

원전 스팀 제네레이터의 자동보수 유지를 위한 로봇비전 시스템 개발

한성현*, 정원용**, 김종규***, 류소평****, 왕한홍*****

Development of a Robot Vision System for Automatic Repair and Maintenance of Steam Generator in Nuclear Power Plants

S. H. Han*, W. Y. Chong**, J. G. Kim***, X. P. Lix****, H. H. Wang*****

Abstract

It is proposed 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 방출때문에 인간이 유지 보수작업을 행하기에는 많은 어려움이 있다. 특히 원자력 발전소의 증기 발생기(steam generator)는 고온 고압의 방사선 물질을

함유한 유체 분위기에서 운전되며, 사용중 스러지에 의한 튜브 침식, 튜브 진동에 의한 응력부식 파손, 제작시의 가공 잔류 응력(residual stress)에 의한 파손 및 기동, 정지의 반복으로 인한 열피로응력(thermal fatigue stress)등으로 증기 발생기 tubesheet와 tube의 접합부위에 응력부식 파손이 발생하고 있다. 이렇게 파손된 튜브는 plugging되거나 sleeving되어야만 방사선 누출 없이 열효율을 떨어뜨리지 않고 계속 사용할 수 있게 된다.^[1] plugging이나 sleeving 공정은 좁은 입구를 통해 폐공간 내에서 작업이 이루어져야 하기 때문에 보수 작업의 정확성을 보장할 수가 없고 작업 시간이 길어져 관련 작업

* 경남대학교 기계설계학과 교수
** 경남대학교 전기공학과 교수
*** 경남대학교 수학과 교수
**** 중국 동북대학교 공과대학 자동화제어학과 교수
***** 경남대학교 기계설계학과 대학원

자의 피폭량이 커지는 등 많은 문제점이 대두되고 있다. 그래서 최근에는 로봇트를 개발하여 이러한 문제를 해결하는 것이 원자력 발전소의 유지 보수에 필수적인 요소가 되고 있다. 이런 용도의 활용을 위한 로봇트는 기존의 산업 현장에서 운용되고 있는 로봇트와 같은 단순 반복 작업이 아닌 보다 능동적인 태스크(task)를 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 plugging이나 sleeving 작업이 행해져야 한다. 로봇트가 폐공간내에서 18,000여개의 홀 중에서 결함이 있는 홀의 정확한 위치를 찾아내고 plugging이나 sleeving 작업의 정확성과 신뢰성을 보장하기 위해서는 이 태스크에 맞는 비전 시스템의 개발이 필수적이라 할 수 있겠다.⁽⁴⁾

이와 같은 목적을 가진 시스템은 1940년대 원자력이 실용화 되면서 1948년 미국의 기계식 원격 조작기 (모델 M1)을 개발하면서 Master-Slave 방식의 시스템이 원자력, 해저개발, 우주개발, 군사목적 등 주로 상황용으로 개발되어 사용되어 왔다. 이와 병행하여 Playback 방식의 시스템도 단순 반복 작업의 단계에서 부터 높은 정밀도, 작업시간(Cycle Time)의 단축, Flexibility, Reliability에 관한 요구가 높아짐에 따라 Microprocessor를 비롯한 전자, 제어 기술의 발달로 인하여 급속도로 발달되어 왔다. 이런 시스템들은 과거 극한 상황용으로 사용되던 기계식, 유압식 또는 전기식 단순Master-Slave의 개념에 의한 특징이 주종이며, 이는 End-Effector의 최대 속도, Friction 및 Inertia, 정밀도, Kinematics, 중량, Command 및 Human Interface 등이다.⁽⁷⁾ 그러나 최근 산업용 로봇 기술의 발달과 비전 기술의 발전으로 인하여 최대 속도 및 정밀도의 면에서의 Telerobot보다 우위에 있으며 Kinematics 또한 유연하게 대처하게 됨에 따라 로봇트 본체의 Inertia를 포함한 중량과 Human Interface를 보완하고, 밀폐된 공간에서 취득된 비전 정보를 실시간으로 처리할 수 있는 기술의 향상으로 인하여 원자력 발전소용 로봇 비전 시스템의 충족도를 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.⁽²⁾

이와 같은 목적을 위하여 컴퓨터 비전을 이용하여 원형 홀의 공간적인 위치와 형상을 판단할 수 있는 연구를 수행하였다. 일반적으로 홀의 정확한 공간 위치를 측정하기 위해서는 두대의 카메라를 사용하는 스테레오 비전 (stereo vision)을 사용하여야 하지만, 계산 과정의 복잡

