

論文98-35S-2-15

# 원전 증기발생기 내 원격제어 로봇의 위치 검증을 위한 세관중심 검출 비전 알고리즘

## (Tube-Hole Center Detection Vision Algorithm for Verifying Position of Tele-Controlled Robot in Nuclear Steam Generator)

成始勳\*, 姜淳周\*, 秦成一\*

(Si-Hun Sung, Soon-Ju Kang, and Sung-Il Chien)

### 요 약

본 논문에서는 원전 증기발생기 세관의 정기적인 진단시에 신뢰성과 효율성을 증대하기 위한 세관중심 검출 비전 알고리즘을 제안하여 원격제어 로봇의 위치 검증 및 시각적인 정보를 제공한다. 원격제어 로봇은 증기발생기 세관의 건전성을 검사하기 위해 사용되는 탐촉자를 운반한다. 따라서 원하는 세관의 중심에 원격제어 로봇을 정확하게 위치하도록 하는 것은 검사의 신뢰성에 중요하다. 자동 신호수집을 위해서는 입력영상으로부터 정확한 세관 중심의 위치를 구해야만 한다. 본 응용대상에 적합하도록 변형한 3계층 밝기 분할 방법을 적용한다. 이진 영상에서 최소 외접 사각형(minimum bounding rectangle; MBR)을 추출한 후에 추출된 MBR 중 세관과 잡음에 의한 MBR을 구분하기 위해서 경험적 지식을 기반으로한 MBR rejection rules를 정의한다. MBR들은 아주 어두운 영역 MBR과 아주 밝은 영역 MBR으로 나뉘어진다. 세관의 완전한 영역을 구하기 위해서 MBR들은 서로 연관성있는 것끼리 짝지어지며, 병합된 MBR으로부터 세관의 중심을 찾는다. 더욱 정확하게 중심을 찾기 위해서 몇 장의 연속된 정지영상에서 구해진 중심의 위치들을 평균한다. 수백 장의 실제 영상을 이용하여 제안된 방법의 성능을 평가하였다.

### Abstract

In this paper, we propose a tube-hole center detection vision algorithm verifying the position of a tele-controlled robot and providing visual information for increasing reliability and efficiency in the diagnosis of steam generator (SG) tubes in nuclear power plant. A tele-controlled robot plays a role in carrying the probe used in inspecting the integrity of SG tubes. Thus accurately locating a tele-controlled robot on the desired tube-hole center is important issue for reliability of inspection. To do this work, we have to find the tube-hole center locations from the input image. At first, we apply the three-class segmentation method modified for this application. We extract minimum bounding rectangles (MBRs) in the thresholded binary image. Second, for discriminating between MBR by tube and MBR by noise, we introduce the MBR rejection rules as knowledge-based rule set. MBRs are divided into the very dark region MBRs and the very bright region MBRs. In order to describe the region of complete tube-hole, the MBRs need a process of pairing each other. We then can find the tube-hole center from the paired MBR. For more accurately finding the tube-hole center in several sequential images, the centers of some frames need to be averaged. We tested the performance of our method using hundreds of real images.

\* 正會員, 慶北大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)

接受日字: 1997年8月18日, 수정완료일: 1998年2月4日

## I. 서 론

원자력 발전소의 증기발생기(steam generator; SG)는 고온·고압의 방사선 물질을 내재한 환경에서 운전되며, 증기발생기를 구성하는 세관(tube)의 부식과 진동에 의한 파손 등 결함이 발생하고 있다. 이러한 결함에 의한 방사능 누출 사고를 미연에 방지하기 위하여 모든 원자력 발전소는 정기적으로 증기발생기 내의 세관을 검사하도록 규정되어 있다<sup>[1]</sup>. 증기발생기는 모델별로 차이는 있지만 일반적으로 2,000~5,000여 개의 U자형 세관이 일정 간격을 두고 배치되어 있으며, 한 원전에는 2~4개의 증기발생기가 있다. 따라서, 증기발생기 내의 세관 검사는 원전의 가동을 중지한 상태에서 진행되기 때문에 검사의 신뢰성뿐만 아니라 검사시간의 단축도 효율적인 측면에서 중요하게 부각되고 있다. 증기발생기 내의 세관 검사 작업은 고단위 방사능 지역이므로 탐촉자(probe)를 탑재한 로봇트를 증기발생기 수실 내에 투입해서 원격으로 검사 대상 세관으로 로봇트를 이동시키고, 탐촉자를 세관 안으로 삽입하여 비파괴 신호(eddy current signal)를 입수해서 세관의 건전성을 검사한다.

