

원자력 발전소 증기세관 자동검사 및 보수 기술개발

서운학*, 정동연*, 이재욱*, 한성현**

Development of Automatic Inspection and Maintenance Technology for Steam Generator in Nuclear Power Plants

W.H.Seo*, D.Y.Jung*, J.W.Lee*, S.H.Han**

Key words: Steam generator, Nuclear power plant, Automatic test and repair, Vision system, DSP(TMS320C31)

Abstract

In this paper, we propose a new approach to the development of the automatic vision system to examine and repair the steam generator tubes at remote distance. In nuclear power plants, workers are reluctant of works in steam generator because of the high radiation environment and limited working space. It is strongly recommended that the examination and maintenance works be done by an automatic system for the protection of the operator from the radiation exposure. Digital signal processors are used in implementing real time recognition and examination of steam generator tubes in the proposed vision system. Performance of proposed digital vision system is illustrated by simulation and experiment for similar steam generator model.

1. 서 론

원자력 발전소에서는 핵연료 및 관련 설비의 오염으로 인한 방사능 방출 때문에 인간이 유지 보수작업을 행하기에는 많은 어려움이 있다. 특히 원자력 발전소의 증기 발생기는 U자형 모양의 금속재질의 관으로 원자로 내에서 태워진 1차 냉각수가 흐르면서 전열관의 외부의 2차 냉각수를 증기로 만들어 터빈을 돌게 하는 방사능 차폐와 열 교환의 두 가지 목적을 동시에 수행하는 원자력 발전의 매우 중요한 장치중의 하나이다. 또한, 원전 스팀제너레이터의 증기세관은 고온 고압의 방사선 물질을 함유한 유체 분위기에서 운전되며, 사용중 스러지에 의한 튜브 침식, 튜브 진동에 의한 응력부식 파손, 제작시의 가공 잔류 응력에 의한 파손 및 기동, 정지의 반복으로 인한 열피로응력 등으로 증기 발생기 tubesheet와 튜브의 접합부위에 응력부식 파손이 발생하고 있다. 이렇게 파손된 튜브는 플러깅(plugging)되거나 슬리빙(sleeving)되어야만 방사선 누

출 없이 열효율을 떨어뜨리지 않고 계속 사용할 수 있게 된다. 플러깅이나 슬리빙 공정은 좁은 입구를 통해 폐공간 내에서 작업이 이루어져야 하기 때문에 보수작업의 정확성을 보장할 수가 없고, 작업 시간이 길어져 관련 작업자의 피폭량이 커지는 등 많은 문제점이 대두되고 있다. 그래서 최근에는 로봇을 개발하여 이러한 문제를 해결하는 것이 원자력 발전소의 유지 보수에 필수적인 요소가 되고 있다. 이런 용도의 활용을 위한 로봇은 기존의 산업 현장에서 운용되고 있는 로봇과 같은 단순 반복 작업이 아닌 보다 능동적인 태스크를 요구하고 있다. 증기 발생기 세관 검사 및 보수에 필요한 태스크는 정해진 반복 작업이 아니라 폐공간 내에서 증기 발생기 하부에 있는 18,000여개의 홀(hole) 중에서 결함이 있는 홀의 위치를 찾아낸 후 그 홀에 대해 플러깅이나 슬리빙 작업이 행해져야 한다. 로봇이 폐공간내에서 18,000 여 개의 홀 중에서 결함이 있는 홀의 정확한 위치를 찾아내고 플러깅이나 슬리빙 작업의 정확성과 신뢰성을 보장하기 위해서는 이 태스크에 맞는 비전 시스템의 개발이 필수적이라 할 수 있겠다. 본 연구의 가장 중요한 목적은 원자로 스팀 제너레이터의 내부는 방사선이 방출되므로 지금까

* 경남대학교 기계설계학과 대학원

** 경남대학교 기계자동화 공학부

지의 사람이 직접 들어가서 결손유무를 검사할 경우에는 방사선으로 인한 인명피해가 극심하고, 또한 숙련 공들이 원자로 내에 들어가기로 기피하는 실정이므로 이의 문제점들을 해결하고자 하는 것이 가장 중요한 목적이라 할 수 있다.

