

방사선원 3차원 위치탐지를 위한 방사선 영상장치 개발

이남호^{1*} · 황영관¹ · 박준용²

Development of Three-Dimensional Gamma-ray Camera

Nam-Ho Lee^{1*} · Young-Gwan Hwang¹ · Soon-Yong Park²

¹Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 305-353, Korea

²Department of Computer Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

요약

방사선 영상장치는 방사능 누출사고의 조기처리 및 확산 피해 최소화에 필수적인 장비이며, 가까운 미래에 빅마켓으로 성장될 원전폐로 분야에서도 중요한 역할을 담당할 것으로 예상된다. 현재까지 개발된 방사선 영상장치는 방사선 오염원의 위치를 방향 정보만으로 탐지하여 가시화하고 있고 방사선원의 거리 측정은 불가능한 실정이다. 본 논문에서는 스테레오 카메라 원리를 적용하여 방사선원의 3차원 위치정보를 추출할 수 있는 새로운 기법의 방사선 3차원 영상장치의 구현에 대해 연구하였다. 한 대의 방사선 센서와 CCD 카메라, 그리고 팬틸의 컴팩트한 구성으로 설계된 방사선 3차원 영상장치(K3-RIS)는 위치변환 제어에 의한 스테레오 방사선 영상 취득과 연속모드 제어 및 고속 스테레오 영상정보처리 기능이 특징이다. 개발한 장치의 기능검증을 위해 감마 방사선원(Cs-137)을 대상으로 실험을 수행한 결과 선원간의 거리와 무관하게 3% 이하의 거리측정 오차를 확인하였다.

ABSTRACT

Radiation source imaging system is essential for protecting of radiation leakage accidents and minimizing damages from the radioactive materials, and is expected to play an important role in the nuclear plant decommissioning area. In this study, the stereoscopic camera principle was applied to develop a new radiation imaging device technology that can extract the radiation three-dimensional position information. This radiation three-dimensional imaging device (K3-RIS) was designed as a compact structure consisting of a radiation sensor, a CCD camera, and a pan-tilt only. It features the acquisition of stereoscopic radiation images by position change control, high-resolution detection by continuous scan mode control, and stereoscopic image signal processing. The performance analysis test of K3-RIS was conducted for a gamma-ray source(Cs-137) in radiation calibration facility. The test result showed that a performance error with less than 3% regardless of distances of the objects.

키워드 : 방사선 영상장치, 방사선 센서, 3차원 위치, 방사선 신호처리, 입체 가시화

Key word : Gamma-Ray, Radiation Imaging, Distance Information, 3D Position, Stereoscopic Visualization

접수일자 : 2014. 12. 11 심사완료일자 : 2014. 12. 29 게재확정일자 : 2015. 01. 12

* Corresponding Author Nam-Ho Lee(E-mail:nhlee@kaeri.re.kr, Tel:+82-42-868-2245)
Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.2.486>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

2011년 발생한 일본 후쿠시마 원전사고는 주변 대기 및 해양으로 고준위의 방사능이 누출되는 끔찍한 결과로 이어졌고, 수 년이 경과한 지금도 여전히 사고처리에 어려움을 겪고 있다. 이러한 원전 사고 발생 시 방사능 누출의 초기 차단은 환경 재앙을 방지하는 가장 시급하고 중요한 대응절차로 취급되고 있다.

방사능 누출 사고의 초기 대응 및 처리를 위해서는 비가시성 방사선에 대한 탐지 및 오염상태의 가시화가 필수 요건이나 기존의 후대형 방사선 측정기(Dosimeter)로는 넓은 영역에 대한 방사능 오염정보 탐지 및 가시화가 용이하지 않다. 방사능 오염상태의 가시화를 위해서는 작업자가 안전한 상태에서 신속히 방사선 오염원을 구분(Identifying)하고 그 위치를 파악(Locating)할 수 있는 방사선 탐지 및 영상장치가 필수적이다[1].