세관 검사시에 사용되는 탐촉자는 원격으로 조정된 위치에서 쏘아 올리지기 때문에 정확한 세관 중심의 위치 정보가 요구된다. 하지만 펄스에 의해 구동되는 모터를 사용하는 로봇트는 탐촉자를 사용자가 원하는 지점에 정확하게 운반하지 못하는 오류를 발생시킬 수 있고, 그 오류는 자주 보정하지 않으면 급속적으로 증가할 수 있다. 따라서 정확한 세관의 중심을 검출하기 위해서 잦은 재측정(recalibration)과 오류를 조정하기 위해서 작업자에 의한 수동적인 조정이 필요하다<sup>[2]</sup>. 이러한 문제점에 대한 해결과 검사의 신뢰성 향상 및 검사 시간의 단축을 위해서 무인 신호 수집 등의 지능형 자동화 신기술들이 연구되어지고 있다<sup>[2-4]</sup>. 탐촉자 이동 로봇트의 위치를 정밀하게 제어하기 위해서는 원형의 세관 영역과 중심을 정확하게 검출하는 알고리즘의 개발이 우선되어야 한다.

여러 응용범위에서 영상 내의 원을 검출하기 위해서 Hough 변환을 사용하고 있다. Kimme 등은 X선의 의료영상에서 종양을 찾기 위한 목적으로 공간경사를 구한 후 Hough 변환을 이용하였고<sup>[5]</sup>, Ser 등은 변형된 Hough 변환을 적용해서 물체 내에서 중복된 여러 개의 원과 타원의 중심들을 검출하였다<sup>[6]</sup>. 하지만

본 논문의 관심대상은 증기발생기 내에서 조명이 국부적으로 조사되어 있는 환경에서 세관이 규칙적으로 나열되어 있는 영상으로서, 조명의 영향으로 복잡한 밝기구조를 가지고 있다. 인간은 시각을 통해서 얻어진 장면에서 모델을 기반으로한 경험적인 학습에 의해서 직관적으로 세관의 끝을 원으로 인식하고 중심을 찾지만, 영상의 관점에서는 조명이 가해진 세관의 끝을 원이 아니라 여러 개의 타원이 중첩되어 있는 것으로 볼 수 있다. 따라서 Hough 변환을 본 논문의 응용대상에 적용하는 것은 부적합하다. Brem과 Nandhakumar<sup>[2]</sup>는 본 논문과 유사한 목적의 연구를 하였다. 그들은 두 개의 밝기기준값(threshold value)을 설정하여 수직·수평으로 각각 라인스캔(linescan)한 후에 입력신호가 밝기기준값에 걸치는 두 위치를 세관의 경계로 간주하고 두 위치의 기하적 평균을 그 세관의 중심으로 설정하는 비전 알고리즘을 제시하였다. 하지만 이 알고리즘은 특정한 응용대상에 대해 제안되었으므로 본 논문의 관심대상과 같이 밝기값의 분포가 복잡하고 명암도가 낮은 영상에는 적절치 못하다.

이에 본 논문에서는 작업의 정확성과 신뢰성을 향상시키고 작업자에게 시각적인 정보를 제공하는 비전 알고리즘을 제안한다. 3계층 밝기 분할 방법을 이용하여 입력영상을 밝은 영역, 어두운 영역, 불필요한 영역으로 분리한다. 밝은 영역과 어두운 영역에 대한 최소 외접 사각형(minimum bounding rectangle; MBR)을 구하고, 잡음에 의한 MBR을 제거하기 위해서 경험적 지식을 기반으로한(knowledge-based) MBR rejection rules를 정의하였다. 서로 연관성이 있는 MBR을 짝지어서(pairing) 전체 세관 영역의 중심을 구하고, 개별 프레임에서 발생할 수 있는 위치 오류를 줄이기 위해서 로봇트 매니퓰레이터(robot manipulator)의 이동이 없는 상태에서 획득한 몇 장의 연속적인 정지영상의 개별 결과들의 평균값을 최종적인 세관 중심으로 취한다.

본 논문은 2장에서 전체적인 원자력 발전소의 증기발생기 검사를 위한 탐촉자의 위치 제어 비전 시스템에 대한 간단한 소개를 하고 3장에서는 제안한 비전 알고리즘을 상세히 설명하며, 설명에 이어 각 부분별의 결과 영상들을 보인다. 4장에서는 제안된 알고리즘의 전체적인 성능을 평가하기 위해서 실제 영상에 적용한 실험 결과와 분석 결과를 보이고, 마지막으로 5장에서 제안된 비전 알고리즘의 결론을 제시함으로써

본 논문을 맺는다.

## II. 위치 제어 비전 시스템

전체적인 위치 제어 비전 시스템의 블록도는 그림 1과 같다. 그림에서와 같이 사람이 직접 작업하기 어려운 극한 상황, 즉 원전 내부에서 로봇에 의해 이동되어진 탐촉자의 주변 상황을 탐촉자에 인접하게 설치된 CCD 카메라로부터 영상을 획득한다. 원전 외부에서 원격으로 탐촉자의 이동 및 위치 제어와 모니터링을 하고 세관 내로 탐촉자를 삽입하여 신호를 수집한다. 제안된 비전 알고리즘을 영상에 적용하여 세관의 중심을 구하고 세관의 중심과 현재 탐촉자 위치의 거리를 로봇의 구동부에 전달함으로써 위치를 수정하게 되며, 작업자가 수정된 위치를 검증하도록 구성된다.