성과, 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.⁽³⁾

본 논문에서는 원거리에서 스팀 제너레이터 세관의 검사와 보수를 행할 수 있는 자동 비전 시스템을 개발하고자 한다. 핵발전소에서는 높은 방사능 환경과 제한된 작업 공간으로 인하여, 작업자들이 스팀 제너레이터내에서 작업하기를 회피하고 있다. 방사선 누출로부터 작업자들을 보호하기 위해 자동 시스템에 의해 검사와 유지 보수작업이 이루어져야 한다는 사실이 제기되어 왔다. 제안된 디지털 비전 시스템은 스팀 제너레이터 세관의 실시간 인식과 검사를 실현하기 위해 사용되었다. 제안된 디지털 비전 시스템의 성능은 유사 스팀 제너레이터 모델에 대한 실험으로 입증하였다.

2. 이론적 배경

2.1 카메라 보정

본 연구의 카메라 모델링 및 보정 방법에서는 원자로 스팀 제너레이터의 홀이 매우 적은 치수가 아니므로 현실적 정도를 고려하여 렌즈의 왜곡은 고려하지 않은 방법을 적용하였다.

실 공간에서의 좌표계를 WCS(world coordinate system), z축이 광축(optical axis)과 일치하며 x, y축은 영상좌표계의 x, y축에 대응하는 카메라 좌표계를 CCS(camera coordinate system)라 규정할 때 다음과 같이 주요 기호들을 정의한다.

WCS상의 임의의 점 W 를 CCS에 대한 위치 벡터로 변환하면

$$c_h = TW_h \quad (1)$$

$c_h = [kx, ky, kz, k]^T$: CCS에 대한 영상면 좌표의 동차표현

$W_h = [kX, kY, kZ, k]^T$: WCS에 대한 공간 좌표의 동차표현

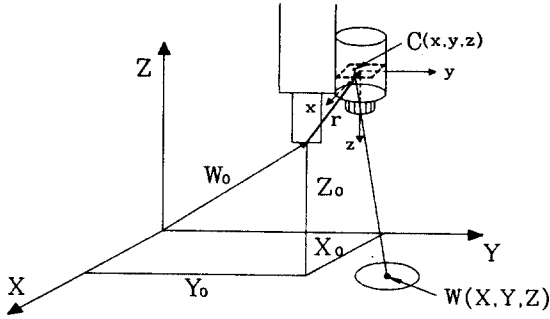


Fig. 1. The image geometry of the world coordinate system and the camera coordinate system.

- W : WCS에 대한 3차원 상의 점의 위치 벡터
- W₀ : WCS에 대한 3차원 상의 end-effector 위치 벡터
- c : WCS에 대한 3차원 상의 점이 영상면에 투사된 영상면의 위치 벡터
- r : end-effector로부터 CCS의 원점까지의 offset 거리
- T : WCS에서 CCS로의 변환 행렬
- P : WCS에서 CCS로의 투사 변환 행렬
- G : WCS원점에서 end-effector의 끝점까지의 offset에 대한 병진 변환 행렬
- R : WCS에 대한 CCS 좌표축 회전 변환 행렬
- C : 로봇 end-effector로부터 CCS 원점까지의 offset에 대한 병진 변환 행렬

이 된다.⁽³⁾ 여기서 좌표축 변환 행렬 $T(=PCR)$ 는 WCS에 대한 end-effector에 관계되는 병진 변환 행렬, WCS에 대한 CCS 좌표축 회전 변환 행렬, end-effector와 CCS좌표계의 원점에 관계되는 병진 변환 행렬 그리고 투사 변환 행렬을 순차적인 적용으로 구해진다. 현대의 카메라를 사용하면 실 공간상의 점을 영상화 하였을 때 CCS에 대한 두개의 좌표 $c[x, y]$ 만을 얻어낼 수 있다.

실제로 결함이 있는 세관을 교체하기 위해서는 로봇의 end-effector를 세관 홀(hole) 중심의 수직 상방향으로 움직여야 한다. 그래서 우리가 필요로 하는 정보는 3차원 공간상의 물체를 영상화 하였을 때 구하여지는 영상면좌표 $c[x, y]$ 가 아니라 이 정보를 이용하여 로봇의 end-effector를 원하는 위치로 이동시키기 위해서는 어느

정도의 움직임이 필요한가를 아는 것이다. 위의 Fig. 1에서 WCS좌표계에 기준한 좌표 $W_0(X_0, Y_0, Z_0)$ 에 로봇의 end-effector가 위치한 상태에서 증기 발생기 세관 홀 중심의 2차원 좌표인 WCS에 기준한 좌표 $W[X, Y]$ 의 수직 상방향으로 로봇의 end-effector를 위치시키려 한다. 여기서 로봇 end-effector의 현재 위치 $W_0(X_0, Y_0, Z_0)$ 는 알 수 있는 좌표이다. 다음으로 목표점 좌표 $W[X, Y]$ 는 위의 식 (1)의 역변환을 사용하여 다음과 같이 구할 수가 있다.

