

# 스테레오 적외선 조명 및 단일카메라를 이용한 3차원 환경인지

## 3D Environment Perception using Stereo Infrared Light Sources and a Camera

이 수 용\*, 송 재 복  
(Sooyong Lee and Jae-Bok Song)

**Abstract:** This paper describes a new sensor system for 3D environment perception using stereo structured infrared light sources and a camera. Environment and obstacle sensing is the key issue for mobile robot localization and navigation. Laser scanners and infrared scanners cover 180° and are accurate but too expensive. Those sensors use rotating light beams so that the range measurements are constrained on a plane. 3D measurements are much more useful in many ways for obstacle detection, map building and localization. Stereo vision is very common way of getting the depth information of 3D environment. However, it requires that the correspondence should be clearly identified and it also heavily depends on the light condition of the environment. Instead of using stereo camera, monocular camera and two projected infrared light sources are used in order to reduce the effects of the ambient light while getting 3D depth map. Modeling of the projected light pattern enabled precise estimation of the range. Two successive captures of the image with left and right infrared light projection provide several benefits, which include wider area of depth measurement, higher spatial resolution and the visibility perception.

**Keywords:** range sensing, infrared camera, stereo structured light sources

### I. 서론

기술의 발전과 함께 로봇은 더 많은 능력을 요구 받게 된다. 로봇은 인간이 접근하기 힘든 유해환경이나 심해 또는 우주에서의 관측, 탐사는 물론 주어진 임무를 수행하고 있으며, 그 기능은 더욱 세분화, 정밀화, 다양화되고 있다. 이러한 기능의 구현을 위한 핵심 기술중의 하나는 거리감지이다. 다양한 3차원 영상처리 알고리즘 개발이 활발히 진행되고 있으며, 좀더 정확하고, 저렴하며, 다양한 환경에 적용 가능하도록 하는 노력이 경주되고 있으나, 기존 기술의 대부분은 이러한 목표들을 모두 동시에 만족시키지는 못하고 있다.

본 논문에서는 영상과 영상 사이의 변화로부터 정보를 추출하는 프레임 간 영상 처리 기법과는 달리, 한 장의 영상을 이용한 프레임 내 영상 처리 기법의 한 방법으로서 스테레오 적외선 패턴과 단일 카메라를 이용한 3차원 환경인지센서 개발에 관한 연구를 기술하였다. 체스보드 모양의 패턴을 사용함으로써 패턴 제작을 용이하게 하였고, 영상평면 위에 촬영된 적외선 패턴의 인식을 위한 영상처리 과정에서 발생할 수 있는 패턴의 왜곡을 최소화 하였다. 또한, 기존의 거리영상 구현을 위한 장비들이 고가이거나 많은 계산량이 필요한 단점이 있는 반면, 본 연구에서는 USB카메라와 적외선 LED를 사용하여 저가형의 실시간 거리영상 획득이 가능한 장비를 개발하였다.

Pages 등은 3D 거리 지도를 작성하기 위한 다양한 코드화된 조명 투사 방법에 대해 소개하고, 각 패턴의 특징을 분석하여 적합한 측정 표면이나 환경 조건에 대해 기술하였다[1].

Gokturk와 Oggier, Weingarten 등은 3D 거리지도를 구현하기 위한 다른 방법의 하나로서 CMOS 센서 기반의 time-of-flight (TOF) 방법을 설명하고[2-4], Um은 Phong의 조명이론을 기반으로 IPA (Infrared Proximity Array) 센서를 이용하여 광도와 광센서의 에너지 방정식 관계를 이용한 거리 측정 방법을 제시하였다[5]. Kawasaki 등은 프로젝터에 레이저 포인터를 장착하여 자가보정 알고리즘을 구현하여 선행 보정의 단계를 생략함으로써 설치의 용이함과 사용상의 편의를 제공하는 연구를 진행하였다[6].

본 연구에서 단일 카메라를 이용한 3D 지도 구현을 위해 체스보드 형상의 패턴을 사용한 것과 유사하게 구조광 패턴의 형태에 대한 연구가 진행 되었다. Hartrumpf과 Munser는 원형 패턴을 이용한 방법[7], Saeed와 Zhang은 십자선 모양의 패턴을 이용한 방법[8], Fisher 등은 막대를 이용하여 공간광에 의해 생성되는 그림자의 형상을 분석하는 방법을 사용하는 연구를 진행하였으며[9], Lee 등에 의해서는 DMD (Digital Mirror Device)를 이용하여 다양한 패턴을 생성해 이를 입체 거리센서에 적용하는 연구를 진행 하였다[10].

