

## 일반화 대칭변환을 이용한 원전 증기발생기 전열관 중심인식 비전 알고리즘

# A Vision Algorithm for Finding the Centers of Steam Generator Tubes Using the Generalized Symmetry Transform

°장태인\*, 광귀일\*

\*전력연구원 정보통신그룹(Tel:+82-42-865-5766;Fax:+82-42-865-7704;E-mail:angeljti@kepri.re.kr)

**Abstracts** This paper presents a vision algorithm for finding the centers of steam generator tubes using the generalized symmetry transform, which is used for ECT(Eddy Current Test) of steam generator tubes in nuclear power plants. The geometrical properties of the image representing steam generator tubes shows that they have almost circular or somewhat elliptic appearances and each tube has strong symmetry about its center. So we apply the generalized symmetry transform to finding centers of steam generator tubes. But applying the generalized symmetry transform itself without any modification gives difficulties in obtaining the exact centers of tubes due to the shadow effect generated by the local light installed inside steam generator. Therefore we make the generalized symmetry transform modified, which uses a modified phase weight function in getting the symmetry magnitude in order to overcome the misleading effect by the local light. The experimental results indicate that the proposed vision algorithm efficiently recognizes centers of steam generator tubes.

**Keywords** Steam Generator, Vision Recognition, Generalized Symmetry Transform, Symmetry Magnitude, ECT(Eddy Current Test)

### 1. 서 론

원전 증기발생기 전열관에 대한 유지·보수 작업은 증기발생기 내부에 있는 약 5,000여개의 U자형 전열관에 대하여 ECT, 플러깅(plugging) 및 슬리빙(sleeving) 등의 작업을 행하는 것이다.

유지·보수 작업 중에서 ECT는 전열관의 파손 및 노후화 정도를 알기 위한 비파괴 검사의 일종으로 증기발생기 작업용 로봇의 매니퓰레이터 끝에 부착되어 있는 ECT 탐촉자의 끝을 증기발생기 전열관의 중심에 정확히 위치시키는 것이 중요하다. 그러나 ECT 작업용 로봇은 펄스에 의해 구동되는 stepper motor를 주로 사용하므로 탐촉자를 사용자가 원하는 지점까지 이동시키는 데 있어서 위치 오차를 유발할 수 있고, 그 오류를 보정해 주지 않는다면 다음 동작시 위치 오차가 더욱 커지게 된다.

또한, 탐촉자가 전열관의 중심에 정확히 위치하지 않을 경우 탐촉자를 전열관에 삽입할 때 탐촉자가 손상을 입을 가능성도 있다. 작업 도중에 탐촉자가 손상되면 새로운 것으로 교체해야 하는 데, 탐촉자의 교체는 방사능 오염 처리와 발전소 오버홀(overhaul) 기간의 연장 등의 문제를 유발시킨다[3].

이에 본 논문에서는 증기발생기 작업용 로봇 매니퓰레이터가 증기발생기의 폐공간내에서 ECT 등의 필요한 작업을 수행할 때, 도달하고자 하는 전열관의 중심을 자동으로 인식하기 위한 비전 알고리즘을 제안하고 그 결과를 분석한다. 제안한 비전 알고리즘은 일반화 대칭변환을 변형 적용한 것으로 증기발생기 전열관의 영상을 분석한 결과를 바탕으로 전열관의 중심에

대칭성이 크게 나타나도록 대칭변환시 위상가중함수(phase weight function)를 변형하여 대칭도를 구하고, 더 정확한 중심을 구하기 위해 대칭성이 크게 나타난 부분에 대하여 대칭변환을 한번 더 적용하는 구조이다.

본 논문은 2장에서 증기발생기 전열관의 영상의 분석에 따른 에지추출 과정과 제안한 대칭변환 방법을 포함하는 비전 알고리즘을 설명하고, 3장에서 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 실제 영상에 적용한 실험 결과를 살펴보고, 4장에서 결론을 제시함으로써 끝을 맺는다.