$$W_k = T^{-1} c_k \quad (2)$$

여기서 변환 행렬 $T^{-1} = G^{-1}R^{-1}C^{-1}P^{-1}$ 가 된다. WCS원점에서 end-effector의 끝점까지의 offset에 대한 병진 변환 행렬의 역행렬은 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$G^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

WCS에 대한 CCS 좌표축 회전 변환 행렬의 역행렬은 다음의 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$R^{-1} = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1C_2 & -S_1S_2 & 0 \\ S_1 & C_1C_2 & -C_1S_2 & 0 \\ 0 & S_2 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 $C_1 = \cos \theta$, $C_2 = \cos a$, $S_1 = \sin \theta$, $S_2 = \sin a$ 이다. 로봇 end-effector로부터 CCS 원점까지의 offset에 대한 병진 변환 행렬의 역행렬은 식 (5)와 같이 정의할 수 있다.

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & r_1 \\ 0 & 1 & 0 & r_2 \\ 0 & 0 & 1 & r_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

WCS에서 CCS로의 투사 변환 행렬의 역행렬은 식(6)과 같이 정의할 수 있다.

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\lambda} & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (2)에서 (6)까지를 사용하여 목표점 좌표 $W[X, Y]$ 는 다음의 식으로 구할 수가 있다.⁽³⁾

$$X = xC_1 - yS_1S_2 + r_1C_1 - r_2S_1C_2 - r_3S_1S_2 + X_0 \quad (7)$$

$$Y = xS_1 - yC_1C_2 + r_1S_1 - r_2C_1C_2 - r_3C_1S_2 + Y_0 \quad (8)$$

그리고 목표점 위치의 WCS에 대한 Z좌표는 Fig. 1에서 보여진 것처럼 카메라가 인식할 수 있는 범위(최소인식높이 < Z < 최대인식높이)이면 가능하다.

본 연구에서 검사하고자 하는 증기 발생기 세관은 세관의 크기가 일정하고 형상이 원형이다.

그래서 홀의 중심으로부터 카메라의 광학 중심(optical center)까지의 높이 Z_c 는 다음과 같다.

$$Z_c = k_H \frac{L}{D} \quad (9)$$

L : 공간상의 증기 발생기 세관의 지름

D : 영상면으로 부터 측정된 세관의 지름

k_H : 카메라와 렌즈에 의해서 결정되는 카메라 계수

식 (9)에서 정의되는 카메라 계수는 뒤에서 자세히 설명된다.

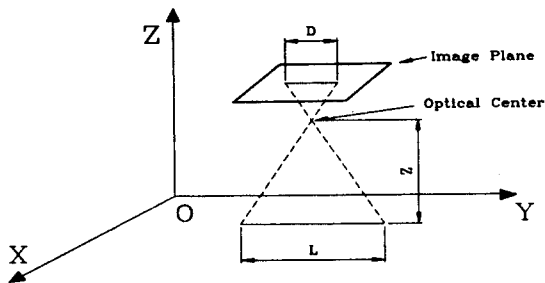


Fig. 2 The scheme of three-dimensional line and image.

여기서 구한 Z_c 는 현재의 카메라의 공간상의 높이가 되기 때문에 end-effector의 현재 위치 Z_c 는 다음과 같다.

$$Z_c = Z_c - r_3 + \lambda \quad (10)$$

여기서 λ 는 렌즈의 초점거리이고, end-effector의 현재 위치 Z_c 는 Z_0 와 일치하여야 한다.

다음 단계의 움직임을 위해서 필요한 end-effector의 WCS에 대한 좌표는 식 (7), (8) 그리고 (10)에서 구한 좌표는 $[X, Y, Z_c]$ 가 된다. 그러므로 실제로 로봇의 end-effector가 움직여야 할 변위는 end-effector의 현재 위치 $W_0(X_0, Y_0)$ 와 여기서 계산한 좌표 $[X, Y, Z_c]$ 의 차에 의해서 결정된다.

$$X_m = X - X_0 \quad (11)$$

$$Y_m = Y - Y_0 \quad (12)$$

$$Z_m = Z_H - Z_c \quad (13)$$

Z_H : 로봇의 end-effector가 움직인 후의 위치로서 사용된 카메라가 주어진 작업 환경과 조명 하에서 대상체를 뚜렷하게 인식할 수 있는 범위 안에서 결정되는 높이(최소인식높이 < Z_H < 최대인식높이)

2.2 카메라 계수 결정

카메라 계수 k_H 는 카메라와 렌즈에 의해서 결정되는 값이다. 본 연구에서는 해상도 640×480 pixel(수평 \times 수직)인 카메라와 16mm 렌즈를 사용하여 실험적으로 구하였다.