증기발생기 외부에서 내부를 모니터링하기 위한 카메라는 여러 제약사항으로 인해서 그림과 같이 탐촉자와 다소 떨어진 위치에서 기울어진 각도를 유지하고 있기 때문에 왜곡된 영상을 획득하게 된다. 아울러, 원자로 내부의 어두운 환경 내에서 검사를 위해 임시로 설치한 국부적인 조명의 영향을 무시할 수 없다. 따라서, 알고리즘 구현시 카메라의 초점거리(focal length), 설치각도(angle), 광원의 배치(light arrangement) 등의 제약사항이 결정되어야 하며, 실시간 처리를 위해서 빠른 수행이 요구된다<sup>[2, 3]</sup>.

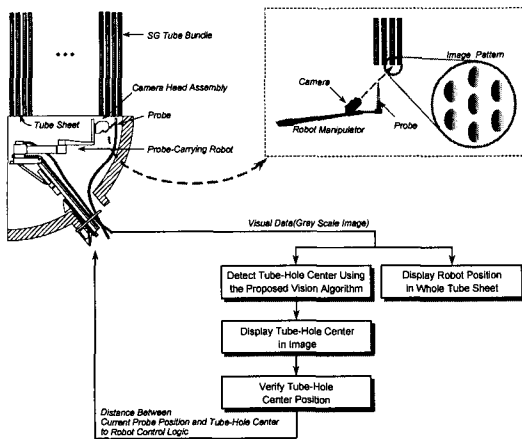


그림 1. 증기발생기 검사를 위한 탐촉자의 위치 제어 비전 시스템의 전체 블록도

Fig. 1. Overall block diagram of probe positioning vision system for inspecting a steam generator.

## III. 제안된 비전 알고리즘

세관의 중심을 검출하기 위한 제안된 비전알고리즘의 개괄적인 흐름도는 그림 2와 같다. 획득된 영상에서 세관 영역과 세관을 감싸고 있는 부분을 분리(segmentation)한다. 그 후 레이블링을 수행하여 적절한 MBR을 추출하고 잡음에 의한 영향을 줄이기 위해서 필요치 않은 MBR을 MBR rejection rules에 근거해서 제거한다. 남겨진 MBR들을 연관성이 있는 것끼리 짝지어서 세관 전체를 감싸는 MBR을 구하고 그 MBR의 중심을 세관의 중심으로 결정한다. 최종적으로 연속된 정지영상을 이용하여 개별 프레임에서 세관중심이 누락되는 것을 보완하고 시스템의 성능을 안정시킨다.

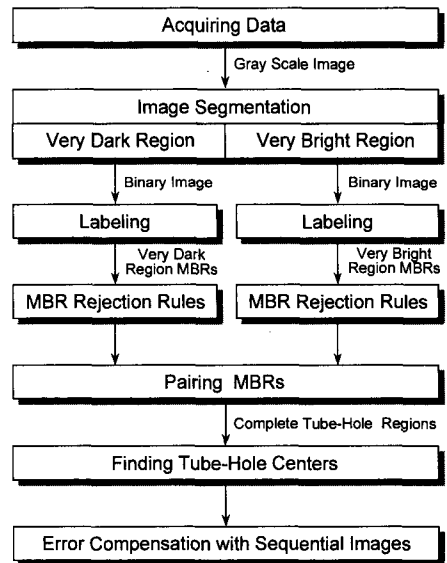


그림 2. 영상처리 흐름도

Fig. 2. Image processing block diagram.

### 1. 영상 획득

그림 3에서 보여진 영상은 그림 1에 의해 획득된 원자로 내부의 실제 세관 영상이다. 그림 3(a)와 같은 영상을 tube sheet이라 하며, 원형으로 보이는 부분이 세관이다. 그리고, 우측에 탐촉자가 들어있는 로봇 매니플레이터가 보인다. 탐촉자는 매니플레이터를 통해서 세관 내로 투입되어 결함측정을 위한 신호를 수집한다. 그림 3(a)에서 알 수 있듯이 영상 내에서 많은 부분을 차지하고 있는 로봇 매니플레이터는 영상처리 정확성을 저해하는 요인이 될 수 있다. 그리고

원근에 의하여 카메라에서 가까이 위치한 세관의 영상은 상대적으로 크고 원형에 가까운 형태를 가지고 있지만, 점차 카메라에서 멀어질수록 세관 영역의 크기가 작고 형태가 왜곡되어 있다. 앞서 서론에서 밝힌 바와 같이 본 논문의 관심대상은 조명의 영향으로 인해서 하나의 세관 영역 내에 복잡한 밝기값 분포를 가지고 있으므로 이에 적절한 알고리즘이 요구되어진다. 그림 3(c)에서 공간경사를 이용한 Hough 변환은 본 응용대상에 적합치 않음을 알 수 있다.

