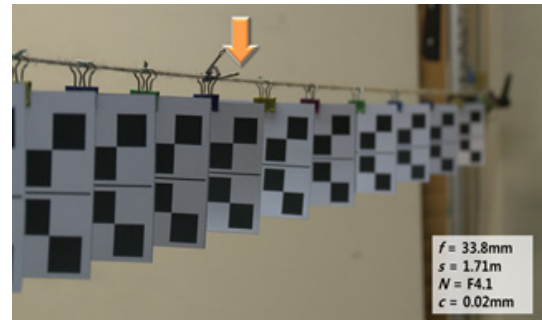
그림 10(b)와 그림 10(c)에서 보듯이 본 논문에서 제안한 심도 일치화 방법으로 주-부 영상 모두 동일한 물체에 초점이 맺힌 것을 확인할 수 있다. 그림 10의

표 3. 주-부 카메라의 심도 보정 결과 (m)
Table 3. DOF calibration results for near objects.

	D_n	D_f	DOF
주 카메라	1.058	1.698	0.641
부 카메라	1.055	1.694	0.639



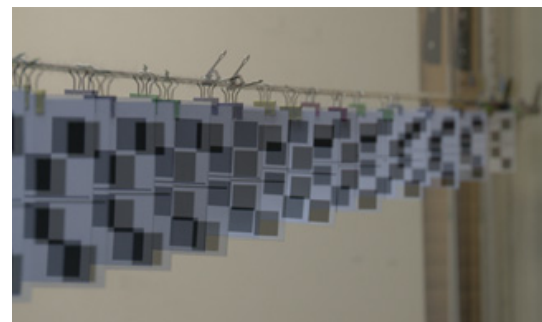
(a)



(b)



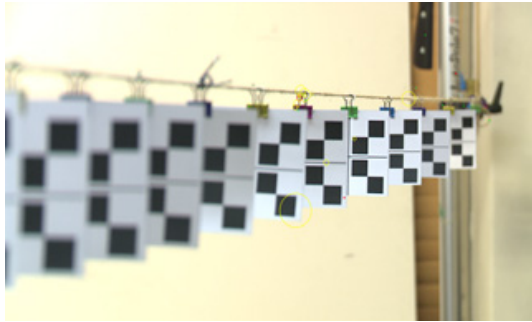
(c)



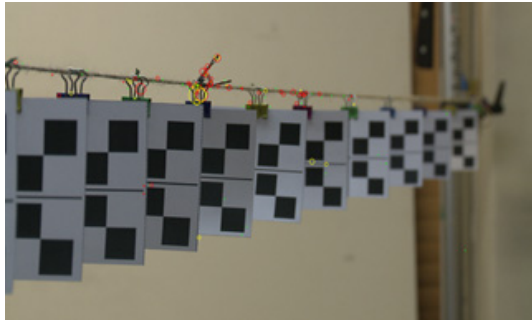
(d)

그림 9. 원거리에 대한 심도 일치화 실험 (a) 주카메라 심도보정 전 (b) 주카메라 심도 보정 후 (c) 부 카메라 영상 (기준영상) (d) 주-부 카메라의 합성 영상

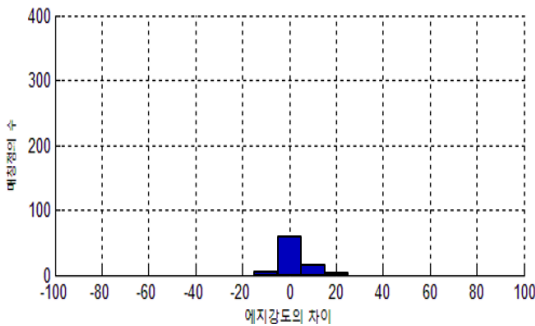
Fig. 9. DOF experiment for close range (a) Before and (b) After DOF correction of the main camera (c) Image of the sub-camera (d) Stereoscopic images acquired from the camera.



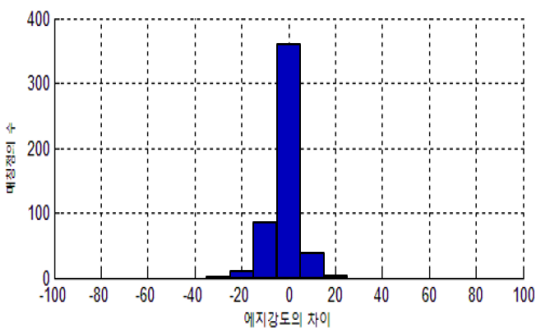
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 10. 에지강도 측정을 통한 주-부 영상의 심도오차 비교 (a) 심도 보정 전과 (b) 후의 에지(edge)강도의 차이 (c) 보정전과 (d) 후의 에지강도의 히스토그램

Fig. 10. DOF comparison using edge strength measurement. Edge strength of (a) before and (b) after correction. Edge histogram of (c) before and (d) after correction.

