

논문 2015-52-4-23

스테레오 감마선 탐지장치를 이용한 감마선원 분포측정 시스템에 관한 연구

(The Study Image Aquisition System for Radiation Source Using the Stereo Gamma-ray Detector)

황 영 관*, 이 남 호*, 이 승 민**

(Young-Gwan Hwang, Nam-Ho Lee, and Seung-Min Lee[©])

요 약

전 세계적으로 전력생산을 위해 원전 증설이 지속적으로 증가하고 있으며 이에 따라 노후 원전에 대한 해체 및 원전사고에 대한 관심이 증가하고 있다. 원전 사고 시 발생하는 감마선원의 누출은 신속하고 정확한 탐지해야 그 피해를 최소화 시킬 수 있다. 기 개발된 장비는 선원에 대한 방향정보만을 나타내고 있어 정확한 공간상의 분포를 알 수 없다. 본 논문에서 개발한 스테레오 감마선 탐지장치는 누출된 감마선원에 대한 분포를 측정할 수 있도록 구현하고 거리탐지를 위한 알고리즘을 적용하였다. 거리탐지를 위하여 스테레오 보정을 LED광과 보정패턴을 사용하여 진행하였고, LED 광원과 감마선원을 대상으로 성능시험을 진행하였다. 성능시험 결과 두 실험에서 5%이하의 오차를 갖게 됨을 확인하였다. 본 논문의 결과는 향후 고속 경량화 된 감마선 영상화 장치 개발을 위한 자료로 활용될 것이다.

Abstract

Nuclear power plant has increased continuously for power production in all over the world and the interest about nuclear accident and the dismantling of aging nuclear power plant has been a growing. The leaked radioactive source that is generated by radiation accidents must detect and remove to minimized the damage as soon as possible. Gamma-ray detection system that have been developed until now cannot provide the precise position of radioactive sources because they detect and imaging the position of radiation sources in just two dimensions. In this paper, stereo gamma ray detection system has developed and the algorithm for calculation of the distance has implemented to be able to measure the distribution of the leakage gamma ray source for the system. Stereo camera calibration for distance detection was conducted with the correction pattern and LED light and we carried out performance test of the system for the LED light source and a gamma ray source. In both experiments the results of the performance test, it was confirmed to have a 5% error. The results of this paper is used as a material for the development of gamma-ray imaging device.

Keywords : Gamma-ray imaging system, Gamma camera, Stereo calibration

* 정회원, 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부
(Korea Atomic Energy Research Institute)

** 정회원, 충남대학교 전기전자통신공학교육과
(Department of Electrical and Electronic Communication
Education, ChungNam National University)

© Corresponding Author(E-mail: zbus@cnu.ac.kr)

※ 본 논문은 국방과학연구소 민군기술협력센터의 지원으로 수행된 연구임

Received ; January 23, 2015 Revised ; March 22, 2015

Accepted ; April 1, 2015

I. 서 론

전 세계적으로 전력공급을 위해 원전의 증설이 지속적으로 이루어지고 있으며 2014년 12월을 기준으로 운전 중인 원전은 438기, 건설 중인 원전은 71기이며, 계획 중인 원전이 174기이다. 이와 함께 운전을 영구중지하여 해체를 예상하고 있는 원전도 149기에 달해있으며

향후에는 노후로 인한 운전중지 기수도 증가할 것으로 예상된다. 원전 산업계가 예상하는 노후 원전 해체 시장 규모는 2050년까지 원화기준 약 1,000조원을 넘어서지만 원전 해체 시 발생할 수 있는 감마선 누출에 의한 위험성이 매우 크기 때문에 원전 해체에 대한 기술개발 역시 어려움을 갖게 된다. 또한, 2011년 일본의 후쿠시마 원전사고와 같은 예상치 못한 원전 사고 시 감마선 누출로 인한 환경 재앙이 발생할 수 있다.

이러한 감마선 누출은 초기의 신속한 대응이 절대적으로 필요하며 이를 위해서는 누출된 감마선원에 대한 탐지와 오염된 선원의 분포 측정 및 원전 작업자가 명확하게 누출 감마선을 확인 할 수 있는 영상화/가시화 장치가 필수적이다.