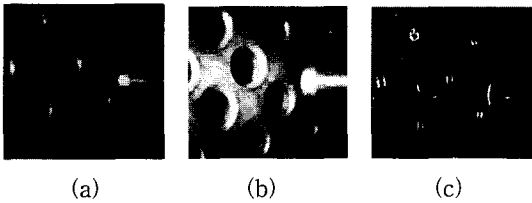


그림 3. 실제 영상: (a) 원영상 (b) 히스토그램 평준화 영상 (c) 공간경사 영상  
 Fig. 3. Our real image: (a) Original image, (b) Histogram equalized image, and (c) Gradient image.

2. 영상 분할

세관 영역의 밝기값은 그림 4와 같이 크게 3계층으로 나뉘어진다. 일반적으로 세관은 금속성이므로 조명의 위치에서 마주보는 세관의 끝부분은 아주 밝은 반사광이 존재하며, 조명이 극부조명이기 때문에 가려진 부분은 아주 낮은 밝기값을 가지고 있다. 그리고 세관 내부에서 밝은 영역과 어두운 영역의 사이에 존재하는 영역은 세관 주변의 밝기값과 유사한 값을 가지고 있다. 따라서, 세관 영상의 특징에 근거한 3계층 밝기 분할 방법을 제안한다. 3계층 밝기 분할 방법은 상위 밝기기준값과 하위 밝기기준값을 가지며 흐름도는 그림 5와 같다. 제안된 방법은 원영상  $I(x, y)$ 과 히스토그램 평준화(histogram equalization)<sup>[7]</sup>된 영상  $I_{eq}(x, y)$ 을 이용하여 각 영상에서 추출된 평균값을 교차하여 밝기기준값으로 취한다. 전체적인 밝기값이 낮은 영상일 경우에  $I_{eq}(x, y)$ 의 평균값  $\mu_{eq}$ 이  $I(x, y)$ 의 평균값  $\mu_I$ 보다 크므로 밝은 영역의 밝기기준값은  $\mu_{eq}$ 로 주어지며, 어두운 영역의 밝기기준값은  $\mu_I$ 로 주어진다.  $\mu_I$ 와  $\mu_{eq}$ 는

$$\mu_I = \frac{1}{N} \sum_x \sum_y I(x, y) \tag{1}$$

$$\mu_{eq} = \frac{1}{N} \sum_x \sum_y I_{eq}(x, y) \tag{2}$$

로 표현되며, 여기서 N은 대상영역 내의 화소수이다. 어두운 영역의 이진화 영상  $T_D(x, y)$ 와 밝은 영역의 이진화 영상  $T_B(x, y)$ 은

$$T_D(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{if } I_{eq}(x, y) > \mu_I \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3}$$

$$T_B(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } I(x, y) > \mu_{eq} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{4}$$

으로 구해지며, 1은 세관의 내부 영역이고 0은 세관 주변 영역을 나타낸다.

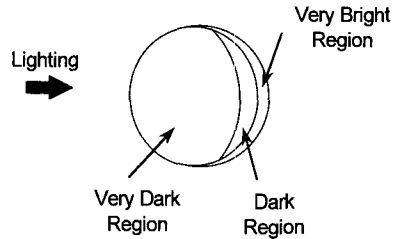


그림 4. 광원의 위치에 따른 세관 내 밝기값의 분포  
 Fig. 4. Brightness based on light arrangement in tube-hole.

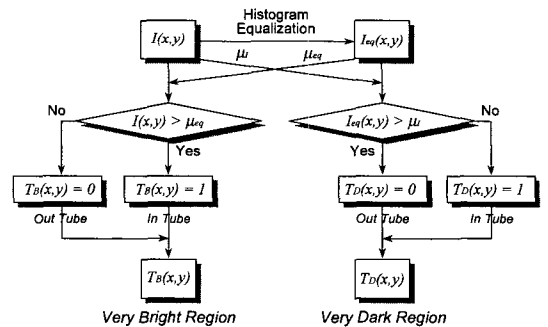


그림 5. 제안한 3계층 밝기 분할 방법  
 Fig. 5. The proposed three-class segmentation method.

제안한 3계층 밝기 분할 방법을 적용한 이진화 결과는 그림 6과 같다. 그림 6(a)는 그림 4를 평균값으로 이진화한 결과이다. 그리고 그림 6(b)는 그림 5의 우측의 어두운 영역의 이진영상으로서 세관의 분포를 그림 6(a)에 비해서 상대적으로 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 하지만, 어두운 부분만을 분할하였기 때문에 완전한 세관의 영역과 중심을 예측하기는 어렵다. 그림 6(c)는 밝은 영역의 이진영상으로서 그림 6(b)에 비해서 불필요한 부분을 다소 생성하지만 세관의 가장 밝은 영역을 보여주고 있다. 우측에 수평으로 길게 나

타난 영역은 탐측자를 가지고 있는 로봇트 매니플레이터에 빛이 반사되어 밝게 나타난 것이다. 이러한 불규칙하고 원하지 않는 영역들은 이후 설명할 MBR rejection rules로 제거된다. 그림 6(d)는 그림 6(b)와 그림 6(c)의 논리합 결과로서, 전체적인 세관 영역을 보이고 있다.