Table 1. 카메라 계수

| | 높이 (mm) | 실제길이 (mm) | 측정된 길이 (pixel) | 카메라계수 k_H | 오차(mm) |
|----|---------|-----------|----------------|-------------|----------------|
| 1 | 300 | 300 | 175 | 174.5 | $\frac{1}{10}$ |
| 2 | 310 | " | 169 | | |
| 3 | 320 | " | 163 | | |
| 4 | 330 | " | 158 | 173.28 | $\frac{1}{10}$ |
| 5 | 340 | " | 153 | | |
| 6 | 350 | " | 148 | | |
| 7 | 360 | " | 144 | 172.57 | $\frac{1}{10}$ |
| 8 | 370 | " | 140 | | |
| 9 | 380 | " | 136 | | |
| 10 | 390 | " | 132 | 171.8 | $\frac{1}{10}$ |
| 11 | 400 | " | 129 | | |

길이 일정한 물체의 수직 상방향에서 높이를 일정하게 변화시켜 가며 영상화한 후 영상면(크기 640 × 480)에서 측정된 길이 D 를 이용하여 다음과 같이 근사적인 카메라 계수를 구할 수가 있다.

위의 Table 1에서 보여준 바와 같이 높이가 달라짐에 따라 서로 다른 k_H 를 적용해야 함을 알 수 있다. 그 이유는 영상화할 물체로부터 카메라까지의 거리가 멀어질수록 카메라의 분해능(mm/pixel)이 저하되는 것이 주요인이다. 분해능을 향상시키는 방법으로 해상도가 높은 카메라를 사용하거나 초점거리가 먼 렌즈를 사용하므로써 보완할 수 있다.

3. 에지 검출

에지 검출은 머신 비전 태스크에서 중요한 역할을 한다. 에지는 영상 내에서 농도 불연속에 해당한다. 대부분의 머신 비전 태스크에서, 에지맵은 운동 해석과 피사체 인식 혹은 그보다 높은 단계의 비전처리에 있어서 없어서는 안 될 요소이다. 에지는 주로 어떤 장면에서 피사체들의 경계에 해당한다. 하지만 때로는 그림자나 표면을 표시하는 영상요소 일수도 있고 노이즈나 손상의 결과 일수도 있다. 많은 에지 검출자들이 제안되었으나, 그것들의 대부분은 노이즈가 없는 단순한 영상에 대해서는 합리적으로 에지를 검출해 내지만 노이즈 영상에 대해서는 실패하는 경향이 있다. 일반적 견해로, 영상 평활화(image smoothing)는 해가 없다. 하지만 더 나은 방법은 에지 전후 관계의 정보를 사용하는 것이다.

에지 검출의 최종 목적은 농도 변화를 일으키는 물리적인 과정의 향으로 영상의 농도 변화를 특징화하는 것이다. 이 목적을 달성하기 위해서는 적어도 다음과 같은 두단계 즉, 농도 변화의 특징화와 실제 경계를 찾기 위해서 구조적이고 높은 단계의 지식 사용이 고려되어야 한다. 또한, 농도 변화는 농도 함수의 미분에 의해 검출된다. 1차 농도 미분의 국부 최대치와 2차 농도 미분의 제로 교차가 일반적으로 사용되는 두개의 특징이다. 이 미분 연산자들의 결과는 영상 농도 변화를 기술하는 거친 에지맵이다.

영상면의 위치 벡터 $c(x, y)$ 를 검출해 내기 위해서 사용한 영상처리 전에 카메라로부터 취득된 영상으로부터 각각의 홀을 원형(prototype)에 가깝게 검출해 내기 위해서 중위수 필터와 실험장치의 하드웨어적인 처리를 사용하여 노이즈와 그림자의 효과를 줄인다.

