

CCD 카메라의 회전각도 추정 알고리즘을 이용한 수중 벽면결함 크기측정

Defects Size Measurement of Underwater using the Estimation Algorithms of CCD Camera Position

김영환, 윤지섭, 정재후, 홍동희, 박기용
한국원자력연구소

요 약

본 논문에서는 물이 담겨져 있는 저장조 벽면의 결함성장 크기를 측정하는데 있어서 라인 슬릿빔의 경사각을 이용한 카메라의 회전각도 추정 알고리즘을 이용하여, 수중 결함크기 측정방법을 제시하였다. 실험방법으로는 수중실험장치에서 CCD 카메라 각도 변화에 따라서 길이 측정에 적용하였다. 카메라에 대해 임의의 수평각도로 기울어져 있는 벽면결함은 3차원 좌표변환과 수평각도 추정 알고리즘 보정 방법을 통하여 수직거리에서 본 거리로 복원하였다. 실험결과, 결함은 30도 이내에서 대기는 약 0.5%, 수중은 1.2%의 오차율을 보여주었고, 10도 증가에 따라 각각 1%의 오차 증가율을 보여주었다. 각 결함에 있어서 30도에서 50도까지는 영상의 결함깊이의 사각지역으로 인하여 오차율이 증가하였으며, 70도 이상에서는 영상데이터의 소멸로 측정이 불가능하였다. 그 결과 수중조건에서 결함크기에 대한 측정 정확도는 물 속의 굴절 율에 영향을 받았으며, 본 논문에서 제안된 알고리즘을 이용하여 기울어진 수중 벽면결함영상의 복원이 가능함을 보여 주었다.

SUMMARY

In this paper, a method of measuring the defect size of underwater and restructuring the defect image is proposed based on the estimation algorithm of a camera orientation which uses the declination angle of the line slit beam. To reconstruct the image, an algorithm of estimating the horizontally inclined angle of CCD camera is presented. From the result of a series of experiment of underwater shows that the measuring accuracy of the defect is within 0.5%, 1.2% error bound of real defect size in the air and underwater at the 30 degree of the horizontally inclined angle, respectively. Also, the accuracy is deteriorates with the error rate of 1% for every 10 degree increase of the horizontally inclined angle. The estimation error increases in the range of 30~50 degree due to the existence of dead zone of defect depth, and defect length can not be measured due to the disappearance of image data above 70 degree. In case of underwater condition, the measuring accuracy is also influenced due to the changed field of view of both the camera and the laser slit beam caused by the refraction rate in the water. The proposed algorithm provides the accurate measurement of the defect lengths of underwater only by using a single camera and a laser slit beam.

1. 서론

사용후핵연료 집합체(spent fuel assembly)를 보관하고 있는 원자력발전소 저장조의 콘크리트 벽면에는 에폭시로 방수처리 되어 있다. 저장조에는 외부로 방사선을 차폐하기 위해 물이 채워져 30~40년의 수명을 갖도록 설계되었지만, 시간이 지남에 따라 벽면에 결함이 발생할 우려가 있으며, 에폭시 코팅 면에 발생하는 결함의 유/무 및 성장 진행 정도를 측정하고 있다. 현재 결함은 콘크리트 자체에서는 발생하지 않고 있으며, 에폭시가 여러 곳에서 열화에 의하여 벗겨지고 있다. 현재의 결함검사 방법은 토목 측량 기술에 의존하거나, 긴 봉하단에 카메라를 부착하고 봉의 상단은 크레인 로프 끝의 후크에 걸어 크레인을 벽면 근처로 이동시키면서 모니터에 나타나는 벽면의 영상 크기를 측정한다. 이때 카메라를 지지하는 봉이 회전하여 벽면결함 크기를 측정하기 위한 영상처리에 어려움이 있다. 본 논문에서는 CCD 카메라의 위치 추정 알고리즘을 이용한 수중 벽면결함 크기를 측정하기 위하여 1대의 카메라와 레이저 슬릿빔의 경사각을 이용하였으며, 대기 중과 모의 수조 실험장치에서 실험을 수행하였다. 제안된 CCD 카메라 회전각도의 추정 알고리즘으로 영상을 회전 복원하는데 적용하였으며, 수중 벽면결함의 길이와 카메라의 각도 변화에 따른 수중 결함크기의 측정과 수중 결함에 대한 3차원 영상을 구현 가능성을 제시하였다.