이와 같은 목적을 위하여 컴퓨터 비전을 이용하여 사람들이 들어가지 않고 원거리에서 PC 화면상에서 원형 홀의 공간적인 위치와 형상을 판단할 수 있는 자동검사에 대한 연구를 수행한다. 일반적으로 홀의 정확한 공간 위치를 측정하기 위해서는 두 대의 카메라를 사용하는 스테레오 비전(stereo vision)을 사용하여야 하지만, 계산 과정의 복잡성과, 많은 계산 시간의 소요 그리고 경우에 따라서는 잘못된 해를 구하거나 전혀 구하지 못할 수도 있다. 하지만 대상체가 원형 홀이고 수직 상방향에서 검사가 시행되는 특성을 고려한다면 한대의 카메라만 사용하여도 정확한 위치 측정이 가능하다.(1)-(3)

원거리에서 스텝 제너레이터 세관의 검사와 보수를 행할 수 있는 자동 비전 시스템을 개발하고자한다. 핵발전소에서는 높은 방사능 환경과 제한된 작업공간으로 인하여, 작업자들이 스텝 제너레이터 내에서 작업하기를 회피하고 있다. 방사선 누출로부터 작업자들을 보호하기 위해 자동 시스템에 의해 검사와 유지 보수 작업이 이루어져야 한다는 사실이 제기되어왔다. 제안된 디지털 비전 시스템은 스텝 제너레이터 세관의 실시간 인식과 검사를 실현하기 위해 사용되었다. 제안된 디지털 비전 시스템의 성능은 유사 스텝 제너레이터 모의 모델에 대한 실험적 방법으로 입증한다.

2. 기하학적 왜곡

왜곡(distortion)이란 공간상의 물체를 영상화할 때 영상 평면상에 투영되는 물체의 영상 좌표가 렌즈 광학계에서 예상한 이상적 위치를 벗어남으로서 영상이 일그러져 나타나는 현상을 왜곡이라 한다. 기하학적인 왜곡은 영상 평면내에서 영상점들의 위치를 고려한다. 설계 그리고 카메라 광학계를 구성하는 렌즈 조립의 여러 가지 종류의 불완전성의 결과로서, 그 진실성을 유지할 수 없고, 위치 오차를 정확하게 고려한 다음과 같은 표현으로 바뀌어져야 한다.

$$\begin{aligned} u' &= u + f_u(u, v) \\ v' &= v + f_v(u, v) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 u 와 v 는 관찰될 수 없는 왜곡이 없는 상태에서의 영상좌표이고 u' 와 v' 가 왜곡이 있는 상태에 대응되는 좌표이다.

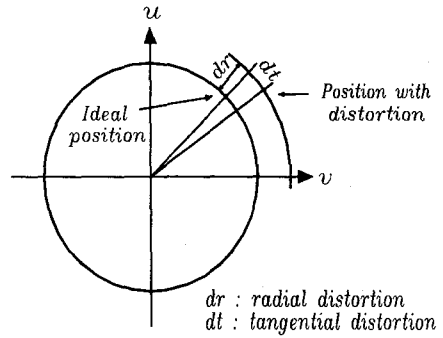


그림 1. Radial 왜곡과 tangential 왜곡.

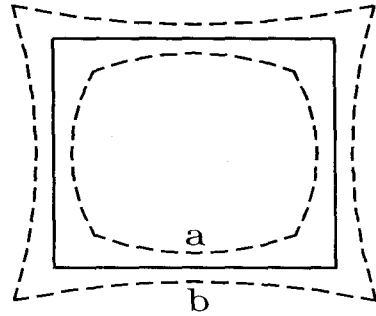


그림 2. Radial 왜곡의 영향.

2.1 Radial distortion

Radial distortion은 주어진 영상점이 이상적인 위치로부터 안쪽이나 바깥쪽으로의 변위를 생성시킨다. 이런 종류의 왜곡은 주로 렌즈 요소의 반지름 방향 굴곡 곡선의 결합에 의해 생긴다. Fig. 2는 radial distortion의 효과를 설명한다.