현재까지 개발된 대표적인 감마선 영상화 장치는 BIL사에서 개발한 RadScan, Antech에서 개발한 RadSearch와 같은 스캔형 탐지장치와 Canberra사의 Cartogam, Gampix와 같은 고정형 탐지장치가 대표적으로 활용되고 있다^[1~3].

스캔형 탐지장치는 원통형 콜리메이터를 통해 감마선 센서를 이용하여 래스터(Raster) 방식으로 공간을 탐색하여 2차원 감마선 영상을 생성하며, 고정형 탐지장치는 편홀 콜리메이터 또는 부호화된 콜리메이터(Coded Aperture Collimator)와 광신호 증폭장치 그리고 CCD(Charge Coupled Device)를 통해 2차원 영상을 직접 획득한다. 스캔형 탐지장치는 래스터 방식으로 공간을 스캔하며 영상을 생성하기 때문에 고정형 탐지장치에 비해 탐지 시간이 오래 걸리며, 생성된 2차원 영상의 화소수가 적다는 단점이 있지만, 원통으로 공간상의 점에 대한 신호를 취득하기 때문에 정확한 위치탐지가 될 수 있다는 장점이 있다. 이에 반해 고정형 장치는 2차원 영상을 직접 획득하기에 단 시간에 선원분포를 탐지할 수 있는 장점이 있지만 선원의 분포가 넓게 퍼져 있을 경우 선원간의 간섭이 발생할 수 있으며, 부호화된 콜리메이터 적용 시에는 고선량에 대한 측정이 어렵다는 단점이 있다^[4~7].

기 개발된 감마선 영상화 장치는 노후 원전 해체 및 감마선 원전 사고 시 누출되는 감마선원에 대한 제염작업에 매우 유용하게 활용되고 있으나, 국내에서는 관련 기술이 부족하고 외국 장치의 경우 수역에 이르는 고가에 시판되고 있어 국내의 기술 개발이 필요하다.

본 논문에서는 정확한 감마선 분포를 측정할 수 있는

포인트 스캔형 탐지장치 방식을 기반으로 고속 측정이 가능하며 2차원 영상으로 제공되는 감마선원의 분포정보뿐만 아니라 장치로부터 선원까지의 거리정보를 측정할 수 있는 스테레오 감마선 탐지장치를 개발하고 성능 평가를 위한 실험을 수행하였다. 먼저 시스템의 구성, 검출기 감도, 탐지장치 원형에 대하여 설명하고, 획득된 신호를 이용하여 영상을 생성, 가시광 카메라와 감마선 카메라의 보정을 통한 거리산출 알고리즘 구현 및 실험을 통하여 탐지 장치의 성능을 분석하였다.

II. 본 론

1. 감마선 신호 검출부

스테레오 감마선 탐지장치에 적용되는 감마선 신호 검출부는 그림 1과 같이 원통형 조사구(Collimator), 감마선 차폐체(Radiation Shield)와 검출센서(Scintillation Photo Multiplier Tube Sensor)로 구성된다. 감마선 신호를 탐지하기 위해서는 섬광체를 이용하여 감마선을 빛으로 변환 한 후 고감도 수광센서를 사용하여 신호를 검출하게 되는데 본 장비에 적용된 섬광체는 NaI(Tl)을 사용하였고 수광소자는 Hamamatsu의 소형 PMT(Photo Multiplier Tube)을 적용하였다.

감마선원의 공간분포정보를 2차원으로 획득하기 위해서는 원하는 방향에서 입사되는 정보 취득을 위해 조사구를 구성하였고, 탐지위치 이외의 영역에서 입사되는 신호를 차단하기 위해 납(Pb)으로 섬광검출기를 차폐하도록 구성하였다.