본 논문에서는 패턴의 고유위치를 추정하기 위해 여러 가지 필터링 기법을 소개하였는데, 이와는 달리 Reiss 등은 5개의 기본 패턴 조합에 의한 패턴의 고유위치 추정 방법을 기술하였다[11]. 또한, 3차원 영상 알고리즘을 처리하는데 있어서 가장 큰 문제인 데이터의 양과 처리 시간을 줄이기 위한 하드웨어적 접근방법을 Ryu 등은 제시하고 있다[12]. 단일 카메라와 하나의 적외선 패턴을 사용한 거리측정시스템에 관한 연구가 이루어졌으며[13], 패턴의 기하학적 모델링이 소개되었다.

이 논문에서는 단일 카메라와 스테레오 적외선 패턴을 이용한 입체거리 지도 작성 개념을 II장에서 소개하고, III장에서는 스테레오 적외선 패턴을 활용한 환경인식 실험 결과를 기술하였다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 1. 30., 채택확정: 2009. 2. 25.

이수용: 홍익대학교 기계시스템디자인공학과(sooyong@hongik.ac.kr)

송재복: 고려대학교 기계공학과(jbsong@korea.ac.kr)

※ 이 연구는 지식경제부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구 개발사업(인간기능 생활지원 지능로봇 기술개발사업)의 일환으로 수행되었음.

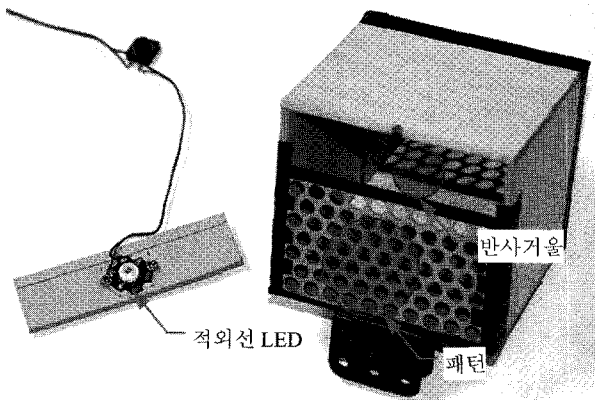
II. 하드웨어의 구성과 기하학적 모델링

본 연구에서는 구조광 패턴을 생성하기 위하여 체스보드 형상의 패턴, 850nm 파장의 적외선 LED와 거울을 사용하여 그림 1과 같은 패턴 생성장치를 제작하여 사용하였다. 패턴 생성장치의 크기를 줄이기 위하여 내부 거울을 사용하여 LED로부터 패턴까지의 거리를 늘릴 수 있었다.

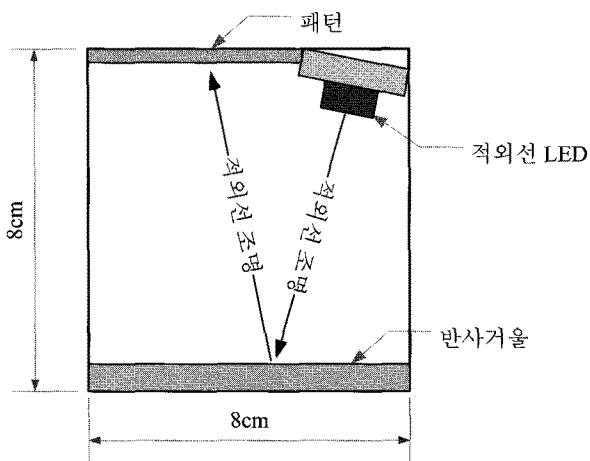
적외선 패턴을 촬영하기 위하여 그림 2와 같은 USB 카메라를 사용 하였으며, 카메라 내부에 설치된 적외선 차단 필터를 제거한 후, 850nm이외 파장의 빛을 차단시켜주는 대역 통과 필터를 렌즈 앞부분에 설치하여 주위 광원에 의한 왜란을 최소화 하였다.

조명장치와 카메라는 그림 3과 같이 각각 두 직교 축 방향으로 tilt되어 있으므로 카메라와 피사체까지의 거리에 따라 이미지에서의 적외선 패턴의 위치가 변한다. 뿐만 아니라, 이미지로부터 각 셀의 중심 좌표와 크기, 밝기의 정보를 얻을 수 있으며, 이를 이용해 셀의 고유 ID 인식과 셀까지의 거리를 측정하는데 활용하게 된다.