카티션 영상 좌표의 각각의 축에 따른 radial 왜곡의 양은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \delta_{ur} &= k_1 u(u^2 + v^2) + O[(u, v)^5] \\ \delta_{vr} &= k_1 v(u^2 + v^2) + O[(u, v)^5] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $u = \rho \cos \varphi$, $v = \rho \sin \varphi$ k_1 는 radial distortion의 계수, ρ 는 영상평면의 주점으로부터 반지름 방향 거리이다.

2.2 Decentering Distortion

실제 광학 시스템은 렌즈 요소들의 광학적 중심이 정확히 일치하지 않는 여러 가지 종류의 decentering에 영향받는다. 이런 결합은 무엇이 decentering distortion으로 불리는지를 소개한다. 카티션 영상 좌표의 각각의 축에 따른 decentering 왜곡의 양은 다음과 같이 정의된다.

$$\delta_{ud} = p_1(3u^2 + v^2) + 2p_2uv + O[(u, v)^4] \quad (3)$$

$$\delta_{vd} = 2p_1uv + p_2(u^2 + 3v^2) + O[(u, v)^4]$$

여기서, $p_1 = -j_1 \sin \varphi_0$, $p_2 = j_1 \cos \varphi_0$

2.3 Thin Prism Distortion

Thin prism distortion은 카메라 조립뿐만 아니라 렌즈 설계와 제조에서의 불완전함(예를 들어 렌즈 요소의 약간의 tilt 혹은 영상 센싱 배열)으로부터 생긴다.

카티션 영상 좌표의 각각의 축에 따른 Thin prism 왜곡의 량은 다음과 같이 정의된다.

$$\delta_{up} = s_1(u^2 + v^2) + O[(u, v)^4] \quad (4)$$

$$\delta_{vp} = s_2(u^2 + v^2) + O[(u, v)^4]$$

$$s_1 = -i_1 \sin \varphi_1, \quad s_2 = -i_1 \cos \varphi_1$$

2.4 Total Distortion

위의 distortion이 모두 존재할 때, 유효한 distortion은 그기에 해당하는 수식들을 합치므로써 모델링될 수 있다. 식 (2), (3) 그리고 (4)을 결합하는 것은 u 와 v 축을 따르는 distortion의 전체량을 제공한다. 3차 이상의 고차항들을 무시함으로써 우리는 다음과 같은 두 식을 얻는다.

$$\delta_u(u, v) = s_1(u^2 + v^2) + 3p_1u^2 + p_1v^2 + 2p_2uv + k_1u(u^2 + v^2) \quad (5)$$

$$\delta_v(u, v) = s_2(u^2 + v^2) + 2p_1uv + p_2u^2 + 3p_2v^2 + k_1v(u^2 + v^2)$$

$$g_1 = s_1 + p_1, \quad g_2 = s_2 + p_2, \quad g_3 = 2p_1, \quad g_4 = 2p_2$$

라 놓으므로써, 식 (9)의 표현은 다음과 같이 된다.

$$\delta_u(u, v) = (g_1 + g_3)u^2 + g_4uv + g_1v^2 + k_1u(u^2 + v^2) \quad (6)$$

$$\delta_v(u, v) = g_2u^2 + g_3uv + (g_2 + g_4)v^2 + k_1v(u^2 + v^2)$$

3. 완전한 카메라 모델

식 (1)에 따라 u 와 v 축을 따르는 distortion을 고려함으로써, distortion-free 영상점 (u, v) 와 이 영상점에 해당하는 pixel location 사이의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$u + \delta_u(u, v) = (r - r_0)/s_u \quad (7)$$

$$v + \delta_v(u, v) = (c - c_0)/s_v$$

여기서 새로운 변수를 도입하므로써

$$\hat{u} = (r - r_0)/f_u \quad (8)$$

$$\hat{v} = (c - c_0)/f_v$$

식 (7)은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{u}{f} = \hat{u} - \frac{\delta_u(u, v)}{f} \quad (9)$$