표 4. 주-부 카메라의 심도 보정 결과 (m)

Table 4. DOF calibration results for near objects.

	D_n	D_f	DOF
주 카메라	1.532	1.955	0.423
부 카메라	1.525	1.946	0.421

심도오차 비교 GUI에서도 심도 일치화 결과를 확인할 수 있다. 심도오차 보정 이후 주-부 영상 사이에 매칭된 특징점들에 대한 에지강도를 비교하였을 때 전반적으로 유사한 에지강도가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 두 카메라 영상 사이의 심도가 매우 정확하게 일치되었음을 의미한다. 표 4에서는 실험의 결과로 전방피사계 심도는 약 1.53m, 후방피사계 심도는 약 1.95m이었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 서로 다른 광학특성을 가진 이중 스테레오 카메라의 심도를 일치시키기 위한 연구내용과 그 결과를 제시하였다. 이중 스테레오 카메라의 심도를 일치시키기 위해서는 먼저 표준카메라인 부 카메라의 초점거리와 물체거리 그리고 F-번호를 3차원 입체영상 획득을 위한 최적의 상태로 설정한다. 이어서 오프라인 단계에서 미리 보정을 통해 획득한 줌 LUT를 이용하여 주-부 카메라 사이의 줌을 일치시킨다. 줌 일치를 통해 주-부 카메라 각각의 초점거리가 결정되고 나면 두 카메라의 심도를 일치시키기 위해 III절에 소개된 방법을 사용하여 물체의 거리 및 렌즈의 F-번호를 자동으로 결정한다. 근거리 및 원거리에 대한 심도 일치화 실험을 통해 본 논문에서 소개한 방법의 정확성을 검증하였다.

REFERENCES

[1] H. C. Lee, "3D video and human factor," The institute of Electronics Engineers of Korea, vol. 37, No. 9, pp. 960-968, Sept. 2010.
 [2] 3Ality, <http://3alitydigital.com/>
 [3] Sony, <http://pro.sony.com/>
 [4] J. Knight, I. Reid, "Active visual alignment of a mobile stereo camera platform," in Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation

(ICRA), San Francisco, USA, April 2000.

- [5] P. Surman, I. Sexton, K. Hopf, W. K. Lee, E. Buckley, G. Jones, and R. Bates, "European Research into Head Tracked Autostereoscopic Displays," 3DTV Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video, Istanbul, May 2008.
- [6] C. Doutre, M. T. Pourazad, A. Tourapis, P. Nasiopoulos and R. K. Ward, "Correcting Unsynchronized Zoom in 3D Video," in Proceedings of IEEE Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Paris, France, June 2010.
- [7] S. Kumar, C. Micheloni, C. Piciarelli, and G. L. Foresti, "Stereo rectification of uncalibrated and heterogeneous images," Pattern Recognition Letters, vol. 31, No. 11, pp.1445-1452, 2010.
- [8] R. Hartley, and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd ed., Cambridge Univ. press, pp. 202-207, 2004.
- [9] E. K. Jung, S. H. Baek, S. Y. Park, and H. W. Jang, "Optical Properties Correction of a Heterogeneous Stereoscopic Camera," Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea, vol. 49, No. 11, pp. 74-85, 2012.
- [10] E. Trucco and A. Verri, *Introductory techniques for 3-D computer vision*, Prentice hall, pp. 21, 1998.
- [11] O. Grau, M. Muller, and J. Kluger, "Tools for 3D-TV Programme Production," 3DTV Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video, Antalya, May 2011.
- [12] H. Bay, T. Tuytelaars and L. V. Gool, "SURF: Speeded up robust features," In Proceeding of European Conference on Computer Vision (ECCV), Graz, May 2006.

— 저 자 소 개 —



최 성 인(학생회원)

2007년 2월 금오공과대학교 컴퓨터공학부 졸업 (공학사)

2009년 8월 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 졸업 (공학석사)

2009년 9월~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 박사과정

<주관심분야 : 3차원 정합 및 복원, 로봇위치인식>



박 순 용(정회원)

1991년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학사)

1993년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학석사)

2003년 5월 미국 뉴욕주립대학교 스토니브룩 졸업 (공학박사)

1993년~1999년 한국원자력연구소 로봇개발연구실 선임연구원

2004년~2005년 한국전자통신연구원 디지털콘텐츠연구단 선임연구원

2005년~현재 경북대학교 컴퓨터학부 부교수

<주관심분야 : 3차원 컴퓨터비전 및 로봇비전>