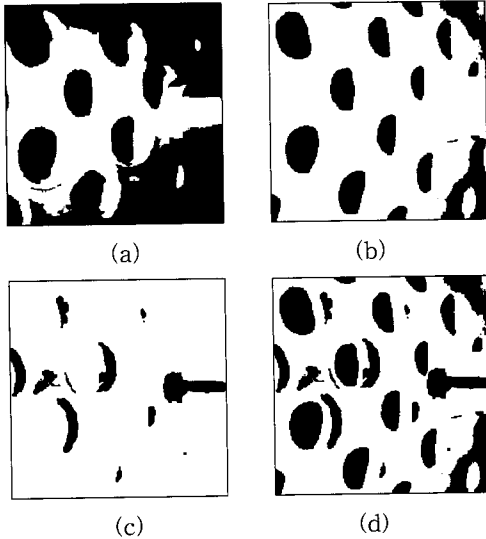


그림 6. 영상분할 비교: (a)  $I(x,y)$ 을  $\mu_1$ 로 이진화 (b)  $T_D(x,y)$  (c)  $T_B(x,y)$  (d) (b)와 (c)를 논리합한 영상

Fig. 6. Image segmentation comparison: (a) Thresholding with  $\mu_1$  in  $I(x,y)$ , (b)  $T_D(x,y)$ , (c)  $T_B(x,y)$ , and (d) Logical OR with images (b) and (c).

### 3. MBR 추출 및 선택

제안된 3계층 밝기 분할 방법으로 분할된 이진영상을 레이블링<sup>[7]</sup> 해서 MBR을 구한다. 하지만 주변 잡음과 이진화 오류로 인해서 원하지 않는 불규칙한 MBR들이 추출될 수 있다. 이러한 MBR들을 모두 허용한다면 진단시스템이 정확한 측정자료를 확보함에 있어서 신뢰도를 저하하고 탐측자에 물리적인 손실을 가할 수 있다. 따라서, 경험적 지식을 기반으로한 MBR rejection rules를 이용해서 MBR의 진위를 판별한다. 각 MBR은 모든 Rule에서 검증되며 하나의 Rule에서라도 오류라고 판단되면 제거된다. MBR rejection rules는 그림 3과 같이 탐측자의 위치가 영상의 수직면에 있을 경우에 다음과 같이 정의한다.

#### MBR rejection rules

- Rule 1  $\begin{cases} \text{Reject} & \text{if } WH \geq A_i \\ \text{Accept} & \text{otherwise} \end{cases}$

where,  $A_i = \frac{3 \times \sum_{i=0}^n W_i H_i}{n}$  and  $n$  is the number of MBR.

- Rule 2  $\begin{cases} \text{Reject} & \text{if } WH < \alpha \\ \text{Accept} & \text{otherwise} \end{cases}$

- Rule 3  $\begin{cases} \text{Reject} & \text{if } W \geq \beta H \\ \text{Accept} & \text{otherwise} \end{cases}$

여기서,  $W$ 는 MBR의 가로크기이며,  $H$ 는 MBR의 세로크기이다. Rule 1은 다른 MBR에 비해서 과도하게 큰 MBR을 제거하는 것으로,  $A_i$ 는 기준 면적이다. Rule 2는 MBR의 최소 크기를 제한하는 것으로,  $\alpha$ 는 4로 주어졌다. Rule 3은 MBR의 수평대 수직비를 규제하는 것으로서,  $\beta$ 는 2로 주어졌다. 탐측자의 위치가 영상의 수평면에 있을 경우에는 Rule 3의  $W$ 와  $H$ 가 상호치환된다.

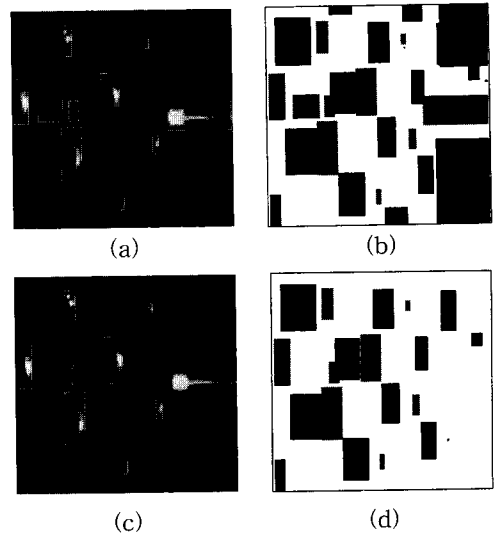


그림 7. MBR 제거: (a) MBR rejection rules를 적용하기 전의 MBRs (b) (a)에서 보여진 MBR의 가상평면 (c) MBR rejection rules를 적용한 후의 MBRs (d) (c)에서 보여진 MBR의 가상평면

Fig. 7. MBR rejection: (a) MBRs before MBR rejection rules, (b) Virtual plane presenting MBRs of (a), (c) MBRs after MBR rejection rules, and (d) Virtual plane presenting MBRs of (c).