본 논문에서는 패턴을 구성하는 하나의 격자를 셀로 부르며, 하나의 셀은 다수의 pixel들로 구성된다. 사용된 카메라는 640×480 개의 pixel을 갖는다. 그림 4에는 각 셀의 구별을 위한 색인  $i$ 와  $j$ 의 정의와 범위를 나타내었다.



(a) Component



(b) Design

그림 1. 적외선 조명 및 패턴 생성장치.

Fig. 1. Infrared structured light projector.

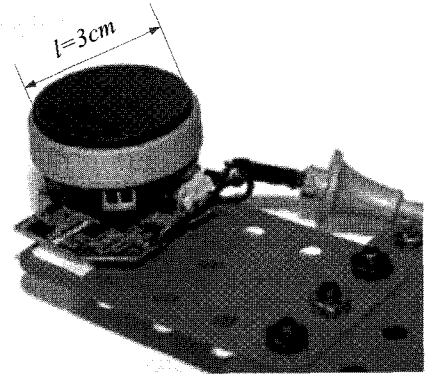


그림 2. USB 카메라와 대역통과 필터.

Fig. 2. USB camera with band-pass filter.

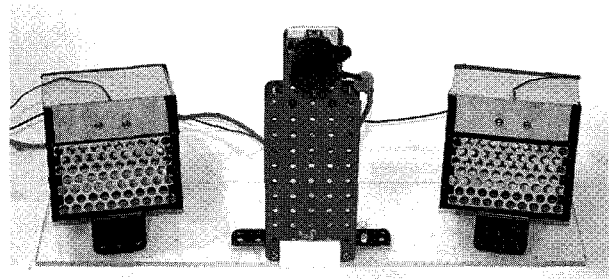


그림 3. 스테레오 적외선 패턴 생성 및 촬영 시스템.

Fig. 3. Infrared structured light projector (stereo) and a camera.

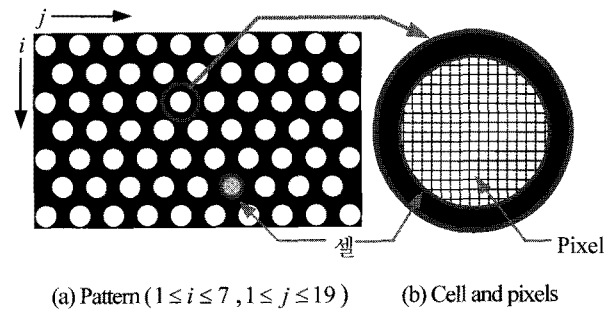


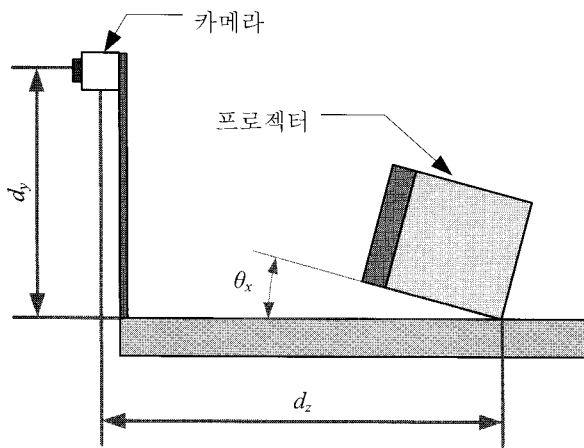
그림 4. 셀과 pixel의 정의.

Fig. 4. Definition of a cell and a pattern.

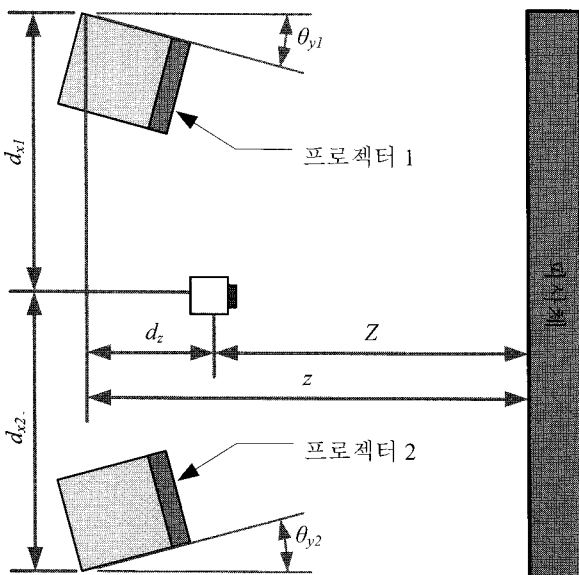
영상평면 상의 pixel좌표를 전역좌표상의 거리 좌표로 변환하기 위해서는 프로젝터에 의해 생성된 패턴 중 한 셀의 전역좌표와 이미지로부터 측정된 셀의 중심좌표간의 관계를 구해야 하고, 이를 위해 장치된 하드웨어 중 영상평면을 기준으로 패턴의 셀들이 어떻게 평행이동과 회전변환 되었는지 기하학 모델링을 통해 추정하였다. 그림 5에 모델링 정립을 위해 사용된 매개변수들을 표시하였으며, 그 값들을 표 1에 나타내었다.