### 2. 증기발생기 전열관의 중심인식 알고리즘

본 장에서는 증기발생기 내부 환경에 따른 전열관 영상의 특징과 그에 따른 전열관의 중심인식 알고리즘을 그림 1의 흐름도에 따라 순차적으로 살펴본다.

#### 2.1 증기발생기 전열관 영상의 특징

원자로 외부에서 원자로 내부를 모니터링하고 영상 데이터를 획득하기 위한 카메라는 그림 2와 같이 로봇 매니퓰레이터(robot manipulator)의 상단에 설치되어 있다. 카메라는 기구적인 요인에 의해 탐촉자와는 다소 떨어진 위치에서 기울어진 각도를 유지하면서 로봇에 부착되어 있기 때문에 획득한 영상은 약간 기울어진 영상이 된다. 또한, 증기발생기 내부의 작업 공간은 밀폐된 어두운 환경이므로 필요한 검사를 위해 임시로 설치한

국부적인 조명의 영향으로 그림자가 나타난다. 따라서, 중심인식 알고리즘의 구현시 카메라의 초점거리, 설치각도, 조명배치 등의 몇 가지 제약사항이 설정되어야 하고, 조명에 의한 그림자의 영향을 배제 시켜야 한다[1,3].

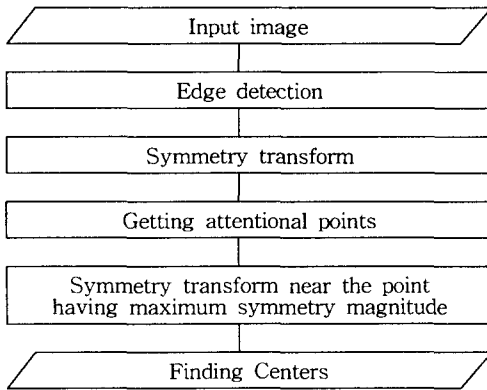


그림 1 전열관 중심인식 알고리즘의 흐름도  
Fig. 1 Flow chart for the center recognition algorithm of tubes

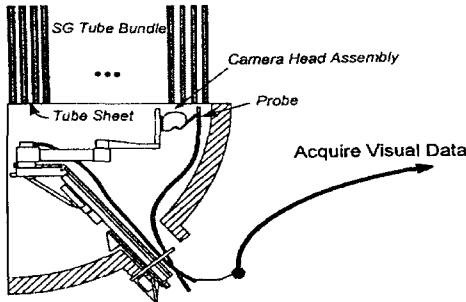


그림 2 증기발생기 전열관 검사를 위한 전체 구성도  
Fig. 2 Overall configuration diagram for inspecting steam generator tubes

## 2.2 Edge Detection

각 화소의 명도변화는 원래의 영상을 x방향으로 이동시킨 영상과 y방향으로 이동시킨 영상을 각각 구하고 이들 영상과 원래의 영상과의 차를 이용하여 구한다. 영상  $I(x,y)$ 내의 한점  $(x_k, y_k)$ 를  $p_k$ 라 정의하면,  $p_k$ 에서의 명도변화  $\nabla p_k$ 를 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 구한다.

$$\frac{\partial}{\partial x} p_k = I(x, y) - I(x+1, y) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} p_k = I(x, y) - I(x, y+1)$$

$$\nabla p_k = \left( \frac{\partial}{\partial x} p_k, \frac{\partial}{\partial y} p_k \right) \quad (2)$$