감마선 신호검출을 위한 검출부는 원통형 조사구의 직경 5mm를 적용하여 한국인정기구조로부터 KOLAS

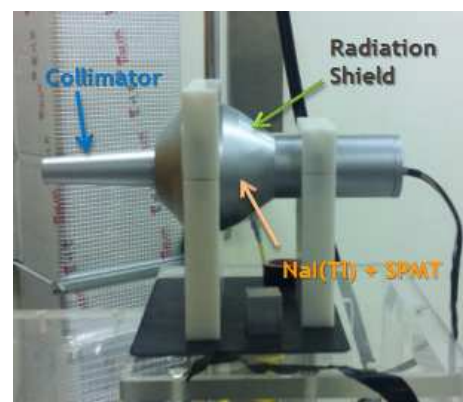


그림 1. 감마선 신호 측정 검출부
Fig. 1. Gamma-ray signal acquisition sensor part.

(Korea Laboratory Accreditation Scheme)인증을 받은 감마선 교정시설을 통해 Cs-137감마선원에 대해 0.1mSv/h~300mSv/h의 조사선량에 대한 선형적인 검출감도를 확인하였다.

2. 스테레오 감마선 탐지장치

감마선원의 공간분포 측정을 위해서는 선원을 포함하는 2차원 영역에 대해 개별적 위치를 래스터 스캔 방식으로 탐지하며 신호를 취득해야 한다. 이렇게 취득된 신호는 탐지장치로부터 획득된 모션제어장치의 위치값과 신호값을 통해 2차원 영상을 생성하게 된다. 이를 위해서 감마선 신호 검출부를 부착한 후 좌우, 상하 방향으로 검출기를 이동시키기 위한 팬/틸트를 적용한다. 그림 2는 팬/틸트를 중심으로 좌우축에 감마선 신호검출부와 가시광 신호 취득을 위한 CCD를 장착한 모습을 보여준다. 팬/틸트 장치는 수평방향으로 최대 66°/sec, 수직방향으로 33°/sec의 속도로 이동이 가능하며, 정밀도는 0.1°로 구현하였다. 탐지장치는 수평방향으로 움직이는 팬축을 중심으로 좌, 우 방사선 카메라가 동일한 간격으로 설치되었고, 수직방향으로 움직이는 틸트축상에 감마선 신호검출기인 섬광체가 위치하도록 구성하였다. 가시광 영상을 획득하는 CCD 카메라는 팬축을 중심으로 방사광 카메라와 동일하게 Baseline을 갖도록 구성하였다.

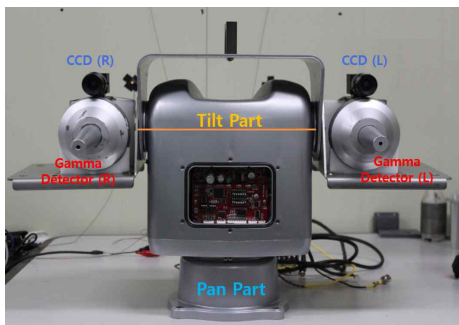


그림 2. 스테레오 감마선 탐지장치
Fig. 2. Stereo radiation detector.

3. 스테레오 감마선 신호 취득 및 영상 생성

스테레오 감마선 탐지장치를 운용하여 감마선 신호를 측정하고 영상화시키기 위해 제작된 통합운용프로그램은 그림 3과 같이 구현하였다. 운용 프로그램에서는 검출 신호를 측정하는 신호측정 모듈의 설정 및 팬/틸트를 제어하는 모션제어 모듈의 입력변수를 설정하고,

탐지하기 위한 영역을 설정할 수 있도록 구성하였다.

감마선 신호 측정은 신호측정 모듈에 설정된 시간에 따라 입력 펄스를 계수하며, 팬/틸트의 엔코더를 이용하여 절대적인 위치값을 입력받는다. 신호측정 모듈과 팬/틸트를 제어하는 모션 제어보드는 동기화시켜 측정 위치에서 신호를 획득할 수 있도록 구성하였다.

그림 4는 감마선 조사시험장에서 탐지장치의 좌측 방사선 센서의 중심부와 감마선원이 일치하도록 설치한 후 탐지신호 획득 및 영상화 실험을 수행한 시설 내부를 보여준다. 그림 5는 그림 4에 표시한 노란색 부분을 스캔하여 측정된 감마선 신호와 팬/틸트의 위치값을 이용하여 나타낸 그래프이다.