MBR rejection rules에 의한 MBR 선택 결과는 그림 7과 같다. 그림 7(a)는 MBR rejection rules를 적용하기 전의 MBR으로서 원하지 않는 MBR이 많

이 추출되었음을 알 수 있다. 그림 7(b)는 MBR 영역을 가상평면에 나타낸 것이다. 그림에서 검은색 사각형은 아주 어두운 영역을 표현한 것이고 회색 사각형은 아주 밝은 영역을 나타낸 것으로 후에 설명할 병합과정의 대상영역이다. 가상평면에 밝기값으로 영역을 표현하는 것은 일차적인 병합효과를 가진다. MBR 내에 동일한 특성을 가지는 작은 영역이 있을 경우에 그 내부 MBR의 영향을 제거할 수 있기 때문이다. 그림 7(c)에서 MBR rejection rules를 이용하여 불필요한 MBR들을 상당히 제거하였음을 알 수 있다. 그림 7(d)는 그림 7(c)에서 추출된 MBR을 가상평면에 표현한 것이다.

4. 연관성을 고려한 MBR 병합과 세관중심 검출

어두운 영역의 MBR은 영상의 명암도가 낮음에도 불구하고 밝은 영역에 비해 세관 주위의 밝기값과 어두운 영역의 밝기값의 차이가 크기 때문에 대체로 안정되게 추출될 수 있다. 반면, 밝은 영역의 MBR은 점유하는 면적이 작고 조명의 영향으로 인해 추출이 쉽지 않다. 밝은 영역과 어두운 영역의 MBR은 서로 관계있는 두 MBR들을 짝지어야 올바른 세관의 중심을 구할 수 있다. MBR을 병합하는 과정은 그림 8과 같으며, 병합의 기준이 되는 어두운 영역의 MBR을 병합 후보로 정의한다. MBR을 병합할 때에도 역시 영상에서의 탐촉자의 위치에 유의하여야 한다. 그림 3과 같이 탐촉자의 위치가 영상의 수직면에 있다면, 비교적 MBR 크기가 크고 검출오류가 적은 어두운 영역의 MBR을 기준으로 우측에 있는 밝은 영역의 MBR을  $2W$ 로 제한된 영역 내에서 검색한다. 그림 9는 MBR을 병합한 결과영상이다. 그림에서 가는 선의 사각형은 병합 전의 MBR 영역이고 굵은 선의 사각형은 병합을 성공한 MBR이며, 흰색 점은 병합된 MBR의 중심으로서, 세관의 중심 위치를 나타낸다.

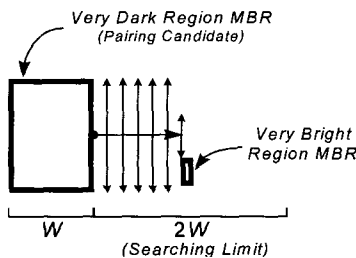


그림 8. MBR 병합과정  
Fig. 8. MBR pairing procedure.

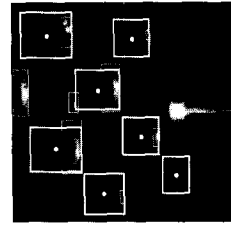


그림 9. 그림 7(c)의 MBR 병합결과  
Fig. 9. MBR pairing result of Fig. 7(c).

5. 연속된 정지영상을 이용한 오류 수정

개별 프레임에서 찾아진 세관의 중심은 카메라의 입사각과 조명 상태 등으로 인해 약간의 오차를 포함하거나, 주변환경의 영향에 따라 검출되지 않을 수 있으므로 연속된 몇 프레임의 결과를 이용하여 최종적인 세관의 중심들을 구한다. 연속적인 정지영상에서 검출된 중심점을 기준으로 5 화소씩 확장한  $11 \times 11$ 의 사각형 영역을 가상평면에 누적하고, 누적된 영역의 중심을 최종적인 세관의 중심으로 결정한다. 오류 수정 시에 매니플레이터의 움직임은 없다고 가정한다.

IV. 실험 및 고찰

입력 영상 분석

그림 10은 본 논문의 실험에 사용된 연속 영상 중의 한 프레임으로 원자력 발전소의 정기 검사시간 중에 아날로그 VHS 영상으로 획득한 후 256 gray scale으로 A/D 변환한 실제 영상이다. 그림 10(a)는 입력영상으로 main stripe를 흰색 직선으로 표시하였다. main stripe는 영상 내에서 가장 세관이 많이 관측되는 직선으로 정의한다. 그림 10(b)는 main stripe에서의 밝기값 분포를 2차원 평면상에 나타낸 그래프로서, 영상의 중심에서 멀어질수록 조명의 영향으로 밝기값이 급격히 떨어짐을 알 수 있다. 그림에서 함몰된 부분이 세관 영역 중 어두운 부분이며 높게 솟은 부분이 세관 영역 중 빛에 반사된 밝은 부분과 세관 주변이다. 높게 솟은 부분에서 국부적으로 낮은 값을 가지는 것은 세관의 밝은 영역과 세관 주변의 경계부분이 낮은 밝기값을 가지기 때문이며, 두 값이 큰 차이를 보이지 않는 것은 main stripe가 세관의 밝은 영역에서 가장 높은 값을 지나는 것이 아니라 밝은 영역의 경사부분을 지나기 때문이다. 그림 10(c)는 입력 영상을 3차원으로 표현한 것으로 세관의 밝은 영역이