2. 본론

2.1 실험방법

본 논문에서는 하나의 CCD 카메라와 벽면에 맺힌 레이저 슬릿빔의 경사각을 이용하여 벽면결함의 크기를 측정하였다. 벽면의 결함 크기를 측정하기 위하여 수중용 CCD 카메라를 사용하였으며, CCD 카메라 상부에 슬릿빔 발생기(beam generator)를 설치하였다. 벽면에 대한 카메라의 수평각도 변화에 따라 벽면결함 크기의 오차가 발생된다. 따라서 벽면에 대한 수평 방향의 카메라 경사각을 Hough 변환에 의한 라인 슬릿빔 경사각의 정보를 통하여 카메라 수평각도 추정 알고리즘을 수식화 하였고, 도출된 카메라 수평각도의 추정 값으로 축에 대한 영상회전에 적용하였다. 또한 카메라 장치의 무게 중심이 중력 방향으로 작용하도록 납으로 만든 추를 설치하였다.

2.2 카메라와 레이저 슬릿빔 기하학적 알고리즘

본 논문에서는 영상 인식과 변환을 위해서 결함의 형상을 2진 영상 데이터로 변환하여 사용하였으며, 슬릿빔의 각도와 길이를 추정하기 위하여 Hough 변환을 이용하였다. 3 차원 물체를 인식하기 위해 CCD 카메라와 레이저 슬릿빔의 각도와 물체의 영상 정보로부터 실제 물체의 크기 및 형상을 인식하는 알고리즘을 제안하였다. 벽면결함 측정장비 실험은 세 가지 가정들을 전제로 하였다. (1) 측정장비의 중심 축은 중력방향과 평행이다. (2) 측정장비의 흔들림은 물 속의 댐핑 현상으로 바로 복원된다. (3) 측정장비의 중력 방향의 중심 축과 카메라의 측정 방향은 수직이다. 벽면결함 측정을 위해 위의 세 가지 가정을 전제 조건으로 할 때 실제적으로 결함 측정에 미치는 변수는 벽면에 대한 카메라의 기울어진 수평각도이다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 벽면의 수직 중심 축으로부터 우측면에 맺힌 슬릿빔의 경사도를 보여주고 있으며, 카메라와 슬릿빔 발생장치는 벽면에 대해 θ_1 만큼 같은 각도로 벽면을 향하고 있다. Fig. 4는 카메라와 슬릿빔이 벽면의 우측면(Right section)에 주사되었을 때의 도해이다. 여기서 L 은 벽면에서 카메라까지의 수직 거리이고, L_{∞} 는 슬릿빔의 길이이

다. L_1 과 L_2 는 카메라가 빔 발생기의 시계각(θ_f)에 해당하는 θ_1 만큼 이동했을 때의 벽면에 대한 슬릿빔 양 끝단까지 거리이고, L_3 는 증분 된 슬릿빔의 길이이다. L_4 와 L_5 는 θ_3 만큼 발생장치를 내렸을 때, 수평으로 증분 된 슬릿빔 길이(L_3)의 양 끝단에서 기울어진 슬릿빔 길이의 양 끝단까지 깊이 이고, 이때 시계각(field of view angle)이 고려된 θ_2 만큼의 슬릿빔 경사각이 발생된다. Fig. 2에서 θ_2 는 시계각(θ_f) 만큼의 영향을 받는다. 따라서 벽면에서 거리 L 인 카메라의 θ_1 을 시계각(θ_f) 만큼 이동하고 빔 생기를 θ_3 만큼 하단 방향으로 기울였을 때 슬릿빔의 시계각에 의한 최초 길이(L_{SO})와 각도(θ_1)가 $\Delta L = \beta L_{SO}$, $\Delta \theta = \beta \theta_1$, ($\beta \cong \frac{1}{3}$) 만큼 증가한다. Fig. 2에서 슬릿빔의 증가된 길이는 L_3 이다. 카메라가 우측으로 θ_1 만큼 이동하고, 빔 발생기가 θ_3 만큼 기울어졌을 때 슬릿빔의 기울어진 깊이에 대한 양 끝단의 거리를 L_4 , L_5 라하고, 슬릿빔이 기울어진 깊이 차를 L_6 라 했을 때 슬릿빔의 경사각도 θ_2 는 다음과 같이 구한다. Fig. 2에서 수평상태의 빔 발생기가 θ_1 만큼 이동했을 때 벽면중심 0에서 B점까지의 거리는 식(1)과 같다.