그림 5와 같이 팬/틸트의 수직, 수평 위치값에 따라 획득된 신호를 통해 선원의 분포를 확인할 수 있으며 그림의 가장 밝은 부분은 최대 카운트 값이며 이를 Gray Level 영상으로 나타내면 그림 3의 중심부에 있



그림 3. 스테레오 감마선 탐지장치 운용 S/W
Fig. 3. Operating S/W for stereo radiation detector.

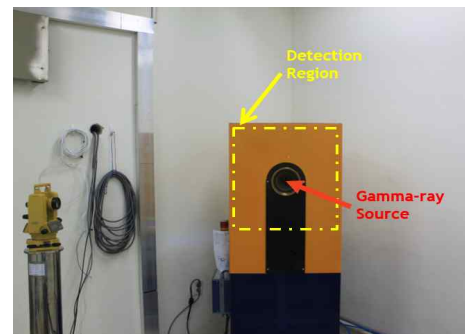


그림 4. 감마선 신호탐지 및 영상화 시험
Fig. 4. Gamma-ray signal acquisition & imaging test.

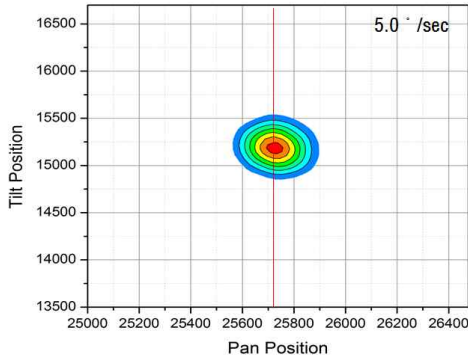


그림 5. 감마선 신호탐지 및 영상화 시험 결과
Fig. 5. Gamma-ray signal acquisition & imaging test result.

는 오른쪽과 같이 영상화 된다.

4. 거리산출을 위한 스테레오 보정

스테레오 감마선 탐지장치를 이용하여 좌우 방사선 카메라를 통해 획득한 2차원 방사선 영상으로부터 선원의 거리정보를 산출할 수 있고, 이를 이용하여 장치를 중심으로 감마선원의 분포 정보를 확인할 수 있다. 선원의 거리를 계산하기 위해서는 스테레오 카메라의 보정을 통한 삼각측량법을 통해 계산할 수 있다. 그러나 방사선 영상만을 이용하여 카메라의 스테레오 보정이 불가능하므로 방사선 센서에 대한 스테레오 보정은 다음의 절차에 따라 진행한다.

- Step 1. 팬/틸트 좌측 방사선 카메라와 가시광 카메라의 Homography 변환관계 계산
- Step 2. 팬/틸트 우측 방사선 카메라와 가시광 카메라의 Homography 변환관계 계산
- Step 3. 좌, 우 가시광 카메라를 이용하여 보정패턴 영상 취득
- Step 4. 보정패턴 영상(20장)을 통한 가시광 카메라 스테레오 보정
- Step 5. Step 1에서 산출한 Homography 변환관계를 Step.3에서 획득한 좌측 가시광 보정패턴 영상에 적용(좌측 방사광 보정패턴 영상생성)
- Step 6. Step 2에서 산출한 Homography 변환관계를 Step 3에서 획득한 우측 가시광 보정패턴 영상에 적용(우측 방사광 보정패턴 영상생성)
- Step 7. 좌, 우측 방사광 보정패턴 영상을 이용하여 방사광 카메라 스테레오 보정

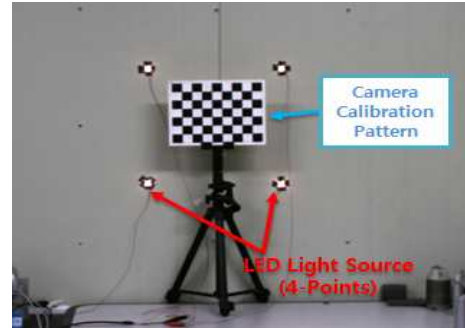


그림 6. 감마선 신호탐지 및 영상화 시험
Fig. 6. Gamma-ray signal acquisition & imaging test.