현재까지 개발된 방사선 영상장치로는 RadScan™과 CartoGam™가 대표적이며, 각각 방사선 탐지방식과 기능면에서 고유한 특성을 가지고 있다[2-4]. 먼저 RadScan™은 핀홀형 콜리메이터와 Na(Tl)계 신틸레이터 및 광증폭기로 구성된 포인트형 방사선 센서를 사용하여 래스터(Raster) 방식으로 탐색공간을 스캔하여 이차원 방사선 영상을 획득하는 장치이다. 이에 반해 CartoGam™은 CsI(Tl)계 신틸레이터로 광신호로 변환한 후 MCP(Multi-channel plate)로 증폭한 뒤 CCD(Charge coupled device)형 촬상소자로 직접 이차원 방사선 영상을 얻는다. 두 제품은 공통적으로 탐지 방사선 오염원의 위치(Location)와 분포 (Distribution)를 세기(Intensity) 정보와 동시에 CCD 기반 실영상(Visual image)에 중첩하여 지도(Colored contoured map)화하는 알고리즘을 탑재하고 있다. 그러나 이 두 장치는 모두 방사선원의 방향만 측정할 뿐 방사선원까지의 거리는 알 수 없어 방사선원의 실제 세기를 정확히 측정할 수 없을뿐 아니라 원격작업을 통한 방사선원 처리에도 어려움이 있다[5-8].

본 연구에서는 먼저, 기존 방사선 영상장치의 한계로 알려진 방사선 거리정보 추출 기능이 구현된 신개념의 3차원 방사선 영상장치를 단일 방사선 센서와 CCD 카메라, 그리고 스캔장치로 구성하고 스테레오 방사선 고속 스캔 알고리즘을 구현하였다. 그리고 개발한 방사선 영상장치의 성능검증을 위해 실제 방사선원을 대상으

로 실측 실험하여 방사선원 위치탐지 기능의 정확도를 분석하였다.

II. K3-RIS 구성 및 기능

2.1. 연속스캔 모드

RadScan™과 CartoGam™의 장점을 반영하고 방사선원 3차원 위치정보 측정 기능을 부가하여 신기술의 방사선 영상장치로 그림 1의 K3-RIS(Kaeri 3d radiation imaging system) 고안하였다.

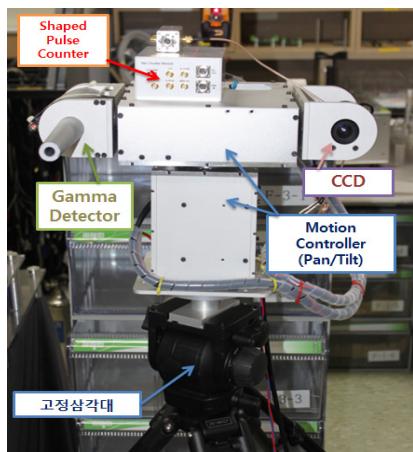


그림 1. K3-RIS 외형 및 구성
Fig. 1 K3-RIS configuration

K3-RIS는 단일 방사선 센서와 대칭 위치에 CCD를 장착한 구조로 좌우 변환기능을 통해 스테레오 방사선 및 가시광 영상정보를 고속으로 획득하고 방사선원의 거리정보를 얻을 수 있는 구조로 설계되었다.

전체 시스템은 센서부와 제어부, 그리고 신호처리부로 이루어 졌고, 센서부는 NaI(Tl) 신틸레이터($\phi=5\text{mm}$)와 H10722 (Hamamatsu사) PMT(Photo multiplier tube)를 결합한 광변환-증폭센서와 MCNP 모사를 통해 최적 구조로 설계한 직경 10mm의 콜리메이터와 납(Pb) 재질의 경량형 카페체로 구성하였다(그림 2).

제어부는 센서부를 X-Y 방향으로 일정영역 스캔하여 좌나 우 측의 2차원 방사선 영상을 얻은 다음, 팬틸트 회전을 통해 반대 측의 영상을 얻게 되며, 신호처리부는 센서부 출력 방사선 계수 정보를 사용하여 포인트

방사선 신호를 얻고, 스캔을 통해 이차원 방사선 영상을 구성한 다음 두 장의 좌우 방사선(&가시광) 영상정보로 부터 방사선원의 3차원 정보를 추출하게 된다.