$$\frac{v}{f} = \hat{v} - \frac{\delta_v(u, v)}{f}$$

정확한 u, v 는 실제 노이즈가 내포된 관찰로부터 얻어질 수 없기 때문에 모델링된 왜곡항들은 \hat{u}, \hat{v} 에 의해 대체시킴으로서 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{u}{f} = \hat{u} + \delta'_u(\hat{u}, \hat{v}) \quad (10)$$

$$\frac{v}{f} = \hat{v} + \delta'_v(\hat{u}, \hat{v})$$

계수 $k_1, g_1 \sim g_4$ 를 재정의하므로써, 식 (5), (6) 그리고 (10)의 표현은 완전한 카메라 모델은 식 (11)으로 유도된다.

$$\frac{r_{1,1}x + r_{1,2}y + r_{1,3}z + t_1}{r_{3,1}x + r_{3,2}y + r_{3,3}z + t_3} = \hat{u} + (g_1 + g_3)\hat{u}^2 + g_4\hat{u}\hat{v} + g_1\hat{v}^2 + k_1\hat{u}(\hat{u}^2 + \hat{v}^2) \quad (11)$$

$$\frac{r_{2,1}x + r_{2,2}y + r_{2,3}z + t_2}{r_{3,1}x + r_{3,2}y + r_{3,3}z + t_3} = \hat{v} + g_2\hat{u}^2 + g_3\hat{u}\hat{v} + \hat{v} + (g_2 + g_4)\hat{v}^2 + k_1\hat{v}(\hat{u}^2 + \hat{v}^2)$$

식 (11)은 왜곡 계수들 k_1, g_1, g_2, g_3, g_4 에 관해서 선형이라는 것을 알 수 있다.

4. 실험 및 결과

4.1. 실험 장치

본 연구에서 설계 제작된 영상처리용 하드웨어는 CPU로 60-ns Single Cycle Instruction 실행시간 (Execution Time)을 가진 고속의 DSP인 TMS320C30이 사용되었으며 PC와 데이터 교신은 인터럽트 핸드셰이크 방식을 통하여 이루어지며 이를 위하여 PC측에서는 D-segments영역을 이용하도록 설계하였다. 그리고 영상 처리용 알고리즘 개발은 PC측과 DSP측에서 모두 개발할 수 있도록 설계되었으며 개발된 알고리즘은 Buffer를 통하여 비전 보드의 프로그램 램 영역으로 다운로드되며, PC측에서 인터럽트를 통하여 DSP가 프로그램을 수행하도록 설계되었으며, 영상처리 결과는 데이터 램 영역에 저장할 수 있도록 설계되었다. 설계된 영상 처리용 하드웨어의 전체 구성을 나타내는 블록선도는 그림. 3과 같다.

설계된 비전보드는 CCD카메라와 인터페이스하기 위한 카메라 인터페이스 모듈, CCD카메라로부터의 아날로그 비디오 신호를 디지털 영상 데이터로 변환하기 위한 A/D변환기, 디지털 영상 데이터를 저장하기 위한 영상 데이터 메모리, 영상 데이터를 처리함으로써 유효한 정보를 추출하기 위한 영상 프로세서(Image Processor), 처리된 영상 또는 저장된 디지털 영상 데이터를 모니터에 출력하기 위한 D/A 변환기, 커서

또는 문자 그래픽 형상을 원래의 영상과 겹쳐 디스플레이 하도록 하기 위한 그래픽 오버레이 메모리(Graphic Overlay Memory)등의 모듈로 설계되어 있다. 이 비전보드의 호스트 컴퓨터는 보통 IBM PC, VME System이 사용될 수 있도록 설계되었고, 비전보드 호스트 컴퓨터의 Add-on Board로 사용되도록 설계되었다.

비전 소프트웨어는 호스트 컴퓨터의 운영체제(Operation System)하에서 동작하며, 호스트 컴퓨터의 한 어플리케이션 소프트웨어로 작동한다. 그러므로, 이 보드는 여러 기능을 가지고 있는 시스템의 한 모듈로서 응용될 수 있기 때문에 시스템 인테그레이션에 의한 특장용도의 시스템 개발이 편리하도록 설계되었다.