하나의 프로젝터를 사용할 때 이미지상의 각 셀의 위치와 전역 좌표의 위치에 관한 관계는 [13]에 자세히 서술되었으며, 이 연구와의 차이점은 좌측, 우측 프로젝터에 대한 매개변수이다. 따라서 본 논문에서는 기하학 모델링에 대한 서술은 생략한다.

Pixel 좌표 추정식을 이용하여 모든 셀에 대해 거리



(a) Side view



(b) Top view

그림 5. 실험 장치의 구성과 매개변수의 정의.  
Fig. 5. Experimental setup and definition of parameters.

표 1. 매개변수.

Table 1. Parameters.

$d_{x1}$ [mm]	$d_{x2}$ [mm]	$d_y$ [mm]	$d_z$ [mm]
195	195	114	90
$\theta_{y1}$ [°]	$\theta_{y2}$ [°]	$\theta_x$ [°]	$f'$ [mm]
11.5	11.5	6.6	233

50-200cm까지 10cm간격으로 셀 좌표의 이동을 추정하여 보면 그림 6과 같은 결과를 얻을 수 있다. 이로부터 각각의 셀은 거리에 따라 영상평면 위에서 다수의 셀들과 중복되어 인식 될 수 있고, 주변부보다는 중앙부에서, 먼 거리보다는 가까운 거리(셀 좌표의 변화폭이 큼)에서 셀이 중첩될 확률이 높음을 계산에 의하여 구할 수 있다.

이미지프로세싱에 의해 인식된 셀들이 실제 어떠한 특성을 가지고 영상평면에서 거동을 하는지 파악하기 위해 프로젝터에 설치된 셀의 위치 별로 고유 ID를 부여하는 labeling

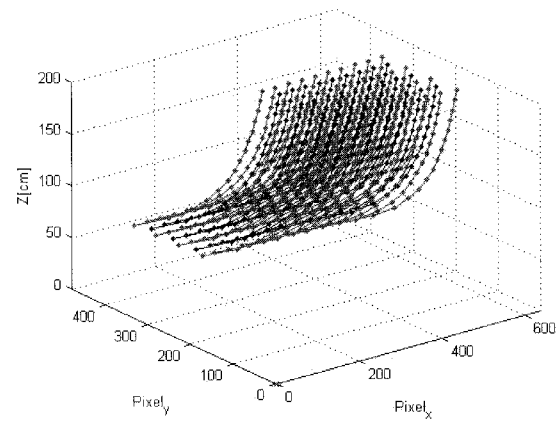


그림 6. 셀의 거리 별 pixel 좌표 변화 추정.  
Fig. 6. Estimation of pixel coordinates according to distance.

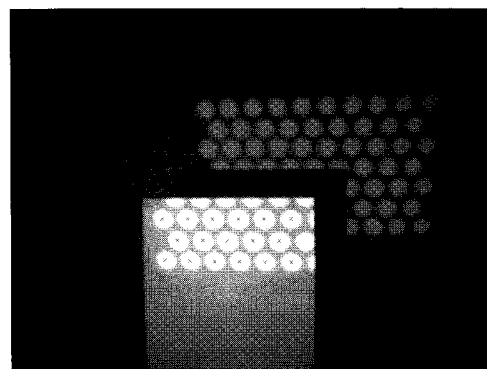


그림 7. 패턴이 투영된 적외선 이미지와 셀 정보.  
Fig. 7. Projected infrared light pattern.