그림 2. 콜리메이터 및 차폐체 외형
Fig. 2 Collimator and radiation shielding case

2.2. K3-RIS 운용 알고리즘

방사선 입사 방향정보를 얻기 위해서는 센서로 입사되는 방향이외 전체를 납과 같은 고밀도의 재료로 차폐해야 하므로 센서부는 고하중일 수밖에 없어, 두 대의 센서를 사용하는 일반적 스테레오 형태로는 장치구성에 한계가 있다.

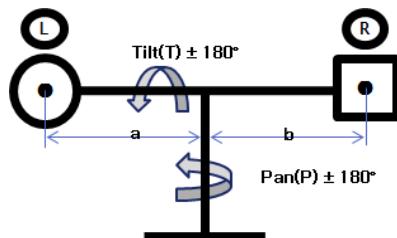


그림 3. K3-RIS 작동
Fig. 3 A concept of K3-RIS transition

따라서 하나의 센서부와 기본적 팬틸트 제어장치만을 이용한 경량형 스테레오 방사선 영상장치의 구현을 위해 그림 3과 같이 틸팅(Tilting) 회전 모터 축 상에 방사선 센서와 CCD 센서를 틸트 축의 중심으로부터 동일한 거리($a=b$)에 고정한 기본구조로 부터 좌우변환 제어를 통해 스테레오 기능을 구현하였다.

스테레오 방사선 영상 획득을 위해 먼저, K3-RIS는 우(좌) 쪽의 방사선 영상을 스캔한 다음 팬/틸트를 각각 180° 회전시켜 다른 좌(우)측의 스캔 영상을 얻음으로써 스테레오 영상을 구성할 수 있게 된다. 고안한 구조는 거리정보 추출과 결과영상의 가시화 단계에서 스테

레오 방사선 정보와 CCD 영상간의 중첩(Overlay) 시, 좌표변환 수식이 심플하고 정밀한 결과를 얻을 수 있는 장점도 있다.

또한 나중에 스캔된 방사선 영상은 방사선의 거리정보 추출에만 사용되므로 먼저 스캔된 방사선영상의 신호처리를 통해 전 영역, 일부 구역, 중심라인의 세기 를 측정하기 위한 스캔모드 알고리즘을 선택적으로 사용하여 얻음으로써 전체 스캔 소요시간을 단축할 수 있도록 하는 제어 알고리즘도 구현하였다.

2.3. 방사선원 3차원 정보 측정기법

2.3.1. 방사선 3차원 위치 탐지

방사선 탐지공간을 방사선 영상장치를 중심으로 구면좌표계로 표시할 경우 지금까지 개발된 대부분의 방사선 영상장치(RadScan™과 CartoGam™ 등)는 방사선원의 방향 정보(Θ, Φ)만을 측정하고 있다(그림 4).

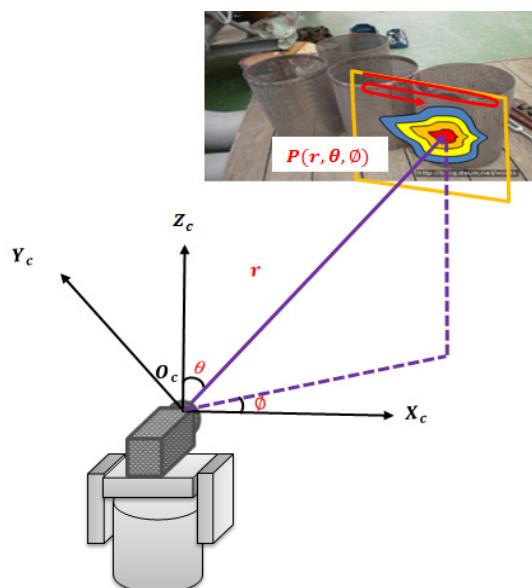


그림 4. 구면좌표계상의 방사선원 3차원 위치
Fig. 4 A 3D position of radiation source in a spherical coordinate system

따라서 방사선원까지의 거리(r)를 알 수 없으므로 방사선원의 실제 세기를 정확히 측정할 수 없다. Laser Rangefinder 등을 이용하여 거리를 측정하는 장치도 있으나 광 경로에 장애물 있는 복잡한 공간의 경우 방사

선원의 정확한 거리측정은 한계가 있다.