그림자와 노이즈에 의한 홀의 일그러짐 현상으로 인하여 홀이 타원 형상으로 나타날 수가 있다. 이런 홀 주위의 농도 변화는 완만하여 잘못된 결과에 이를 수도 있다. 이런 홀들의 정확한 원형(prototype)복원을 위해서 취득된 영상 $f(x, y)$ 의 3 × 3 마스크를 이용한 각 방향의 1차 농도미분을 계산한다.

$$G_x = \frac{\partial f}{\partial x} \quad (14)$$

$$G_y = \frac{\partial f}{\partial y} \quad (15)$$

에지 검출을 위해서 필요한 것은 방정식(14) 과 (15)가 아니라 이 식들의 절대값으로 정의되고 다음의 식(16)과 같이 표현되는 gradient의 크기이다.

$$G[f(x, y)] = |G_x| + |G_y| \quad (16)$$

하지만 그레디언트만으로 노이즈나 그림자에 의해서 손상되고 일그러진 형상을 정확하게 복원할 수 없기 때문에 농도의 미세한 변화에도 민감한 2차 농도미분인 다음 식(17)로 정의되는 라플라시안 연산자(Laplacian operator)에 의해 정의된다.^(8, 10)

$$L[f(x, y)] = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (17)$$

여기서 라플라시안을 계산하기 위해서 우리는 앞에서 사용하였던 3×3마스크중 4개의 인접 이웃 $N_4[f(x, y)]$ 의 정보를 사용한다.

원형 홀의 경계를 검출해 내기 위해서 앞에서 제시된 방정식 (16)과 (17)를 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$g(x, y) = \begin{cases} 255 & \text{if } G[f(x, y)] > T_G \text{ and} \\ & L[f(x, y)] > T_L \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (18)$$

- $g(x, y)$: 검출된 2진 화상
- T_G : 그레디언트의 크기 조건에 사용된 임계치
- T_L : 라플라시안의 크기 조건에 사용된 임계치

위의 방정식 (18)을 사용하여 검출된 홀들로부터 우리가 필요로 하는 정보인 중심점 좌표(CCS에 대한)와 홀들에 대한 지름의 길이를 계산할 수 있다. 먼저 중심점의 좌표 (\bar{x}, \bar{y}) 는 다음의 식들을 이용하여 계산한다.

$$\bar{x} = \frac{\int x dA}{\int dA} \quad (19)$$

$$\bar{y} = \frac{\int y dA}{\int dA} \quad (20)$$

- A : 검출된 영역의 면적
- x : 미소 면적 dA까지의 수평거리
- y : 미소 면적 dA까지의 수직거리

여기서 단위는 pixel이다. 위의 방정식 (19)과 (20)을 사용하여 영역분할법에 의해서 중심점의 좌표를 모두 구할 수 있다. 다음으로 영상으로부터 지름의 길이 측정은 각각의 홀의 중심점 좌표 (\bar{x}, \bar{y}) 를 중심으로 수평 스캔시 나타나는 에지의 첫 번째 픽셀의 x 좌표(x_1)과 마지막 픽셀의 x 좌표(x_2) 그리고 수직 스캔시 나타나는 에지의 첫 번째 픽셀의 y 좌표(y_1)과 마지막 픽셀의 y 좌표(y_2)의 차에 의해서 계산한다.

$$D_H = x_2 - x_1 \quad (21)$$

$$D_L = y_2 - y_1 \quad (22)$$

D_H : CCS에 대한 x축 스캔시 측정된 길이(단위 : pixel)

D_L : CCS에 대한 y축 스캔시 측정된 길이(단위 : pixel)

방정식 (21)과 (22)에 의해서 측정된 길이 중에서 더 긴 것이 선택된다.

$$D = MAX(D_H, D_L) \quad (23)$$

최종적으로 식 (19) ~ (23)으로부터 얻어진 정보를 활용하여 원하는 형상을 추출할 수 있게 된다.

4. 실험

4.1 실험 장치

(1) 하드웨어 구성

본 연구에서 설계 제작된 영상처리용 하드웨어는 CPU 본 60-ns Single Cycle Instruction Execution Time

을 가진 고속의 DSP인 TMS320C30이 사용되었으며 PC와 데이터 교신은 인터럽트 핸드 셰이크 방식을 통하여 이루어지며 이를 위하여 PC측에서는 D-segments영역을 이용하도록 설계하였다. 그리고 영상 처리용 알고리즘 개발은 PC측과 DSP측에서 모두 개발할수 있도록 설계되었으며 개발된 알고리즘은 Buffer를 통하여 비전 보드의 프로그램 램영역으로 다운로드 되며, PC측에서 인터럽트를 통하여 DSP가 프로그램을 수행하도록 설계되었으며, 영상처리 결과는 데이터 램영역에 저장할수 있도록 설계되었다. 설계된 영상 처리용 하드웨어의 전체 구성나타내는 블록선도는 아래의 Fig. 3과 같다.