설계 제작된 비전 보드는 Texas Instrument사의 고성능 디지털 신호 처리기 TMS320C30을 CPU로 사용함으로써 데이터 처리 성능을 획기적으로 향상시킨 것 외에 아래와 같은 특징을 가지고 있다.

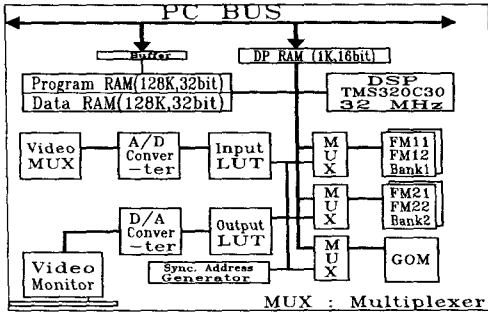


그림. 3. 영상처리 하드웨어의 블록선도

- 2비트 고속 데이터 처리 성능(TMS320C30, 16 MIPS)
- 고해상도 영상처리(640(수평)×480(수직), 256(계조))
- 최대 36장(Optional)의 영상 저장 가능(기본 : 4장)
- 그래픽 오버레이 기능
- 최대 4개의 카메라 접속 가능
- 모노크롬 영상 출력
- 최대 16개의 입력/출력 Look-up Table 설정 가능
- 사용자가 직접 DSP PROGRAM을 구현할 수 있는 구조
- 대용량의 프로그램 메모리(최대 128K × 32 bit)
- 대용량의 데이터 메모리(최대 128K × 32 bit)

4.2. 실험방법 및 결과

본 연구에서 실험에 사용된 비전보드의 CPU는 TI사의 TMS320C31의 디지털 신호처리기로 데이터 체계가 Floating point 체계로서 명령 수행 시간이 60ns이며 ROM, RAM이 각각 한 개 및 두 개로서 구성된 원칩 프로세서이다. 디지털신호처리기는 신호처리를 디지털 적으로 하는 특수한 마이크로 프로세서로서 종

래의 아날로그 신호처리기에서는 실현이 곤란하던 기능을 높은 정확도, 고안정성, 고속성으로 실현할 수 있는 특징을 갖춘 프로세서이다. 이러한 특징을 바탕으로 수학적 연산을 많이 필요로 하는 알고리즘의 프로그램화가 가능하고, 고속으로 실시간 처리가 이루어진다. 또한 프로그래밍의 유연성으로 시스템의 유연성 또한 향상됨으로서 비용절감 효과와 신뢰성 향상을 기대할 수 있다.

그림. 4는 비전 시스템의 전체 구조를 나타내는 것으로, 전체 비전 시스템의 구성은 카메라로부터 취득된 아날로그 영상은 video 멀티플렉서로 4:1 멀티플렉싱을 하여 A/D 변환기에 의해 디지털 영상 데이터로 변환되어 입력 LUT(look up table)로 입력된다. LUT를 통과한 영상 데이터는 비전 버스에 연결되며, <BANK1> 또는 <BANK2>의 프레임 메모리(frame memory, FM)에 입력되기 위해 MUX를 통과하게 된다. 이 멀티플렉서는 FM에 연결되는 어드레스 및 데이터 버스의 신호원 2개, 즉 vision bus와 DSP bus를 선택하는 역할을 한다. 출력 LUT를 통과한 영상 데이터는 D/A 변환기를 통과함으로써 아날로그 비디오 신호로 변환되어 모니터에 출력된다.

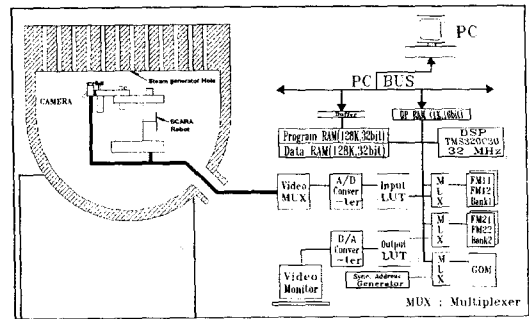


그림. 4. 원자력 발전소의 스택제너레이터에 대한 비전 시스템의 구조

LUT는 A/D변환기를 거쳐서 디지털로 변환된 데이터를 프레임 메모리에 저장하기 전에 하드웨어적으로 일차원적인 변환을 하기 위해서 메모리로 구성된 변환 테이블로서 이 LUT를 적절히 사용함으로써 영상 처리 시간을 단축시켜 영상 속 물체의 실시간 윤곽 추출이 가능하게 한다.