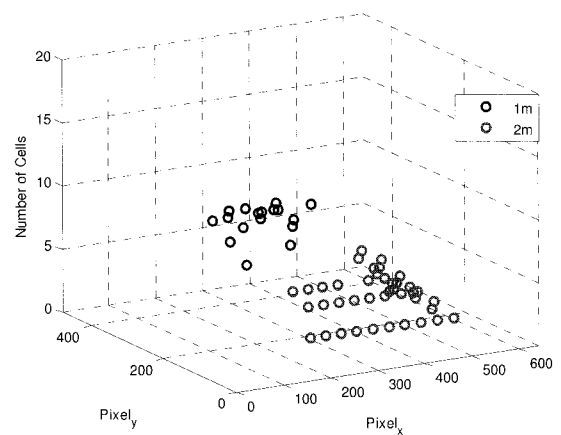


그림 8. 셀에 따른 추정 가능한 ID의 수.  
Fig. 8. Number of possible IDs for cells.

이 필요하다.

한 셀의 고유 ID 인식은 영상평면 위 한 셀의 중심좌표와 이 셀에 해당하는 ID의 pixel좌표 추정결과가 얼마나 정확하게 일치하는가에 의존한다. 즉 하나의 셀에 어떠한 ID들이 부여될 수 있는지 확인해 보는 것이 중요하며, 이러한 ID와 셀의 적합 정확도가 높을수록 정확한 identification이 이루어질 수 있음을 의미한다.

ID labeling과 그 결과를 이용한 입체 거리 지도를 형성하

기 위하여 그림 7과 같이 1m와 2m 거리에 벽을 세운 후 실험하였다. 촬영된 이미지로부터 각 셀의 중심좌표와 밝기, 면적의 정보를 구할 수 있으며, 거리에 따라 그 특성이 변화함을 확인 할 수 있다.

Pixel좌표 추정식을 이용하여 인식된 모든 셀들에 대해 위치 가능한 ID의 수를 추정하여 보면 그림 8과 같고, 결과에서 확인할 수 있듯이 한 셀당 추정 할 수 있는 ID들의 수가 매우 크므로 이를 해결하기 위한 별도의 필터링 알고리즘을 필요로 한다.

본 논문에서는 [13]에서 제시된 바와 같이 일정 pixel 범위 내에 위치한 셀들에 대해 서로 이웃한 것으로 판단하고 이들의 ID를 re-labeling하는 필터링 방법을 사용하였다.

**III. 스테레오 패턴을 사용한 환경 인식 실험**

스테레오 패턴을 사용하여 면적과 밝기를 이용한 필터링, 이웃한 셀의 ID labeling 알고리즘을 적용한 결과는 그림 9와 같다. 앞의 실험에서와 마찬가지로, 1m와 2m 거리에 장애물이 위치하며, 동일한 카메라 위치에서 좌측, 우측의 적외선 패턴을 각각 사용하여 셀정보를 얻은 후 이로부터 거리를 구하여 입체 거리지도도를 구한 결과를 나타내었다.

스테레오 적외선 조명을 사용한 방법의 장점은 이미지상의 사용 가능한 셀의 수를 증가시킬 수 있는 것이다. 본 연구에서 제안한 방법은 이미지상의 각 pixel에 대한 거리를 구하는 것이 아니라 다수의 pixel로 이루어진 셀의 중심에 대한 거리를 구하는 것이므로, 하나의 이미지에 사용 가능한 셀의

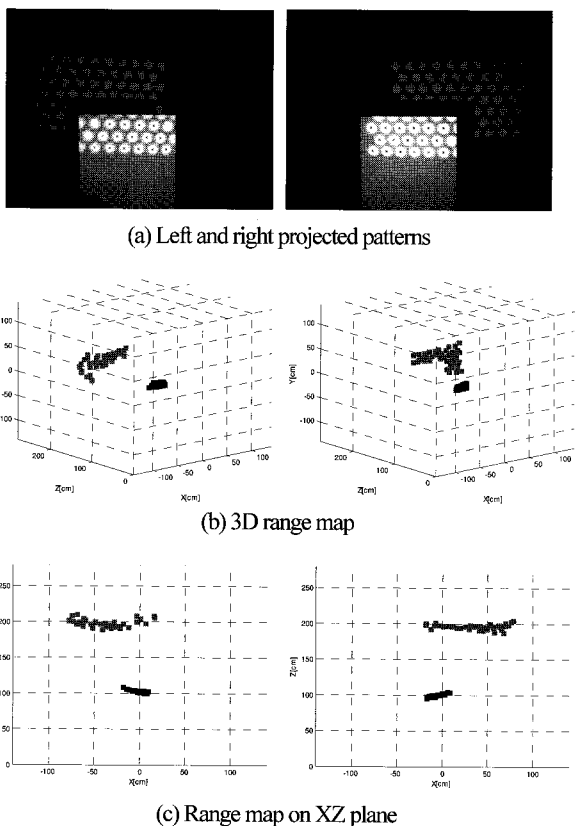


그림 9. 거리측정실험.  
Fig. 9. Range measurement.