설계된 비전보드는 CCD카메라와 인터페이스 하기 위한 카메라 인터페이스 모듈, CCD카메라로부터의 아나로그 비데오 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 변화기, 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 사용될수있도록 설계되었고, 비전보드 호스트 컴퓨터의 Add-on Board 로 사용되도록 설계되었다. 비전 소프트웨어는 호스트 컴퓨터의 운영체제(Operation System)하에서 동작하며, 호스트 컴퓨터의 한 어플리케이션 소프트웨어로 작동한다. 그러므

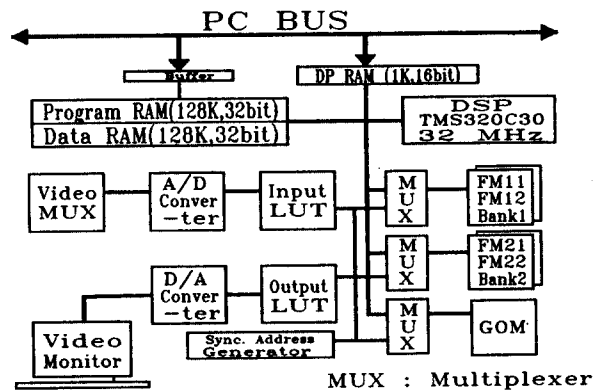


Fig. 3 The block diagram of image processing hardware.

로, 이 보드는 여러 기능을 가지고 있는 시스템의 한 모듈로서 응용될수 있기 때문에 시스템 인테그레이션에 의한 특정용도의 시스템 개발을 편리하게 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.^[6]

- 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)

(2) CPU (TMS320C3x) 특성 분석

디지털신호처리기는 신호처리를 디지털적으로 하는 특수한 마이크로 프로세서로서 종래의 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, 고속성으로 실시간 처리가 이루어진다. 또한 프로그램의 유연성으로 시스템의 유연성 또한 향상됨으로서 비용절감 효과와 신뢰성 향상을 기대할 수 있다.

본 연구에서 적용한 디지털신호처리기는 TI사의 TMS320C3x 계열로서 데이터 체계가 Floating point 체계로서 명령 수행 시간이 60ns이며 ROM, RAM이 각각 한개 및 두개로서 구성된 원칩 프로세서이다.

구조는 CPU, Multiplier, ALU, ARAU등으로 구성되어 있다. 각 부분의 특성을 살펴보면 Central Processing Unit (CPU)는 내부 버스(CPU1-2, REG1-2)로 인해 Multiplier와 ALU가 한 사이클에서 동시에 실행할수 있는 병렬 명령이 가능하다. 예를 들면 Multiplier에서는 Auxiliary Register Arithmetic Units(ARAUs)에서 간접주소 지정 방법으로 한 사이클에서 두개의 Addresses지정이 가능하기 때문이다(데이터

는 REG1-2버스로 간다). 그리고, Multiplier는 Integer, Floating Point Values로 각각 24bit, 32bit의 한 사이클을 실행한다. 즉, 입력이 각각 24, 32bit이다. 하지만, 출력은 각각 32, 40bit로 된다. Arithmetic Logic Unit (ALU) 부분은 32bit Integer, 32bit Logical, 40bit Floating Point Data를 실행한다(입력 데이터는 40비트로 정수와 논리 데이터는 지수부가 변화하지 않는다). 결과는 32bit Integer, 40bit Floating Point Data로 되며, 한 사이클에서 32bit 단위로 오른쪽, 왼쪽으로 이동하는 Barrel Shifter가 가능하다. 그리고 Auxiliary Register Arithmetic Units (ARAUs)는 ARAU0, ARAU1로 한 사이클에 2개의 주소를 발생시킬 수 있으며, 병렬명령 처리가 이루어지고, 변수(Disp=0,1), Index Register(IR0, IR1)를 이용한 Addressing, 순환 Addressing을 지원한다. Fig. 4는 TMS320C3X칩의 메모리 구성을 나타내는 블록선도이다.

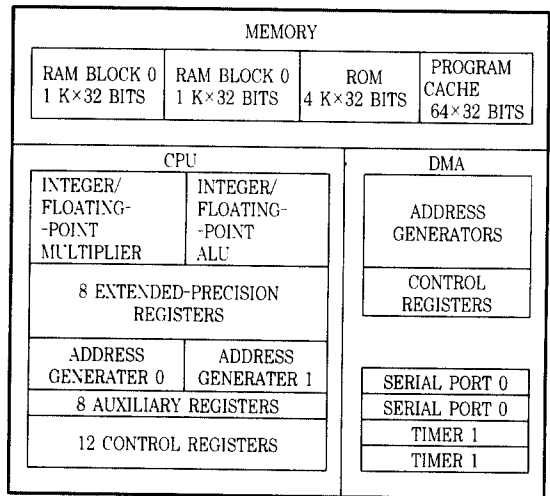


Fig. 4 The block diagram of TMS320C3x

CPU의 주요 실행 특성을 요약하면 다음과 같다.^[6]