586 PC에 비전 보드가 연결되어 서로 통신을 하면서 데이터나 파라메타들을 주고받는데, 비전 보드의 CPU인 DSP와 PC와의 데이터 교신은 듀얼 포트 램(Dual-Port RAM, 1K x 16bit)을 통해서 이루어진다. 두 CPU간에 전달되는 데이터의 내용은 각 비전 함수들마다 정해져 있으며, 인터럽트 핸드셰이크에 의해 데이터 교신이 이루어진다.

제안된 방법의 타당성을 입증하기 위하여 실 영상에

의한 실험을 수행하였다. 실험 방법은 원자로 스팀 제너레이터의 홀(hole)의 유사모형을 제작하여 이에 대한 모의 실험을 수행하였다. 유사모형의 모델은 두께 20mm인 철판에 직경 40mm인 180개의 홀을 제작하였다. 각 홀 중심간의 거리는 100mm로 정삼각형 배열로 위치시켰다. 조명은 카메라와 같은 방향에서 300w의 섬유 광학 조명기를 사용하였고 렌즈는 16mm렌즈를 사용하였다. 카메라는 삼성항공 제품인 CCD 흑백 카메라 모델을 사용하였다. 제안된 방법의 타당성을 입증하기 위하여 실 영상에 의한 실험을 수행하였다. CCD 카메라는 로봇의 2번째 링크 끝에 부착하고, 제작된 모형을 CCD카메라의 상부에 장착하고 CCD카메라로 홀의 수직 하방향에서 영상을 취득하여 처리하는 방식의 모의 실험을 수행하였다. 각 홀의 중심점을 찾아가는 방법은 180개 홀의 모든 좌표점을 기준좌표점에 기준하여 제반 좌표점을 메모리 시켜서 좌표점 $P_0(0, 0)$ 에서 $P_{180}(180, 180)$ 을 자동적으로 찾아가서 일정시간동안 한 개의 홀의 형상을 인식한 후, 다음의 좌표홀을 이동하는 프로그램을 개발하여 사용하였다. 불량 및 정상품의 구별은 우선 정상홀의 데이터를 기준입력으로 시킨 다음 모든 홀의 형상인식을 한 후, 50픽셀 이내의 오차를 기준 허용 오차로 설정하여 그 이상의 오차값을 나타내는 hole은 불량품으로 판별하고, 그 이내의 범위오차를 나타내는 hole은 정품으로 판별하도록 C++을 이용한 S/W를 개발하여 적용하였다. 그림. 5는 실제 스팀 제너레이터 홀의 수가 18,000개인데 대한 축소모형인 180개 홀에 대한 기준좌표계와 진행방향 및 순서를 나타낸다.

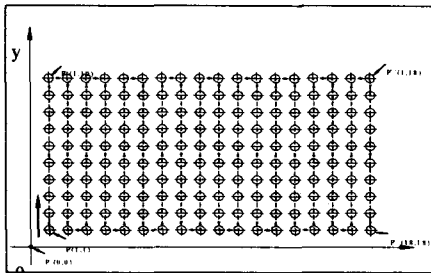


그림. 5. 스팀제너레이터 홀의 좌표계

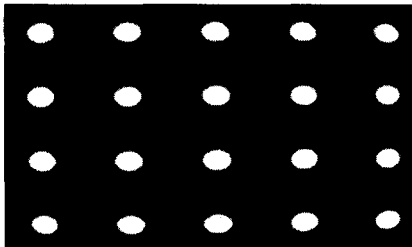


그림. 6. 실험용 스팀제너레이터 홀의 축소 모델

그림. 6은 실험에 이용된 원자로 스팀제너레이터의 축소유사모델로 제작한 실험에 사용된 축소모델의 평면형상에 대한 CCD 카메라 투영에 접하는 부분의 영상을 나타내고 있다. 이것은 50x의 철판으로 제작하였고, 홀의 크기는 실제 홀의 크기의 0.5배 크기로 하였다.