한편, 그림 3은 전열관 영상의 광원의 위치에 따른 밝기값을

나타낸다. 하나의 전열관은 밝기값을 기준으로 크게 3부분으로 나누어진다. 일반적으로 전열관은 금속성이므로 조명의 위치에서 마주보는 끝부분은 밝은 반사광이 존재(영역 C)하며, 내부의 조명이 국부 조명이기 때문에 그림자에 의해 가려진 부분(영역 A)은 아주 낮은 밝기값을 가지고 있다. 그리고 전열관에서 아주 밝은 영역과 어두운 영역 사이에 존재하는 부분(영역 B)은 전열관 외부와 유사한 밝기값을 가지고 있다. 따라서, 전열관을 포함한 주위의 에지 영상을 구해보면 영역 A 주변이 가장 선명하고 영역 C 주변에는 비교적 약한 에지점들이 존재한다. 전열관의 중심은 a와 a', b와 b', c와 c'를 연결하는 선분의 중점이 되므로 영역 A와 영역 C에서 전열관 외부에 접한 에지점들이 대칭변환에 사용되도록 에지점들을 선정한다.

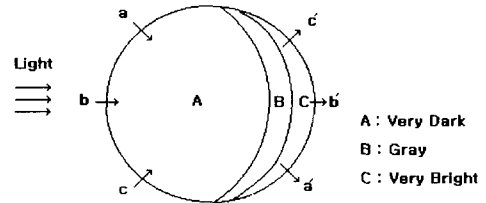


그림 3 광원의 위치에 따른 전열관의 밝기값  
Fig. 3 Brightness based on light arrangement

## 2.3 일반화 대칭변환

입력 영상에서 영상 처리의 주된 관심 영역인 전열관은 일반화 대칭변환을 이용하여 찾는다. 전열관은 거의 원형이거나 타원이기 때문에 이들의 대칭성을 이용하면 전열관의 중심을 중앙으로 하는 관심 영역을 분할해 낼 수 있다. 그러나, 일반화 대칭변환을 그대로 적용할 경우 국부 조명에 의한 그림자 때문에 전열관의 정확한 중심을 찾는 데 어려움이 따른다. 따라서, 본 논문은 각 화소간의 대칭도를 구하는 과정에서 입력 영상의 분석 결과를 바탕으로 그림자의 영향을 배제하면서 전열관의 중심을 인식할 수 있도록 위상가중함수(phase weight function)를 변형하여 사용한다.

대칭변환에서 각 화소들의 대칭 기여도는 각 화소의 명도변화의 크기(magnitude of intensity gradient)와 방향(orientation of intensity gradient)을 이용하여 구한다. 명도변화의 크기  $r_k$ , 명도변화의 방향  $\theta_k$ 는 각각 아래의 식 (3), 식 (4)와 같이 정의된다[4].

$$r_k = \log(1 + \|\nabla p_k\|) \quad (3)$$

$$\theta_k = \arctan\left(\frac{\partial}{\partial x} p_k / \frac{\partial}{\partial y} p_k\right) \quad (4)$$

대칭인 위치에 존재하는 두 화소  $p_i, p_j$  사이의 거리가중함수(distance weight function)  $D_\sigma(i,j)$ [5]와 위상가중함수  $P(i,j)$ 는 각각 식 (5), 식 (6)과 같이 정의된다.  $\sigma$ 는 대칭 마스크의 크기를 나타내고,  $a_{ij}$ 는  $p_i$ 와  $p_j$ 를 연결하는 직선과 수평선 사이의 반시계 방향으로의 각도이다.

두 화소  $p_i$ 와  $p_j$ 의 대칭기여도  $C(i,j)$ 는 식 (7)과 같다.  $r_i$ 와  $r_j$ 는

각각 식 (3)으로 정의되는 화소의 밝기를 나타낸다[4].