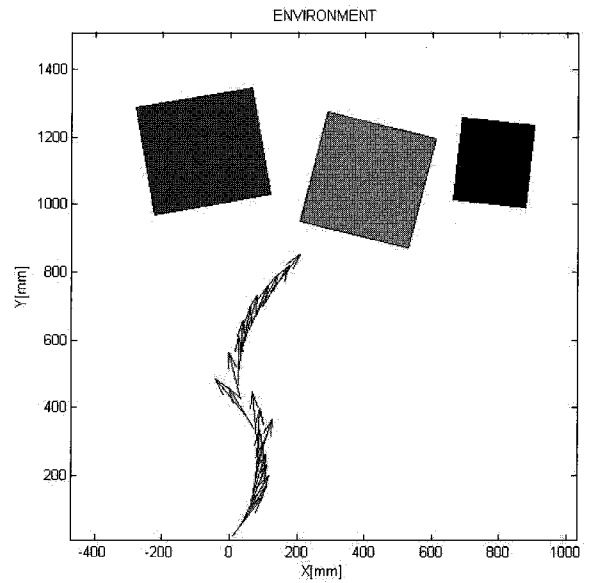


그림 10. 실험환경.  
Fig. 10. Camera movement.

수가 많을수록 공간해상도를 높일 수 있다. 뿐만 아니라 장애물의 형상이 볼록면(convex)형상인 경우, 좌측이나 우측의 조명 하나만 사용하면 visibility로 인해 사각영역이 존재하며 이 영역에 속하는 셀들은 거리추정을 위하여 사용할 수 없다. 따라서, 좌측, 우측의 적외선 조명을 사용하면 이러한 사각영역의 면적을 줄일 수 있으며, 두 이미지를 합성하면 좌, 우 조명을 각각 사용하는 경우에 비하여 훨씬 많은 거리정보를 얻을 수 있다. 뿐만 아니라, 볼록면 형상 장애물로 인한 visibility를 쉽게 추정할 수 있다. 즉 두 개 이미지 차이의 원인이 조명의 visibility이므로, 이미지 차이정보를 사용하여 불연속면이나 convex edge를 쉽게 인식할 수 있다.

이 논문에서 제안한 스테레오 적외선 조명을 사용한 환경 인지센서를 주행로봇에 장착하여 연속적인 측정을 하였다. 이 실험의 결과는 장애물지도 작성이나 경로생성에 그대로 사용할 수 있다. 좌, 우측 적외선 조명을 동시에 사용할 수 없으므로 각각 조명 하나씩만 번갈아 사용한 연속적인 두 개의 이미지를 얻어야 하며, 이때 센서시스템은 그 위치 및 방향의 변동이 없는 제한 조건을 만족해야 한다. 사용된 USB 카메라는 30fps 성능을 갖고 있으므로 이론적인 두 개의 image 사이의 최소 시간차는 1/30초이다. 실내 주행로봇의 주행속도를 고려하면 이 제한조건을 충분히 만족하는 것으로 가정한다. 두 조명을 동시에 사용하면서 각 조명으로 인한 각 패턴의 cell을 정확히 identification할 수 있다면 두 개의 연속된 이미지를 얻을 필요 없이 하나의 image로부터 필요한 모든 정보를 얻을 수 있을 것이다.

실험환경은 그림 10과 같다. 센서시스템 중심의 위치 및 방향은 화살표의 시작점과 방향으로 나타내었다. 각 장애물의 크기는 그림에 나타낸 바와 같으며 장애물의 높이는 좌측 장애물부터 각각 440mm, 528mm, 837mm이다.

각 지점에서 좌측, 우측 조명을 사용한 경우와 대역통과필터를 제거한 상태에서 얻은 환경이미지를 그림 11에 정리하였다.