주변값에 비해 상당히 큰 밝기값을 가지고 있음을 알 수 있다. 그림 우측의 높은 값을 가지는 부분은 로봇트 매니플레이터이다.

약 82%의 성공율을 보였다.

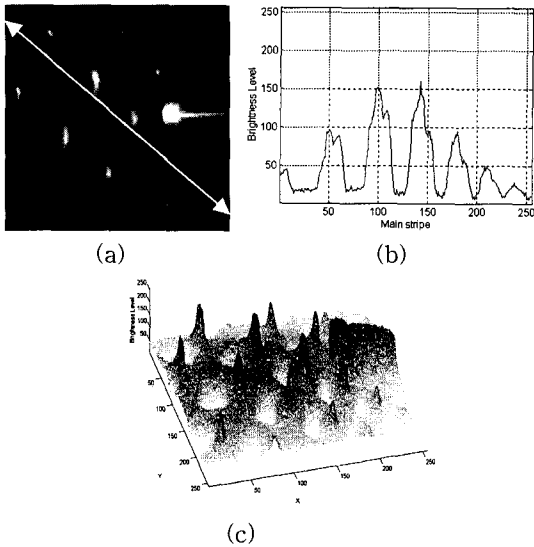


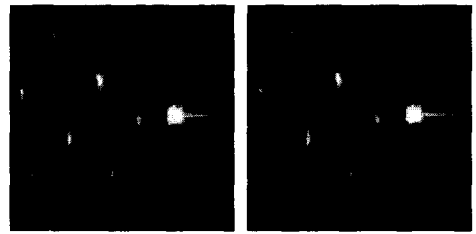
그림 10. 실험 영상의 분석: (a) 입력영상과 main stripe (b) main stripe 상의 밝기값 분포 그래프 (c) 3차원으로 표현한 입력영상

Fig. 10. Analysis of experimental image: (a) Input image and main stripe (b) Brightness distribution graph on main stripe, and (c) 3-dimension input image.

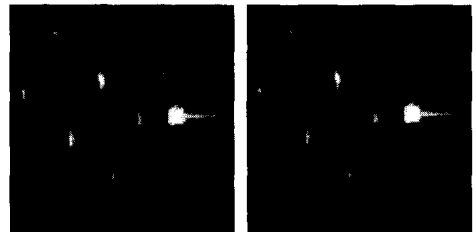
**개별 프레임 성능평가**

각 실험 영상은 실제 영상으로 카메라의 위치를 상하로 이동해서 세관을 크게 확대한 영상부터 세관을 작게 축소한 영상까지 다양하게 구성하였다. 실험은 820장의 영상에 적용해서 모두 6500여 개의 세관을 검출하였다. 그림 11은 로봇트 매니플레이터가 정지한 상태에서 연속으로 획득한 영상들을 제안된 비전 알고리즘에 개별 프레임별로 적용한 실험 결과이다. 그림 11에서 사각형은 병합을 거친 최종 MBR 결과로서 세관의 영역을 표시하며, 점은 MBR의 중심으로 검출된 세관의 중심 위치를 나타낸다.

그림 12는 50장의 연속 정지영상에 대한 프레임별 병합 후보와 병합이 성공한 세관영역의 개수를 함께 표현한 그래프로서, 병합 후보의 수는 프레임마다 다소 변화가 많지만 조명의 밝기가 어느 정도 유지되는 지역에서 비교적 안정적으로 병합에 성공하여 세관 중심을 검출하였음을 알 수 있다. 병합성공율은 병합후보 개수에 대한 병합성공 개수의 비율로 정의하였고



(a) Frame 1 (b) Frame 2



(c) Frame 3 (d) Frame 4



(e) Frame 5

그림 11. 개별 프레임에서의 세관중심 검출

Fig. 11. Tube-hole center detection in each frame.

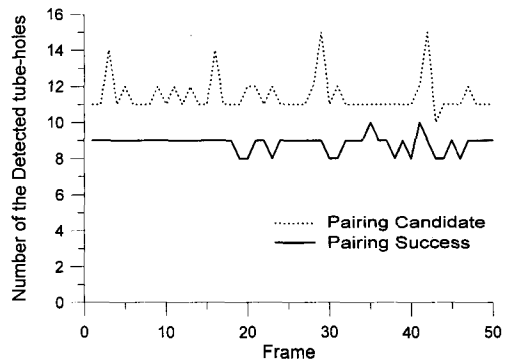


그림 12. 프레임별 병합 후보와 병합이 성공한 세관영역의 개수

Fig. 12. Number of pairing candidate and pairing successful tube in sequential frames.