그림. 7은 실험의 전체 절차를 나타낸다. 로봇이 카메라를 홀의 수직 상방향으로 이동시키면 카메라가 영상을 취득하고 이 영상을 검사의 정밀도를 향상시키기 위하여 확대한 후 중위수 필터법에 의해서 영상 평활화처리를 한 후 방정식 (18)에 제시된 영상 처리 알고리즘으로 이진 영상으로 만들어 경계를 추출한다.

경계 추출된 영상에서 홀의 중심점 좌표를 구하기 위하여 방정식 (19)과 (20)에 제시된 알고리즘을 적용하여 각각의 홀에 대한 중심점 좌표를 얻는다. 홀 중심의 수직 상방향에 카메라의 광학중심이 위치하는가를 확인하여 위치하지 않으면 그 벗어난 만큼을 이동시킨 후 홀 중심의 수직 상방향에 카메라의 광학중심이 위치하면 각 중심점 좌표점을 기준하여 수평·수직 스캔라인을 따라 방정식 (21)과 (22)를 사용하여 홀의 수평·수직 지름을 구하고 각각의 홀에 대하여 이 두 값을 비교하여 더 큰 값을 선택하여 검사의 기준으로 정한다. 선택된 기준에 대해서 경계를 따라 원 방향으로 회전하면서 10도 단위로 홀을 총 36분할한다. 방정식 (24)에서 (29)를 이용하여 검사를 수행한다. 모든 홀에 의한 검사가 수행되지 않았다면 위에 제시된 과정을 되풀이하여 모든 홀에 대한 검사를 수행한다.

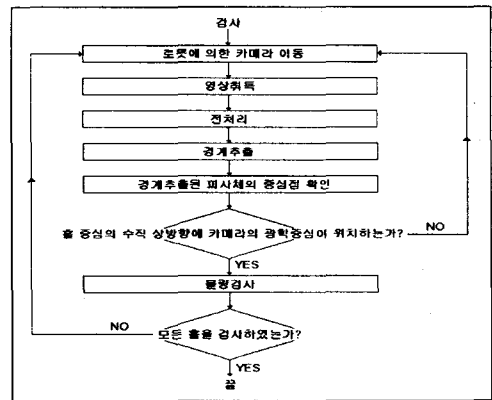


그림. 7. 실험을 위한 흐름도

그림. 8은 스팀제너레이터 모형으로부터 취득된 영상처리 전의 영상의 나타낸다. 그림. 9는 위에서 제시된 영상처리 알고리즘을 적용하여 얻어진 결과를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 왼쪽 홀은 불량, 오른쪽 홀은 정상 판정을 받은 홀을 나타내고 있다. 실험에서는 제안된 방법을 사용하여 180개의 홀만을 검사하였다. 이때 소요된 시간은 50여분이 필요했고, 검사 결과

는 25개의 불량홀 중에서 불량상태가 미소한 1개만이 정상홀로 잘못 판별함으로써 99.4% 신뢰성을 입증하였다. 정상 판정하였다. 본 연구의 중요한 목적은 우선적으로 지금까지 사람이 직접 원자로 내부에 들어가서 결손유무를 확인하는 방법은 방사능의 유출로 인한 인명피해(국내외적으로 상당히 심각한 실정임)가 크므로, 사람이 원자로 내부에 입실에 하지 않고, 원거리 사무실에서 비전을 통한 PC상에서 이의 검사를 수행하고자 하는데 가장 큰 목적이 있다. 따라서, 이 방법의 첫 번째 과제는 기존의 수작업의 신뢰도와 비전처리를 통한 자동검사의 결손유무 판단의 신뢰도의 비교하는 방법이 중요하다. 실험 모의 모델의 몇 개의 홀에 결손을 부여한 상태에서 100번의 검사를 반복 진행시킨 결과 거의 완벽한 처리 결과를 보여 주었다.