그림 6은 스테레오 보정을 위해 사용된 보정패턴과 4개의 LED 포인트를 나타낸 그림이다. 그림의 카메라 보정 패턴을 사용하여 가시광에 대한 스테레오 보정을 진행하였으며, 네 점을 이용하여 방사광과 가시광 영상을 획득한 후 방사광 보정 과정을 따라 Zhang's 알고리즘을 이용하여 방사광 센서의 스테레오 보정을 수행하였다^[8~11].

III. 실험

1. 장치 실험 절차

스테레오 감마선 탐지장치의 성능분석을 위한 실험은 LED를 이용한 광원 실험과 Cs-137을 이용한 방사



그림 7. 시스템 보정과정 및 방사선원 거리추출 절차
Fig. 7. Procedure of the system calibration and distance calculation of source.



그림 8. LED 광원을 이용한 거리측정 실험
Fig. 8. Distance calculation test using LED source.

선원 실험으로 진행하였다. 그림 7은 실험을 위한 스테레오 보정 및 성능 시험 절차를 나타낸다.

2. LED 광원을 이용한 거리측정 실험

LED 광원을 이용한 거리 측정 실험은 그림 8과 같이 구성하였고 선원으로부터 거리를 변화시키며 획득된 영상으로부터 거리값을 산출 하였다. 설정된 탐지영역은 가로, 세로 각각 30° 영역을 스캔하여 2차원 영상을 획득하였다.

그림 9는 장치를 이용하여 획득한 방사선 영상을 나타낸 것이며 표 1의 수치는 실제 광원의 위치와 계산된 위치를 나타낸 것으로 4% 이내의 오차를 나타내며 정

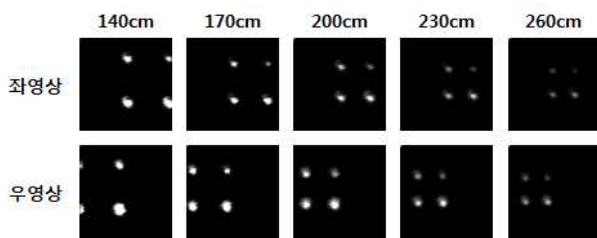


그림 9. LED 광원 거리측정 실험 결과 영상
Fig. 9. Results images for LED Source detection.

표 1. LED 광원 거리측정 결과 데이터
Table 1. Test result data for LED source distance.

Distance	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Avg.	Err.
140cm	140.065	141.949	137.374	147.665	141.763	1.28%
170cm	167.003	160.050	165.306	162.493	163.713	3.70%
200cm	199.515	187.458	192.033	199.320	194.582	2.71%
230cm	221.885	225.448	222.557	221.941	222.958	3.08%
260cm	246.689	250.256	259.365	261.733	254.510	2.11%

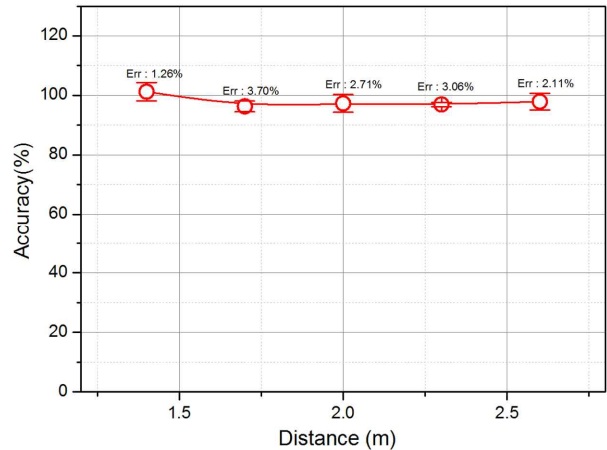


그림 10. LED 광원 거리측정 결과
Fig. 10. Test results for LED source distance.

확한 거리 산출이 가능함을 확인하였다.