**연속된 정지영상들을 이용한 오류수정**

그림 13은 그림 11의 연속된 다섯 프레임에 대한 개별 실험결과와 오류를 수정한 결과이다. 개별 프레임은 병합실패로 인해서 검출되지 않은 세관의 중심점이 있었지만, 그림 13의 최종 결과는 안정적으로 세관의 중심 위치들을 검출하였음을 알 수 있다. 그림에서 점으로 나타낸 부분이 제안된 비전 알고리즘을 적용하여 검출된 세관의 중심 위치들이며, 영상에서 탐촉자를 삽입하고자 하는 세관은 영상의 중앙에 있는 세관이다.



그림 13. 그림 11의 연속 정지영상에 적용한 오류 수정결과

Fig. 13. Error compensation applied to Figure 11.

**V. 결론**

본 논문에서 제안된 세관중심 검출 알고리즘은 작업자에게 시각적인 정보를 제공함으로써 작업의 정확성과 생산성을 증가시켰다. 입력영상이 크게 3가지의 밝기값으로 구성되어 있는 특성에 착안해서 3계층 밝기 분할 방법을 제안하였으며, 영역분할로 얻어진 MBR 중에 세관 영역에 의한 MBR만을 선정하기 위해서 경험적 지식을 기반으로한 MBR rejection rules를 정의하였다. 완전한 세관 영역을 구하기 위해서 상호 연관성이 있는 MBR들을 짝을 지워 병합하였고, 병합된 MBR의 중심을 세관중심의 위치로 결정하였다. 병합후보 개수에 대한 병합성공 개수의 비율로 정의되어진 병합성공율은 약 82%로, 조명에서 멀리 위치한 밝은 영역 MBR의 미검출에 의한 것이다. 최종적으로 로봇 매니플레이터가 정지한 상태에서 획득된 연속영상에 제안된 알고리즘을 적용함으로써 개별 프레임에서 있을 수 있는 오류를 보완하여 전체 시스템의 안정성을 높였다. 앞으로 로봇제어 시스템과 실시간으로 연동하는 연구가 계속 진행될 것이며, 이 연구가 완료되어 실용화되면 원전 증기발생기 내

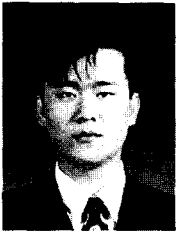
세관의 건전성 검사에 필요한 비파괴 신호의 수집 기간을 50%이상 단축할 수 있을 것으로 사료된다.

**참 고 문 헌**

- [1] EPRI NDE Center, *Advanced Eddy Current Data Analysis Techniques for Steam Generator Tubing Training Book for LEVEL II*, EPRI, 1986.
- [2] L. Brem and N. Nandhakumar, "A Machine Vision System for Positioning a Teleoperated Servicing Tool Head," *Proc. ANS Fifth Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*, pp. 217-224, 1993.
- [3] P. Rzasa and M. Allen, *A Machine Vision System for Verifying End-Effector Locations of Robotic Devices in Steam Generators*, Nuclear Services, Power Systems Group, Combustion Engineering, Inc.
- [4] 왕한홍, 김중수, 한상현, 심상한, "원전 증기 발생기 세관 검사용 비전시스템 개발에 관한 연구," *Proc. the 11th KACC*, pp. 101-104, 1996
- [5] C. Kimme, D. H. Ballard, and J. Sklansky, "Finding circles by an array of accumulators," *Communications of the Association for Computing Machinery*, Vol. 18, pp. 120-122, 1975.
- [6] P. K. Ser and W. C. Siu, "Novel detection of conics using 2-D Hough planes," *IEE Proc. Vision, Image and Signal Processing*, Vol. 142, No. 5, pp. 262-270, 1995.
- [7] D. H. Ballard and C. M. Brown, *Computer Vision*, Prentice-Hall, 1982.



## 저 자 소 개



成始勳(正會員)

1973년 9월 14일생. 1995년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1997년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1997년 3월 ~ 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정. 주관

심분야는 컴퓨터시각, 영상처리, 패턴인식, 신경회로망



姜淳周(正會員)

1960년 3월 14일생. 1983년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1985년 2월 한국과학기술원 전산학과 졸업(공학석사). 1995년 2월 한국과학기술원 전산학과 졸업(공학박사). 1985년 ~ 1996년 8월

한국원자력연구소 핵인공지능연구실 선임연구원, 전산정보실 실장 역임. 1996년 9월 ~ 현재 경북대학교 전자전기공학부 전임강사. IEEE, KISS, KIEE, KICS 회원. 주요관심분야는 실시간 시스템 설계, 전문가 시스템 및 소프트웨어 공학.

秦成一(正會員) 第 32卷 S編 第 9號 參照

현재 경북대학교 전자전기공학부  
부교수