- 60-ns Single Cycle Instruction Execution Time
- 33.3 MFLOPS : 부동 소수점 실행 능력
- 16.7 MIPS : 명령 처리 능력.
- ROM : One 4K 32bit (32 word, 36K bit)
- RAM : TWO 1K 32bit
- 64 32 bit instruction cashe

- R0-R7 -- Eight extended-precision registers (accumulators)
- AR0 - AR7 -- Eight auxiliary registers
- Address generators CPU => Two, DMA => One
- ARAU 0 - 1 -- two auxiliary register arithmetic units.
- 32 bit instruction and data word와 24 bit addresses
- 32 bit barrel shifter
- Integer, floating-point, and logical operations
- Two and three operand instructions
- Parallel ALU and multiplier instruction in a single cycle
- Block repeat capability
- DMA : On-chip direct memory access controller
- Two 32 bit data buses (24-and 32-bit address)
- Two serial ports to support 8/16/24/32-bit transfers
- Two 32 bit timers
- Two general-purpose external flags, four external interrupts
- 181-pin grid array (PGA)
- 1 - μm CMOS

본 연구에서 실험에 사용한 영상 처리용 하드웨어는 MVB-02를 사용하였다. 이 영상 처리용 보드에서 사용한 CPU는 디지털 영상을 고속으로 처리하기 위해서 TI사의 DSP TMS320C30을 채용하였다.

Fig. 5는 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 통과함

으로써 아날로그 비디오 신호로 변환되어 모니터에 출력된다. LUT는 A/D변환기를 거쳐서 디지털로 변환된 데이터

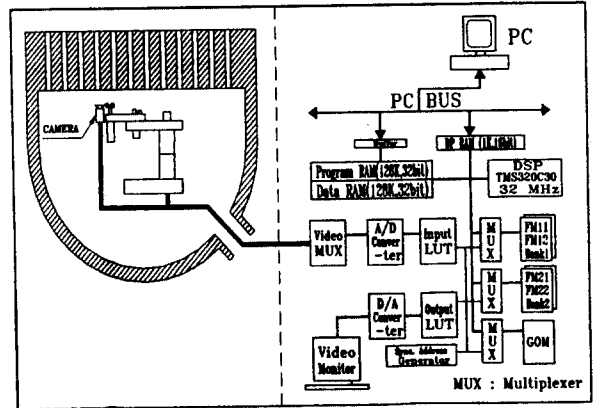


Fig. 5 The configuration of vision system.

를 프레임 메모리에 저장하기 전에 하드웨어적으로 일차원적인 변환을 하기 위해서 메모리로 구성된 변환 테이블로서 이 LUT를 적절히 사용하므로서 영상 처리 시간을 단축시켜 영상속 물체의 실시간 윤곽 추출이 가능하게 한다.

586 PC에 FARA MVB-02버전 보드가 연결되어 서로 통신을 하면서 데이터나 파라미터들을 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 버전 함수들마다 정해져 있으며, 인터럽트 핸드셰이크에 의해 데이터 교신이 이루어진다. 제안된 방법의 타당성을 입증하기 위하여 실 영상에 의한 실험을 수행하였다. Fig. 5와 같은 시스템의 전체 구성중 실험 대두께 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.

4.2 실험 방법 및 결과

제안된 방법의 타당성을 입증하기 위하여 실영상에 의한 실험을 수행하였다. 제작된 모형을 CCD카메라의 상부에 장착하고 CCD카메라로 홀의 수직 하방향에서 영상을 취득하여 처리하는 방식의 모의 실험을 수행하였다.

아래의 Fig. 6은 스템 제너레이터의 모형으로부터 취

득된 영상을 나타낸다. Fig. 6의 원영상에서 카메라가 위치한 홀만을 선택하고 검사의 정밀도를 향상시키기 위하여 확대한 후 중위수 필터법에 의해서 영상 평활화처리를 하여 방정식 (18)에 제시된 영상 처리 알고리즘으로 2진

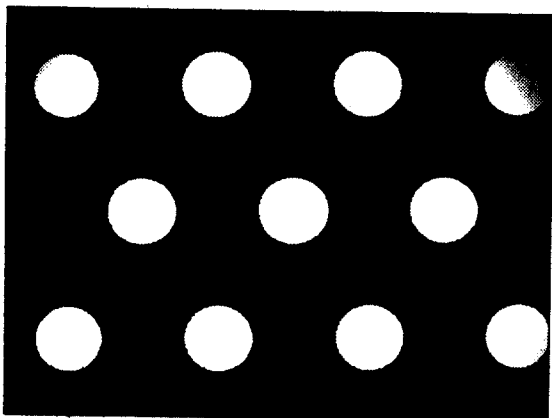


Fig. 6 The acquired image from camera.