본 연구에서는 방사선 센서를 스테레오 방식으로 구성하여 좌우 위치에서 이차원의 방사선 탐지영상을 얻은 후 삼각법으로 방사선원까지의 거리(r)를 측정한다. 이 방식은 시야를 차단하는 물체로 인한 간섭을 최소화할 수 있는 장점이 있다.

2.3.2. 방사선센서 스테레오 교정(Calibration)

방사선원의 거리 측정에 스테레오 카메라의 원리를 적용하기 위해서는 방사선 센서에 대한 보정(Calibration)이 필수적이다[9]. 그러나 방사선 센서로는 보정에 사용되는 패턴 이미지 획득이 원리적으로 불가능하므로 일반적 스테레오 영상처리 기술을 직접 적용할 수는 없다.

따라서 본 연구에서는 먼저 CCD에 대하여 보정패턴을 적용한 보정 절차를 거친 후에 CCD와 방사선 센서 사이의 관계식(Homography)을 통하여 방사선 센서를 간접적으로 보정하는 방법을 방사선 영상 측정분야에서 최초로 시도하였고, 이 과정의 설명은 그림 5에 도시하였다.

먼저 좌, 우에 설치된 CCD(②, ③) 카메라와 방사선 센서(①, ④)로부터 평면에 위치한 네 개의 포인터 광 신호를 획득한 후 좌, 우측의 CCD와 방사선 센서 간($\text{②} \Leftrightarrow \text{①}, \text{④} \Leftrightarrow \text{③}$)의 다음 식 1과 같은 Homography 변환관계를 계산한다.

$$X_2 = HX_1 \Leftrightarrow \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, H 는 CCD와 방사선 센서를 통해 획득한 영상을 이용하여 4쌍의 점의 Projection 관계를 정의한 Homography 행렬을 의미하며, X_1 을 공간상의 임의의 점이라고 할 때, X_2 는 Homography 행렬을 통해 보정된 X_1 의 대응점을 의미한다.

두 번째 단계에서는 CCD 카메라로 보정패턴 영상을 획득하고. 세 번째 단계는 획득된 보정패턴 영상에 대해 앞서 1단계에서 추출한 Homography 변환을 적용하여 방사선 센서에서 획득된 것으로 예상되는 영상으로 변환한다. 그리고 마지막 단계에서는 방사선 센서로 변환된 보정패턴 영상에 Zhang의 방법을 적용하여 방사

선 센서를 보정함으로서 결국 방사선 센서를 보정하게 되는 것이다[10].

4쌍의 대응 점을 이용한 ①, ② 사이와 ③, ④ 사이의 Homography 변환관계 계산

②, ③을 이용한 보정 패턴 영상 획득

Homography 변환관계를 이용하여 ②로 획득한 보정 패턴 영상을 ①로 획득한 영상으로 변환, ③, ④에 대해서 동일하게 시행

변환된 패턴영상을 이용하여 ①, ④를 보정

그림 5. 방사선 센서의 보정과정

Fig. 5 A calibration process of radiation sensors

교정과정을 거친 두 개의 방사선 센서로 측정된 스테레오 방사선 영상의 두 방사선원으로부터 각 방사선 센서의 투영변환 행렬을 이용하면 탐지한 방사선원에 대한 3차원 좌표값의 계산이 가능하게 된다. 즉, 공간상의 한 점을 $X=(x,y,z)$ 라고 할 때, 좌측 카메라의 투영변환 행렬 P_1 에 의해 영상화된 대응점을 $x=(u, v)$ 이라고 하고, 우측 카메라의 투영변환행렬 P_2 에 의해 영상화된 대응점을 $x'=(u', v')$ 이라고 하면 다음 수식 2와 같이 정의된다.