$$L_1 = \frac{L}{\cos \frac{\theta_1}{2}} \quad (1)$$

$$L_2 = \frac{L}{\cos(\frac{3}{2} \theta_1 + \frac{\theta_1}{3})} \quad (2)$$

$$L_5 = L_1 \tan \theta_3 \quad (3)$$

$$L_4 = L_2 \tan \theta_3 \quad (4)$$

$$L_3 = L \left\{ \left(\tan(\frac{3}{2} \theta_1 + \frac{\theta_1}{3}) - \tan \frac{\theta_1}{2} \right) \right\} \quad (5)$$

$$L_6 = (L_4 - L_5) \quad (6)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{L_6}{L_3} \right) \quad (7)$$

$$\therefore \theta_2 = \tan^{-1} \left[\frac{\tan \theta_3 \left\{ \cos \frac{\theta_1}{2} - \cos(\frac{4}{3} \theta_1) \right\}}{\sin(\frac{4}{3} \theta_1)} \right] \quad (8)$$

식 (8)을 3차 다항식의 역 변환으로 표현하면 슬릿빔에 의한 CCD 카메라의 회전각도 θ_1 은 식(9)와 같다.

$$\therefore \theta_1 = a_i(\theta_2)^3 + b_i(\theta_2)^2 + c_i(\theta_2) + d_i \quad (\text{단 } 0^\circ < \theta_3 < 45^\circ) \quad (9)$$

식(9) a, b, c, d의 계수 값은 θ_3 와 함수 관계를 갖는다. 여기서 계수 값은 Fig. 3의 역 변환 값이 된다.

2.3 3차원 좌표변환

Fig. 4에서 물체 표면에 맺힌 레이저 슬릿빔의 3차원 공간상의 점 $C_c(x, y, z)$ 는 영상 좌

표계 상의 $C(u, v)$ 로 매핑(mapping) 된다. 점 C_C 에서 점 C_i 로의 변환은 렌즈 중심과 CCD 소자간의 거리를 나타내는 λ 와의 관계로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다. 여기서 x 는 벽면 길이방향, y 는 카메라 수직방향, z 은 관측방향의 좌표 값이 되며, S_u, S_v 는 스케일 팩터 (Scale factor)가 된다

$$\begin{aligned} z &= \frac{\lambda}{v} y = \frac{\lambda l_{AB}}{v + \lambda \tan \theta_3} \\ x &= \frac{u}{\lambda} z = \frac{u l_{AB}}{v + \lambda \tan \theta_3} \\ y &= \frac{v l_{AB}}{v + \lambda \tan \theta_3} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} u &= S_u(320 - u_f) & S_u &= \frac{l_u}{640} \\ v &= S_v(240 - v_f) & S_v &= \frac{l_v}{480} \end{aligned} \quad (11) \quad (12)$$

2.4 관측방향에 따른 3차원 좌표변환의 회전각도 보정

물체 좌표계 상에 정의된 물체의 좌표값을 관측 좌표계(viewing coordinate)에 대한 좌표 값으로 변환시키는 일을 관측 변환(viewing transformation)이라고 말한다. 관측 변환을 위해서는 초기 가정에서 Y축인 카메라 고정 봉이 중력방향으로 작용하기 때문에 카메라의 수평각의 Y축에 대한 회전 변환과 좌표 이동만 요구된다. 식 13)~식 17)에서 T 는 좌표 이동 값이고, R_y 는 Y축으로 회전하는 각도이며, q 는 이동점이 된다.