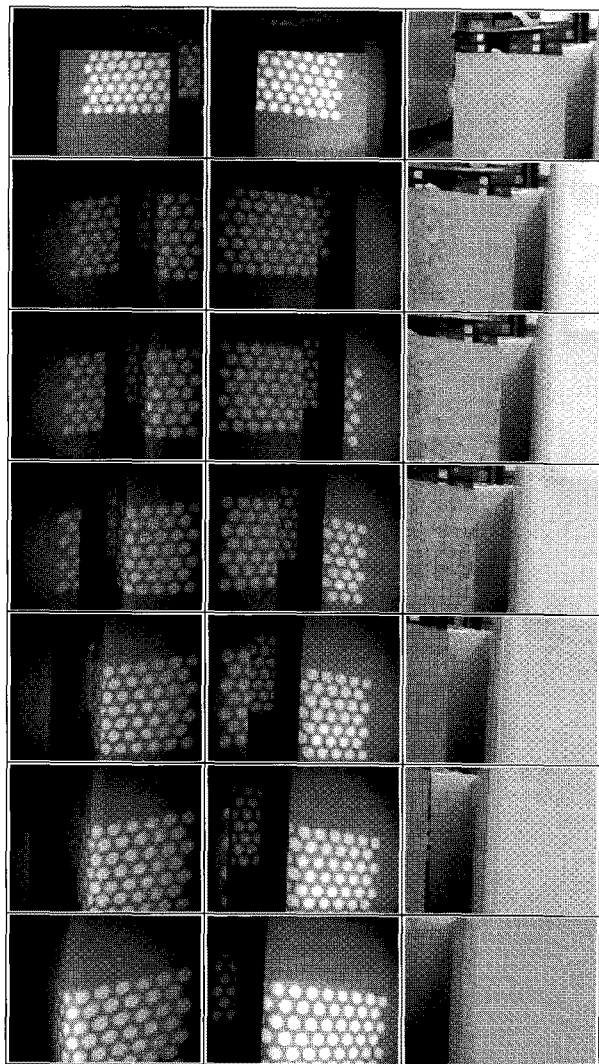
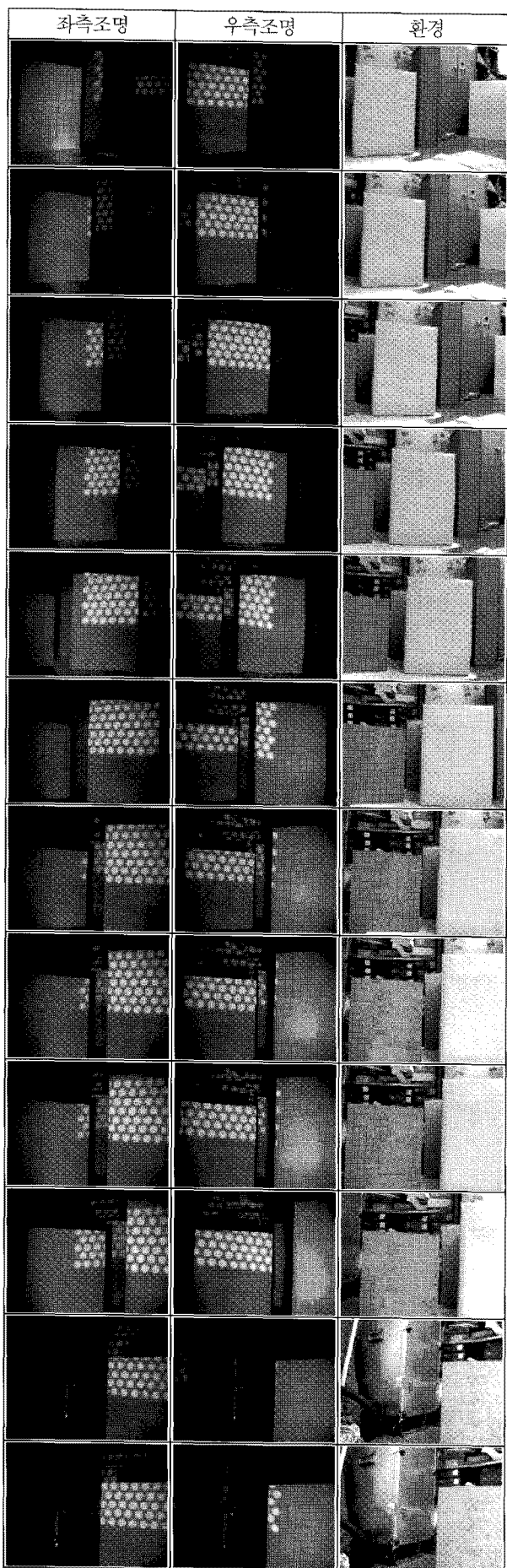


그림 11. 환경인지 실험결과.