$$x = P_1 X, x' = P_2 X \quad (2)$$

여기서 P_1 과 P_2 는 각각 좌, 우 카메라에 대한 투영변환 행렬을 의미하며 그 내부의 구성 원소는 카메라의 내·외부 변수 즉, Focal length, Principal point, Rotation vector, Translation vector로 구성되며 다음 수식과 같이 표현된다.

$$P_1 = \begin{pmatrix} a_1^T & a_{14} \\ a_2^T & a_{24} \\ a_3^T & a_{34} \end{pmatrix}, \quad P_2 = \begin{pmatrix} b_1^T & b_{14} \\ b_2^T & b_{24} \\ b_3^T & b_{34} \end{pmatrix} \quad (3)$$

수식 2와 수식 3을 이용하여 X 에 관해 정리한다면 다음과 같은 수식 4와 같이 전개되며

$$AX = Y \quad (4)$$

여기서, A, Y는 다음의 같이 표현된다.

$$A = \begin{pmatrix} (a_1 - ua_3)^T \\ (a_2 - va_3)^T \\ (b_1 - u'b_3)^T \\ (b_1 - v'b_3)^T \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} -a_{14} + ua_{34} \\ -a_{24} + va_{34} \\ -b_{14} + u'b_{34} \\ -b_{14} + v'b_{34} \end{pmatrix} \quad (5)$$

따라서 수식 5에서 정의된 행렬 A, 행렬Y에 해당하는 투영변환행렬의 원소값과 영상의 좌표값을 이용하여 방사선원의 3차원 공간좌표 X를 계산할 수 있다.

III. K3-RIS 성능시험

K3-RIS의 성능 검증을 위해 KOLAS 인증 감마선 교정시설의 방사선원(Cs-137)을 대상으로 하여 방사선원 거리측정 실험을 수행하였다. 그림 6에는 시험시설에 내에 위치시킨 K3-RIS와 탐지 대상 방사선원 고정기구가 각각 좌우에 나타나 있다.



그림 6. K3-RIS의 감마선원 거리측정 실험
Fig. 6 Distance measuring test for Cs-137 Gamma source using K3-RIS

실험은 측정 대상 방사선원을 고정한 상태로 K3-RIS를 정면 반대방향에서 이동시키면서 거리별로 측정 실험을 수행하였는데, 초기에 150cm로부터 시작하여 350cm까지 정밀 Linear Guide를 통해 간격을 증가시켰다. 그림 7은 거리를 조절하며 얻는 좌우 스테레오 영상으로 중심의 방사선원을 기준으로 상하좌우 20° 공간에 대해 1° 간격의 40 x 40 크기로 얻은 것이다.

획득 영상에 대한 방사선 영상처리 후에 추출한 방사선에 해당하는 특징점으로 부터 좌우 영상의 시차정보

를 구한 다음 식 2의 좌표변환 정보를 통해 각 거리별 방사선원의 거리를 추출하고, 이 값과 실 거리간의 오차를 백분율로 정리하였다.

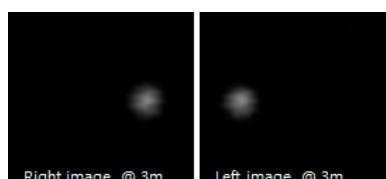


그림 7. 획득된 스테레오 방사선 영상
Fig. 7 Stereoscopic radiation images

그림 8은 거리별 3회 측정값에 대한 실 거리 오차 평균값을 도시한 것으로서 전체 실험의 오차범위가 약 3% 이하임을 나타내고 있다.

이상의 두 가지 3차원 위치측정 실험결과를 통해 고안한 K3-RIS가 방향이나 거리에 무관하게 방사선원의 3차원 위치를 정확히 측정하고 있음을 알 수 있다.