$$D_{\sigma}(i, j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

$$F(i, j) = \begin{cases} [1 + \cos(\theta_i + \theta_j - 2\alpha_{ij})] \cdot [1 + \cos(\theta_i - \theta_j)], & \theta_1 \leq \theta_i \leq \theta_2 \text{ and } \theta_3 \leq \theta_j \leq \theta_4 \\ [1 - \cos(\theta_i + \theta_j - 2\alpha_{ij})] \cdot [1 - \cos(\theta_i - \theta_j)], & \\ \text{otherwise} & \end{cases} \quad (6)$$

$$C(i, j) = D_{\sigma}(i, j)F(i, j)r_i r_j \quad (7)$$

대칭 기여도는 일반적으로 두 화소간의 거리가 가까울수록 큰 값을 갖도록 설정되어 있으며, 명도 변화의 방향  $\theta_i$ 와  $\theta_j$ 가 미리 설정한 특정 범위에 있을 경우에는 두 화소의 명도 변화의 방향이 같을수록, 그렇지 않을 경우 명도 변화의 방향이 반대일수록 큰 값을 갖도록 정해진다. 그림 3의 증기발생기 전열관의 영상에서 a 부근의 에지점에 대한 명도변화의 방향을  $\theta_i$ 에 대응시키면 a' 부근의 에지점은  $\theta_j$ 에 대응된다. 마찬가지로 b, c 부근의 에지점을  $\theta_i$ 에 대응시키면 b', c' 부근의 에지점은  $\theta_j$ 에 각각 대응된다.

식 (8)은  $p_i$ 와  $p_j$ 의 중점  $p$ 로 정의되는 대칭 화소 집합을 나타낸다.  $p$ 에서의 대칭 정도를 의미하는 대칭도(symmetry magnitude)  $M_{\sigma}(p)$ 는 식 (9)와 같이 구한다[4].

$$\Gamma(p) = \{(i, j) \mid \frac{p_i + p_j}{2} = p\} \quad (8)$$

$$M_{\sigma}(p) = \sum_{(i, j) \in \Gamma(p)} C(i, j) \quad (9)$$

#### 2.4 중심인식 알고리즘

전열관의 중심인식 알고리즘은 아래와 같이 크게 세 단계로 나누어져 있다.

- ① 식 (10)을 사용하여 대칭도  $M_{\sigma}(p)$ 의 일정 영역에 걸친 평균값  $M_r(x, y)$ 가 최대인 점( $x_m, y_m$ )를 찾는다.

$$\{(x, y) \mid \max(M_r(x, y))\} \\ M_r(x, y) = \frac{\sum_{x=r-r}^{r+r} \sum_{y=r-r}^{r+r} M_{\sigma}(x, y)}{A}, A = (2r+1)^2 \quad (10)$$

- ②  $M_r(x, y)$ 가 최대인 점( $x_m, y_m$ )의 주변의 에지점들만을 이용하여 대칭 변환을 다시 적용하고, 대칭도가 최대인 점을 찾아서 전열관의 중심으로 결정한다.
- ③ ②의 과정에서 대칭변환에 사용된 에지점들 중에서 전열관의 중심을 결정하는 데 기여한 에지점을 제거하고, ①과 ②의 과정을 되풀이 하여 각 전열관의 중심을 구한다.

### 3. 실험 및 고찰

카메라를 통해 획득한 전열관 영상은 640x480 크기의 256 단계의 흑백 영상이다. 그러나 데이터 처리량을 줄이기 위해 80x60 크기의 축소된 영상을 사용하였다.

그림 4의 (a)는 증기발생기 내부의 실제 전열관 영상을 보여 주고 있다. 평면으로 보이는 부분을 tube sheet라고 하며, 원형으로 보이는 부분이 전열관이다. 그리고, 영상의 우측에 ECT 탐촉자를 탑재한 로봇 매니플레이터의 엔드-이펙터(end-effector)가 보인다. 탐촉자는 매니플레이터의 조작에 의해 전열관 내로 투입되어 결함측정을 위한 신호를 수집한다. 그림 4의 (a)에서 알 수 있듯이, 카메라에서 가까이 위치한 전열관의 영상은 크고 원형에 가까운 형태를 가지고 있지만, 점차 카메라에서 멀어질수록 전열관의 크기가 작고 약간 타원 형태를 띠고 있으며, 명암도(contrast)가 상당히 낮다. 그림 4의 원래의 영상 (a)는 위치에 따라 명암도의 차이가 있어서 어두운 영역에 있는 전열관을 구별하기가 어려우므로 실제 처리대상 영상으로는 히스토그램 평활화 영상인 그림 4의 (b) 영상을 사용한다.