$$F = (f_x, f_y, f_z), \quad T = (t_x, t_y, t_z) \quad (13)$$

$$V = (f_x - t_x, f_y - t_y, f_z - t_z) = (v_x, v_y, v_z) \quad (14)$$

$$T(-t_x, -t_y, -t_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$R_y(-\theta_1) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & \sin(\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_1) & 0 & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\text{단, } \theta_1 = \tan^{-1}(v_x/v_z)$$

$$\therefore q = R_y(\theta_1)ST_p \quad (17)$$

2.5. 실험 장치 및 실험

본 연구에서는 물 속의 환경에서 저장 수조 벽면의 결함을 측정하기 위한 구조로 실험 장치를 구성하였다. Fig. 5는 벽면결함 검사 측정 장비의 흐름도를 나타낸 것이다. 모의 결함의 분류는 Fig. 6과 같이 둥근 결함을 대상으로 하였으며, Fig. 7은 수중실험 장치를 보여준

다. 본 논문에서 사용된 CCD 수중 카메라(RCS-3100)는 대기 중에서 카메라의 수평 시계 각도(field of view)는 2.7°에서 48° 범위이며, 물 속에서는 2.03°에서 35.6°의 시계 각도를 갖는다. 카메라 카바의 재질은 스테인레스(300 series) 이고, 카메라의 앞 유리는 수정 재질로 만들어져 있다. 물 속 측정 깊이는 60 m까지 가능하며, 카메라의 무게는 공기 중에서는 0.8 kg, 물 속에서는 0.45 kg 이다. 그리고 일정한 광 강도(intensity)를 갖는 Non-Gaussian 레이저 슬릿빔(SNF Class II)을 사용하였다. 일반적인 cylindrical optics는 2가지의 문제점을 가지고 있다. 첫째로, 빛의 밝기는 중간 부분이 가장 밝고, 양끝으로 갈수록 흐려지기 때문에 라인 빛의 경우 얻고자 하는 정확한 정보를 얻을 수 없다. 둘째로 라인을 따라 빛의 강도가 다른 Gaussian 분포의 레이저의 CCD와 켈리브레이션은 많은 오차를 발생한다. 이러한 것들을 해결하기 위하여 고른 분포의 광도(intensity)를 가진 라인 슬릿빔(non-Gaussian line laser)을 사용하였다. 본 논문에서는 시계각도(field of view angle)는 카메라의 수평각도 추정 알고리즘에 변수로 작용하기 때문에 Non-Gaussian 레이저 슬릿빔(SNF Class II)의 시계 각도를 계산하였다. 거리를 D, 라인 슬릿빔의 길이를 L_{so} , 시계 각도를 FOV 라고 하면 식은 다음과 같다.

$$F. V. = 2 \tan^{-1} \left(\frac{L_{so}}{2D} \right) \quad (18)$$

본 실험에 사용된 빔 발생기의 시계 각도를 구하기 위하여 식(18)에 적용했을 때 Non-Gaussian 레이저 슬릿빔의 시계 각도(field of view)는 30°로 산출되었다.

2.6 실험 결과

2.6.1 카메라의 추정 회전각도를 이용한 결함영상 회전

Fig. 8은 카메라의 각도 변화에 따라 등근 결함에 대한 이진화, 윤곽선 처리, 그리고 관측 방향으로 회전 복원한 결함영상이다. 등근 결함은 카메라에 대해 회전된 결함 영상이 60°까지 복원이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있으며, 80°이상에서는 결함 영상정보를 거의 얻을 수 없기 때문에 실제적으로 측정이 불가능함을 알 수 있었다. 그러나 결함을 정상 상태로 회전 복원하는데 중요한 변수는 각 결함들의 형태와 회전된 각이 결정적인 요인임을 알 수 있었고, 각각의 결함들을 살펴볼 때 좌측의 결함 면과 우측의 결함 면의 굴곡 정도에 따라서 회전된 결함 영상의 복원과 결함 크기의 정확도에 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

2.6.2 카메라의 각도 변화에 따른 결함 크기 측정

본 실험의 측정 거리 범위는 벽면 20 cm에서 40 cm 거리이기 때문에 빔 발생기의 기울임 각은 37°로 고정하였다. 그 이유는 측정거리 범위가 20 cm에서 40 cm 움직일 때 레이저 슬릿빔이 640 x 480 화소(pixel)의 최대 범위로 들어오기 때문이다. 따라서 벽면에 대한 카메라의 수평각(θ_1)에 대한 3차 다항식과 계수 값은 식 (19)와 같다.