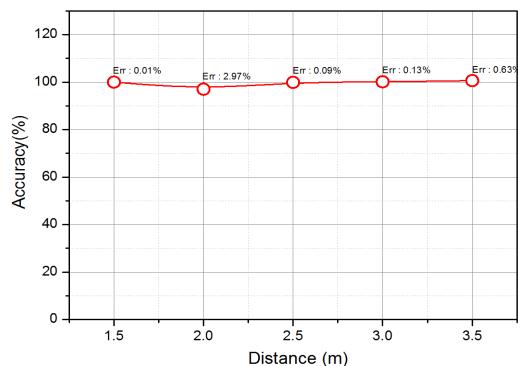


그림 8. 거리별 감마선원 탐지오차
Fig. 8 Detected error values of Gamma ray source to the distances

IV. 결 론

본 연구에서는 현재 상용화된 방사선 영상장치의 한계를 극복하기 위해 스테레오 영상처리 기술을 접목한 방사선원 3차원 영상장치(K3-RIS)를 고안하고 알고리즘과 함께 구현하였다. 이 장치는 한 대의 방사선 센서와 CCD 카메라, 그리고 팬틸로만으로 소형 경량 형태로 설계되었고, 좌우 위치변환 제어에 의해 스테레오

방사선 영상 취득기능이 가능하며, 스테레오 영상신호 처리 알고리즘을 통해 방사선원의 3차원 정보를 탐지할 수 있다. 또한 방사선원 센서의 스테레오 영상교정을 위해 가시광 카메라와의 Homography 변환관계를 처음으로 적용하였다.

구현한 방사선 영상장치(K3-RIS)의 3차원 위치탐지 성능 검증을 위해 감마방사선원(Cs-137)를 대상으로 거리별 선원 측정실험을 수행하였으며, 그 결과 탐지 대상체간의 거리와 무관하게 3% 이하의 거리측정 오차를 확인하였다.

개발한 K3-RIS는 현재 국내외적으로 큰 관심을 받고 있는 원전 폐로 분야에 적용이 가능하며 방사선 관련 사고처리 분야에서도 활용도가 높을 것으로 예상된다. 향후 탐지 방사선 정보의 3차원 가시화 연구를 추가로 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 민군기술협력센터의 지원으로 수행되었음.

REFERENCES

- [1] M. Woodring, D. Souza, S. Tipnis, P. Waer, M. Squillante, G. Entine, and K. P. Ziock, "Advanced radiation imaging of low-intensity gamma-ray sources," *Nucl. Instrum. Meth.A*, vol. 422, pp. 709 - 712, 1999.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Karl Hughes, Scott Walker, "The Use of a Gamma Ray Imaging Device for In-Cell Assay", *WM2008 Conference*, pp. 24-28, 2008.
- [5] O. Gal, F. Jean, F. Lainé, and C. Léon, "The CARTOGAM portable gamma imaging system", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 47, pp. 952 - 956, 2000.
- [6] 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.
- [7] O. Gal "Development of a portable gamma camera with coded aperture", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Section A-Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.*, vol. 563, no. 1, pp. 233 - 237, 2006.
- [8] 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.
- [9] Hartley and Zisserman, *Multiple view Geometry in computer view*, 2nd Edition, Cambridge University Press : Cambridge, 2nd Edition, 2003.
- [10] 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.



이남호(Nam-Ho Lee)

1991년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업
1993년 경북대학교 전자공학과 석사 졸업
2004년 충남대학교 전기공학과 박사 졸업
현재 : 한국원자력연구원 융합기술개발부 책임연구원
※관심분야 : 방사선 센서, 입체영상, 원격제어 시스템



황영관(Young-Gwan Hwang)

2006년 수원대학교 전자공학과 학사 졸업
2008년 수원대학교 전자공학과 석사 졸업
2014년 충남대학교 정보통신공학과 박사 졸업
현재 : 한국원자력연구원 융합기술개발부 연구원
※관심분야 : 빙사선 센서, 영상처리, 빙사선 카메라



박순용(Soon-Yong Park)

1991년 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1993년 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
2003년 뉴욕주립대학 스토니브룩, 전기공학과 (공학박사)
현재 경북대학교 컴퓨터공학과 교수
※관심분야 : 다시점영상 3차원 복원, 특수영상처리