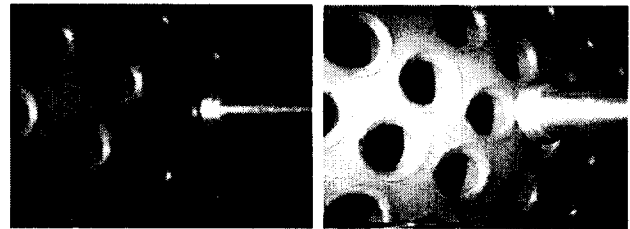


그림 4 증기발생기 전열관을 포함하고 있는 영상 데이터  
(a) 원영상 (b) 히스토그램 평활화 영상

Fig. 4 Image data including steam generator tubes  
(a) Original image (b) Histogram equalized image

그림 5는 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 얻은 에지점들과 그 중에서 본 논문의 대칭변환에 사용한 에지점들을 나타낸다. 증기발생기 내부의 국부 조명에 의한 그림자에 기인한 에지점들이 제거되었음을 알 수 있다.

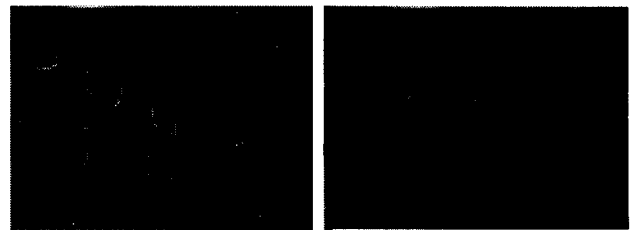


그림 5. 본 논문에서 대칭변환에 사용한 에지점들  
(a) 전체 에지점들 (b) 사용한 에지점들

Fig. 5 Edge points used in the symmetry transform of this paper  
(a) Total edge points (b) Used edge points

그림 6의 (a)~(f)의 영상은 일반화 대칭변환을 적용하여 전열관의 중심을 찾기 위한 과정과 결과들을 나타낸다. 결과 영상은 80x60 크기의 축소된 영상으로부터 얻은 결과를 640x480 크기의 원래의 영상에 겹쳐 나타낸 것이다.

그림 6의 (a)는 첫 번째 대칭변환의 결과를 보여준다. 전열관의 중심 부근에 대칭성이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 대칭 마스크의 크기인  $\sigma$ 는 13을 사용하였다. 그림 6의 (b)는 (a) 영상에서 최대 대칭도를 나타내는 점 부근에 대해 대칭변환을 적용한 결과이다. 그리고 그림 6의 (c)는 (b)에 기여한 에지점들을 제거한 후 대칭변환을 적용한 결과이고, 그림 6의 (d)는 몇 번의 (a), (b)와 (c)의 과정을 거친 후 남은 에지점들에 대한 대칭변환의 결과이다. 그림 6의 (c)와 (d)의 영상들을 분석해 보면 최대 대칭도에 기여한 에지점들을 제거한 후 다시 대칭변환을 적용할 경우에 제거된 에지점들의 간섭에 기인한 대칭 기여분이 사라졌음을 보여주고 있다. 그림 6의 (e)는 (d)에서 최대 대칭도를 나타낸 점 부근에 대한 대칭변환의 결과이고, 그림 6의 (f)는 마지막 결과 영상으로서 대칭변환을 적용하여 구한 전열관의 중심들을 나타낸다.