영상으로 만들어 경계를 추출한다. 경계 추출된 영상으로써 우리가 필요로 하는 정보 중의 하나인 홀의 중심점 좌표를 구하기 위하여 방정식 (19)과 (20)에 제시된 알고리즘을 적용하여 각각의 홀에 대한 중심점 좌표를 얻는다. 얻어진 중심점 좌표의 정보를 이용하여 각 중심점 좌표점을 기준하여 수평·수직 스캔 라인을 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 왼 방향으로 회전하면서 10도 단위로 홀을 총 36분할한다. 이 분할된 부분들을 기준으로 검사를 수행한다.

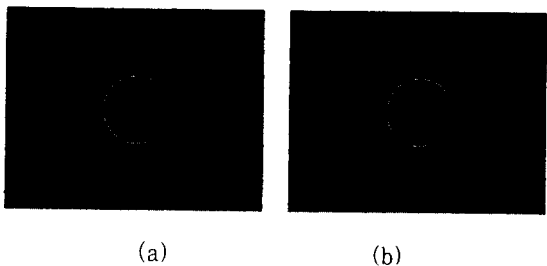


Fig. 7 The recognition result of holes.

Fig. 7은 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 결과는 25개의 불량 홀중에서 1개를 정상 판정하였다.

5. 맺 은 말

본 연구에서의 디지털 신호 처리기인 TMS320C30을 사용하여 원자로 스팀 제너레이터 세관에 대한 파손 유무의 자동 검사를 위해 근본적으로 원형홀(circular hole)의 에지를 특징으로 채택하여 처리 시간을 단축시키고 비전 보드상의 제한된 메모리를 사용하는데 있어서 효율성을 높이기 위하여 별도의 후처리 알고리즘의 적용 없이 1차적인 처리의 결과에서 얻은 거친 에지맵(rough map)으로 부터 정보를 필요한 정보를 추출하여, 이 정보들을 이용하여 홀들을 검사하는 디지털 비전 시스템 개발에 관한 연구를 수행하였다. 제안된 방법을 사용하므로써, 스팀 제너레이터 홀의 파손 및 결손에 대한 형상 인식의 실시간 실현 가능성을 제시할 수 있었다. 유사 모델에 대한 실험 결과 제안된 디지털 비전 시스템이 스팀 제너레이터 홀의 파손 및 변형 상태 등의 자동 인식 성능이 보다 더 정밀하고 신속하게 처리됨을 확인함으로써 원자로 방사선 누설로 인한 사고 예방에 크게 기여하리라 사료된다.

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

본 연구는 학술진흥 재단의 "학제간 연구 과제"로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. John Bickford and Michael Loram, Good Bolting Practices : A Reference Manual for Nuclear Power Plant Maintenance Personnel, Volume 1 : Large Bolt Manual, EPRI/NP-5067, 1987.

2. P. I. Corke, "Visual Control of Robot Manipulators-A Review", K. Hasimoto, Visual Servoing, pp. 1-31, World Scientific, 1993.
3. K. S. Fu, R. C. Gonzalez, and C. S. G. Lee, Robotics : Control, Sensing, Vision and Intelligence, McGraw-Hill, 1987.
4. 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.
5. Parrick Gros, "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.
6. "TMS320 Floating-Point DSP Optimizing C Compiler User'S Guide", 1993.
7. M. T. Mason and J.K. Salisbury Jr., Robot Hands and the Mechanics of Manipulation, MIT press, 1985.
8. P. N. Suganthan, E. K. Teoh, and D. P. Mital, "Pattern Recognition by Matching the Potts MFT Neural Networks", Pattern Recognition, Vol. 28, No. 7, pp. 997-1009, Pattern Recognition Society, 1995.
9. R. C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital Image Processing, Addison Wesley, 1992.
10. S. S. Iyengar and W. Deng, "An Efficient Edge Detection Algorithm using Relaxation Labeling Technique", Pattern Recognition, Vol. 28, No. 4, pp. 519-536, Pattern Recognition Society, 1995.
11. 여인재, 박희재, 박춘열, "Development of 3Dimensional Inspection System for Bicycle Frame using CCD Camera", 한국정밀공학회 '95년도 추계학술대회논문집, pp. 492-498, 1995.