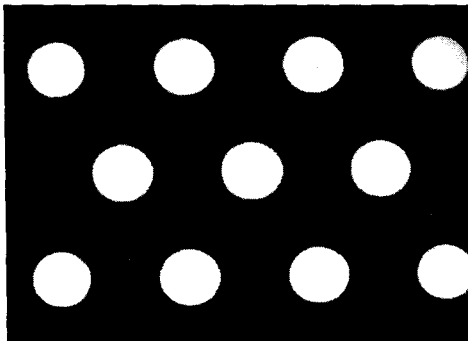


그림. 8. 카메라로부터 취득된 실 영상



그림. 9. 홀의 인식결과

5. 결 론

본 연구에서는 사람이 직접 원자로에 입실하여 원자로 스팀 제너레이터의 홀의 결손상태의 유무를 검사하던 것을 로봇을 이용해 원자로 내부의 자동검사를 수행하는 로봇비전 기술에 대한 연구를 수행하였다. 제안된 비전시스템은 디지털 신호 처리기인 TMS320C30을 사용함으로써 원자로 스팀 제너레이터 세관에 대한 파손 유무의 자동 검사의 주된 인자인 스팀 제너레이터 원형홀(circular hole)의 에지의 윤곽선 추출 및 결손유무 판단의 처리 시간을 단축시켰고, 비전 보드상의 제한된 메모리를 사용하는데 있어서도 효율성을

높이기 위하여 별도의 후처리 알고리즘의 적용 없이 1차적인 처리의 결과에서 얻은 거친 에지값으로부터 필요한 정보를 추출하는 실시간 처리를 위한 효율적인 접근 방법이라 할 수 있다. 유사 모델에 대한 실험 결과, 제안된 디지털 비전 시스템은 유사실험을 통하여 스팀 제너레이터 홀의 파손 및 변형 상태 등의 자동 인식 성능이 보다 더 정밀하고 신속하게 처리됨을 예증함으로써 제안된 방법을 사용함으로써, 스팀 제너레이터 홀의 파손 및 결손에 대한 형상 인식의 실시간 실현 가능성을 제시할 수 있었고 또한 원자로 방사선 누설로 인한 사고 예방에 크게 기여하리라 사료된다.

향후 연구 방향은 원자로 스팀 제너레이터의 실시간 원격 제어용 전체 디지털 통합 제어 시스템에 대한 연구 및 신뢰성 향상에 대한 연구를 수행하고자 한다.

참고문헌

- (1) L. Shingang, S. Tsuji and M. Imai, "Determining of 3-D Structure of Environment from Lines Viewed Continuously by a Moving Camera", Trans. IEICE of Japan, D-II, vol. J74- D-II, No.2, pp. 175-192, 1991
- (2) K. S. Fu, R. C. Gonzalez, and C. S. G. Lee, *Robotics : Control, Sensing, Vision and Intelligence*, McGraw-Hill, 1987.
- (3) S. W. Wijesma, D. F. H. Wolfe, and R. J. Richards, "Eye-to-Hand Coordination for Vision-Guided Robot Control Application", Int. Jour. of Robotics Research, Vol. 12, No. 1, pp. 65-77, 1993.
- (4) G. Parrick, "Matching and Clustering: Two Steps Toward Automatic Object Modeling in Computer Vision", Int. Jour. of Robotics Research, Vol. 14, No. 6, pp. 633-642, 1993.
- (5) K. Kinoshita and K. Deguchi, "3-D Recognition by Active Vision", Trans. SICE of Japan, vol.28, no.1, pp.144-153, 1992
- (6) P. N. Suganthan, E. K. Teoh, and D. P. Mital, "Pattern Recognition by Matching the Potts MFT Neural Networks", Pattern Recognition Society, Vol. 28, No. 7, pp. 997-1009, 1995.
- (7) 고국원, 박원식, 조형석, "생산시스템 자동화 분야에서의 시각인식장치", 제어시스템자동화 공학회지, 제 2권, 제6호, pp. 38-49, 1996.