3. Cs-137 감마선원을 통한 거리측정 실험

그림 11은 스테레오 탐지장치의 성능 확인을 위해 구성된 감마선 조사실 내부의 모습을 나타낸다. 조사선원은 Cs-137 감마선으로 선량은 2미터 거리에서 4.5mSv/h, 3미터 거리에서 2mSv/h로 조사하며 선원을 탐지하였다. 정확한 실험을 위해 실험 장소는 검교정인 증기관인 KOLAS 인증기관을 통해 조사시험을 수행하였다.

탐지장치와 실험의 조건의 제약으로 인해 2미터, 3미터에 대한 실험을 수행하였으며 그림 12는 감마선원에 대한 스테레오 탐지 영상을 나타낸다. 결과영상을 통해

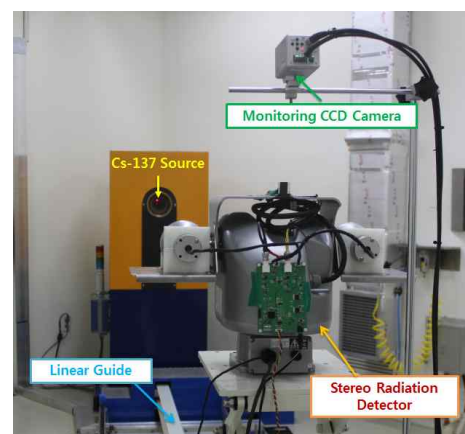


그림 11. 감마선원에 대한 거리측정 시험구성
Fig. 11. Test configuration for distance measurement of gamma-ray.

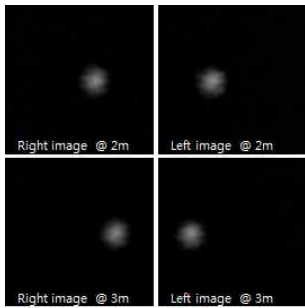


그림 12. 감마선원 탐지 영상
Fig. 12. Detection image for Gamma source.

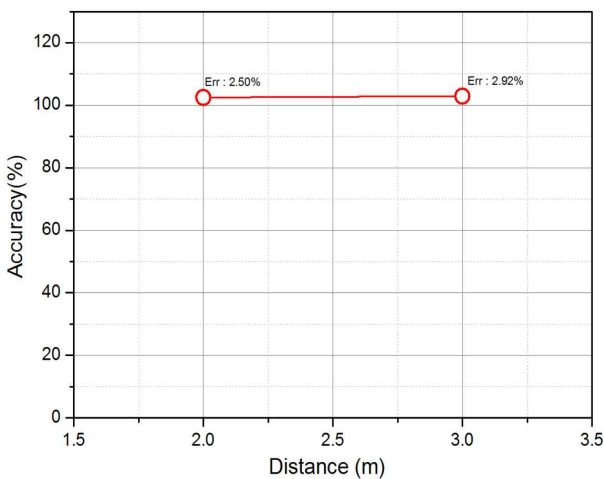


그림 13. 감마선원 거리측정 결과
Fig. 13. Test results for distance of gamma source.

산출한 결과 2미터에서는 약 2.8%의 오차를 나타내며 3미터에서는 약 2.92%의 정확한 거리 산출결과를 확인할 수 있다.

본 실험을 통해 스테레오 감마선 탐지장치의 확인된 정확도는 95% 이상으로 나타났으며 좌우, 상하 20°의 영역을 스캔하는데 소요된 시간은 평균 7분으로 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 원전 해체 및 원전 사고 시 누출된 선원의 빠른 탐지를 위해 선원의 위치를 고속으로 정밀하게 탐색하기 위한 스테레오 감마선 탐지장치를 개발하고 획득된 방사선 영상으로부터 거리를 산출하기 위한 알고리즘을 적용하여 시스템을 구현하고, 그 성능을 검증하였다.

감마선 탐지장치를 이용하여 거리를 측정하기 위해

스테레오 센서에 대한 보정은 LED 광원과 보정패턴을 이용하여 진행하였고, 광원에 대한 거리산출 결과 4% 이내의 오차를 나타내었다.