본 논문은 일반화 대칭변환을 이용한 원전 증기발생기의 각 전열관의 중심을 인식하기 위한 알고리즘을 제시하였다. 증기발생기 전열관의 영상을 분석해 보면 거의 완전한 원이거나 약간의 타원이 되어 각 전열관은 그 중심에 대해 대칭성을 띠고 있기 때문에, 전열관의 중심을 찾기 위하여 대칭변환을 적용하였다. 그러나, 일반화 대칭변환을 그대로 적용할 경우 조명이 비취지는 각도에 의한 그림자 때문에 전열관의 정확한 중심을 찾는 데 어려움이 따른다. 따라서, 본 논문은 각 화소간의 대칭도를 구하는 과정에서 조명에 의한 그림자의 영향을 보상하면서 전열관의 중심에 대칭성이 크게 나타나도록 에지점들을 선정하고, 위상가중함수를 변형 적용함으로써 전열관의 중심이 효과적으로 인식되도록 하였다. 제안한 알고리즘을 증기발생기 전열관의 실제 영상에 적용한 결과는 증기발생기내의 국부조명에 의한 그림자의 영향을 극복하면서 전열관의 중심들을 효과적으로 인식하고 있음을 보여준다. 앞으로 실시간 처리를 위한 연구가 필요하다.

## 참고문헌

- [1] L. Brem and N. Nandhakumar, "A Machine Vision System for Positioning a Teleoperated Servicing Tool Head", *Combustion Engineering*.
- [2] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, "Digital Image Processing", Addison Wesley, 1993.
- [3] P. Rzasa and M. Allen, "A Machine Vision System for Verifying End-Effector Locations of Robotic Devices in Steam Generators", *Proc ANS Fifth Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*, pp. 217-224, 1993.
- [4] D. Reissfeld, H. Wolfson and Y. Yeshurun, "Context-Free Attentional Operators: The Generalized Symmetry Transform", *International Journal of Computer Vision*, 14, pp. 119-130, 1995.
- [5] 구탁모, 전준형, 최홍문, "일반화 대칭변환을 변형한 관심 연산자에 의한 사전 정보없는 다중 물체 분할", 전자공학회 논문지, 제 34권 C편 제 4호, pp. 236-244, 1997.

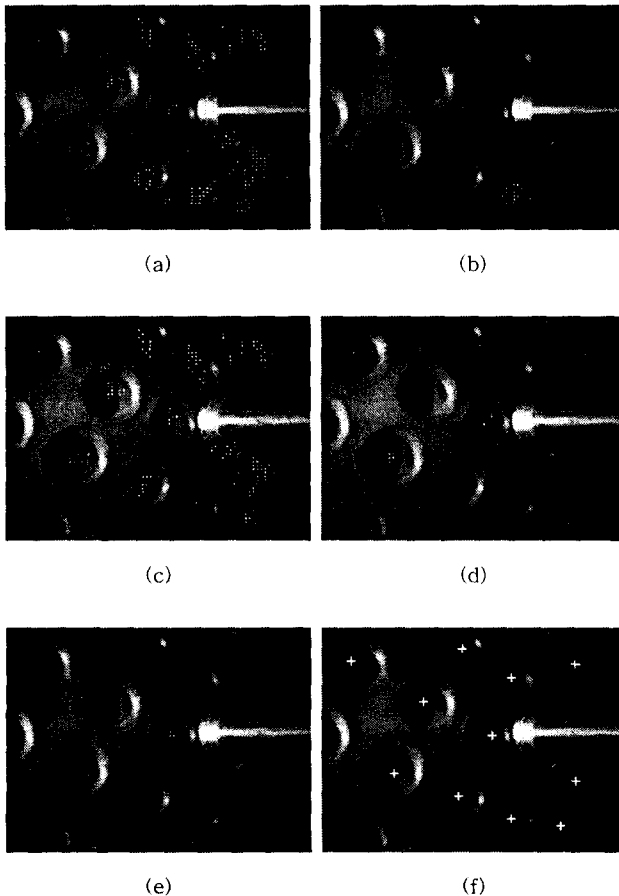


그림 6. 대칭변환을 적용한 전열관 중심인식 과정

Fig. 6 Process for recognizing the centers of steam generator tubes