Fig. 11. Experiment results.

**IV. 결론**

본 논문에서는 단일 카메라와 스테레오 적외선 패턴을 이용한 입체거리 지도 작성 방법을 설명하였다. 기존의 단일 카메라를 이용한 3D 지도 작성에서 셀의 고유 위치 인식을 위해, 셀 자체에 특정한 표식을 이용하거나 코드화하던 방법과는 달리, 제작이 용이한 셀 형상을 사용하였다. 좌, 우측 스테레오 적외선 패턴을 이용하였기 때문에 거리측정 해상도를 높이고, 불특정형상의 장애물을 쉽게 인식할 수 있는 장점을 실험을 통하여 확인 하였다.

**참고문헌**

- [1] J. Pages, J. Salvi, R. Garcia, and C. Matabosch, "Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling" *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, vol. 1, pp. 133-138, Sep. 2003.
- [2] S. B. Gokturk, H. Yalcin, and C. Bamji, "A time-of-flight depth sensor - system description, issues and solutions" *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW'04)*, pp. 35- 43, June 2004.
- [3] T. Oggier, P. Seitz, and N. Blanc, "Miniaturized all-solid-state

- 3D camera for real-time range imaging" *Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop, National Institute of Standards and Technology(NIST)*, E.R. Messina and A.M. Meystel, Gaithersburg, USm Aug. 2004.
- [4] J. W. Weingarten, G. Gruener, and R. Siegwart, "A state-of-the-art 3D sensor for robot navigation" *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, pp. 2155-2160, Oct. 2004.
- [5] D. Um, W. N. P. Hung, "A novel infrared proximity array sensor for 3D visual sensing: Modeling and applications" *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, Dec. 2006.
- [6] H. Kawasaki, Y. Ohsawa, R. Furukawa, and Y. Nakamura, "Coded structured light based uncalibrated stereo system" *ICCV2005 International Conference on Computer Vision*, 2005.
- [7] M. Hartumpf and R. Munser, "Optical three-dimensional measurements by radially symmetric structured light projection" *Applied Optics*, vol. 36, no. 13, pp. 2923-2928, May 1997.
- [8] G. Saeed and Y. M. Zhang, "Weld pool surface depth measurement using calibrated camera and structured-light" *Measurement Science and Technology*, vol. 18, no. 8, pp. 2570-2578, Aug. 2007.
- [9] R. B. Fisher, A. P. Ashbrook, C. Robertson, and N. Wergli, "A low-cost range finder using a visually located, structured light source" *Proceedings of the 2nd international conference on 3-D digital imaging and modeling (3DIM'99)*, pp. 24-33, Oct. 1999.
- [10] S. H. Lee, J. M. Choi, S. M. Baek, B. C. Jung, C. S. Choi, H. M. Kim, J. T. Oh, S. S. Oh, D. S. Kim, and J. K. Na, "A 3D IR Camera with variable structured light for home service robots", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1859-1864, April 2005.
- [11] M. L. L. Reiss, A. M. G. Tommaselli, C. N. C. Kokubum, "A low cost structured light system" *WSCG International Conferences in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision(Winter School of Computer Graphics)*, 2005.
- [12] J. H. Ryu, S. H. Yun, K. J. Song, J. D. Cho, J. M. Choi, and S. H. Lee, "High speed 3D IR scanner for home service robots" *IEICE Transactions of Fundamentals*, vol. E89-A, no. 3, pp. 678-685, March 2006.
- [13] 김인철, 이수용, "적외선 조명 및 단일카메라를 이용한 입체거리 센서의 개발," 제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지, 제14권 제10호, pp. 1005-1013, 2008.



#### 이수용

1989년 서울대학교 기계공학과(공학사).  
1991년 서울대학교 기계공학과(공학석사).  
1996년 MIT 기계공학과(공학박사). 1996년  
~1999년 한국과학기술연구원 선임연구원.  
2000년~2003년 Texas A&M대학 기계공학과  
교수. 2003년~현재 홍익대학교 기계  
시스템디자인공학과 부교수. 관심분야는 Robotics.



#### 송재복

1983년 서울대학교 기계공학과(공학사).  
1985년 서울대학교 기계공학과(공학석사).  
1992년 MIT 기계공학과(공학박사).  
1993년~현재 고려대학교 기계공학과 교수.  
2005년~현재 고려대학교부설 지능로봇  
연구센터 소장. 관심분야는 Navigation,  
Design/Control of Robot systems.