탐지장치를 이용한 감마선원(Cs-137)에 대한 실험 결과 역시 3%이내의 오차를 나타내며 스테레오 탐지장치의 95% 이상의 정밀도를 확인할 수 있었다.

개발된 스테레오 감마선 탐지장치는 지속적으로 규모가 증가하고 있는 원전해체 분야 및 원자력 사고발생 시 사고처리에 적용이 가능하며 향후 장치의 분해능과 탐지 속도 개선 및 경량화를 위한 연구를 수행할 계획이다.

REFERENCES

- [1] K. A. Hughes and J. A. Lightfoot, "Radscan 600 - A portable instrument for the remote imaging of gamma contamination: Its design and use in aiding decommissioning strategy," in Proc. IEEE Nucl. Sci.Symp. Conf. Rec., vol. 2, pp. 930 - 933, 1996.
- [2] K. A. Hughes, G. Mottershead, D. J. Thornley, and A. P. Comrie, "Use of gamma ray imaging instrumentation in support of TRU waste characterization challenges," in Proc. WM'04 Conf. Rec., 2004.S. X. Wang and A. M. Taratorin, Magnetic Information Storage Technology, Academic Press, 1999, ch. 12.
- [3] Fisher A and Chard P, "Use of a gamma-imaging device to optimise measurement of uranium hold-up", Proc. Of the 25 Annual Safeguards Research and Development Association (ESARDA) Symposium on Safeguards and Nuclear Materials Management, Stockholm, 2003.
- [4] O. Gal, F. Jean, F. Lain, and C. L., "The CARTOGAM portable gamma imaging system", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 47, pp. 952 - 956, 2000.
- [5] Gmar, M., et al. "Development of Coded-Aperture Imaging With a Compact Gamma Camera." IEEE Transactions on Nuclear Science, vol, 51, pp. 1682-1687, 2004.
- [6] F. Carrel, et al., GAMPIX: a new gamma imaging system for radiological safety and homeland security purposes, in: IEEE NSS Conference Record, 2011.
- [7] O. Gal "Development of a portable gamma camera with coded aperture", Nucl. Instrum. Methods

- Phys. Res. Section A-Accel. Spectrom. Detectors Assoc. Equip., vol. 563, no. 1, pp. 233 - 237, 2006
- [8] Zhengyou Zhang, "A Flexible New Technique For Camera Calibration", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine intelligence, Vol. 22, No. 11, pp.1330 - 1334, 2000.
- [9] Sung-in Choi, Soon-Young Park, "DOF Correction of Heterogeneous Stereoscopic Cameras", Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers Vol. 51, NO. 7, July 2014.
- [10] Hartley and Zisserman, "Multiple view Geometry in computer view", Cambridge University Press : Cambridge, 2nd Edition, 2003.
- [11] Nam-Oh Lee, Soon-Yong Park, and Seung-Min Lee, "Visualization of The Three Dimensional Information Using Stereo Camera", Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers Vol. 47, NO. 4, July 2010.

저 자 소 개



황 영 관(정회원)
2006년 수원대학교 전자공학과
학사 졸업.
2008년 수원대학교 전자공학과
석사 졸업.
2014년 충남대학교 정보통신공학과
박사 졸업.

한국원자력연구원 원자력융합기술개발부 선임연구원

<주관심분야 : 방사선 센싱, 3차원 입체영상>



이 남 호(정회원)
1991년 경북대학교 전자공학과
학사 졸업
1993년 경북대학교 전자공학과
석사 졸업
2004년 충남대학교 전기공학과
박사 졸업

한국원자력연구원 원자력융합기술개발부 책임연구원

<주관심분야 : 입체영상, 원격제어, 원격센서>



이 승 민(정회원)
2000년 충남대학교 전기공학과
학사 졸업
2002년 충남대학교 전기공학과
석사 졸업
2007년 충남대학교 전기공학과
박사 졸업

충남대학교 전기전자통신공학교육과 초빙교수

<주관심분야 : 신재생에너지, 디지털 신호처리>