$$\therefore \theta_1 = a_i(\theta_2)^3 + b_{\chi(\theta_2)}^2 + c_i(\theta_2) + d_i \quad (\text{단 } \theta_{3i} = 37^\circ) \quad (19)$$

$$a = 0.00209, b = \pm 0.07999, c = 2.28365, d = \pm 2.49634 \text{ [우측면(-), 좌측면(+)]}$$

Fig. 10, 11은 좌우벽면의 등근형 결함 크기를 측정한 결과로서 카메라 수평각이 50° 이내에서 평균 0.48 %의 오차율이 발생되며, 60° 이후에서 평균 2 %의 오차 증가율을 보여주고 있다. 그리고 30° ~ 50°까지는 회전된 결함 영상의 사각 지역의 영향을 받아 최대거리에 감소를 가져와 다소 오차율이 증가하였으며, 70° 이상에서는 영상 데이터의 일부 소멸로 인하

여 결합 크기의 측정이 불가능함을 알 수 있었다.

2.7 수중 환경에서 결합 크기 측정

카메라 수평각도 추정 알고리즘을 적용한 대기 환경의 결합 크기에 대한 측정 오차율과 수중 벽면결합 크기의 측정 결과와 비교하기 위하여 실험이 수행되었다. 먼저 빔 발생기의 방수를 위하여 실린더 형태의 커버에 빔 발생기를 삽입하고 앞면에 유리를 부착하였다. 벽면결합 측정을 위한 수조의 크기는 L 1200 x W 600 x H 600 mm의 직사각형 형태로 제작하였다. 실험방법은 대기 환경에서 측정과 동일한 방법으로 각 결합별로 수평 회전각도 변화에 따라서 영상을 복원시키고 결합 크기를 측정하였다. 슬릿빔에 대한 물 속의 굴절 현상을 관찰한 결과 수직 방향으로 굴절현상이 발생되지 않았다. 이는 실린더 형 방수 커버 내의 공기와 앞 유리, 그리고 물의 매질이 다르지만, 물에 대한 슬릿빔의 입사 광이 경계면에 수직이기 때문에 수직 굴절에 영향을 주지 않았다. 그러나 수평 방향의 굴절은 슬릿빔의 시계각으로 인하여 발생되었다. 따라서, Fig. 9와 같이 580 nm의 파장을 갖는 굴절율을 고려하여 공기와 유리 그리고 물에 대한 슬릿빔의 시계각을 식(20), (21)로부터 계산하였으며, 식(9)의 카메라 자세 추정 알고리즘에 적용하였다.

$$N_a \sin \theta_a = N_b \sin \theta_b \quad (20)$$

$$N_b \sin \theta_b = N_c \sin \theta_c \quad (21)$$

여기서 슬릿빔의 580 nm에서 각 매질의 굴절율은 $N_a=1.003$ (공기의 굴절율), $N_b=1.52$ (유리의 굴절율), $N_c=1.33$ (물의 굴절율)으로 굴절된 시계각(field of view angle)은 22.5° 로 산출됐다. 실험 결과는 Fig. 12, 13에서 보여주고 있다. 등근 결합은 카메라 수평각도가 30° 이내에서는 평균 1.2 %의 오차율을 보여주었으며, 50° 이후에서는 평균 4.3 %의 오차가 발생되었다. 실험 결과로부터 대기 환경의 결합 크기 측정 오차율에 비해서 수중 결합의 측정율은 각 결합별로 30° 이내에서는 평균 0.6 %의 오차 증가율이 발생되었다. 대기보다 수중 환경에서 오차가 증가하는 원인을 두 가지로 고찰될 수 있다. 첫째는 굴절율에 영향을 미치는 슬릿빔의 시계각(field of view)에 대해서, 본 실험에 사용된 빔 발생기의 파장(wave length)은 670 nm이지만 고려된 파장은 580 nm에 대한 굴절율을 고려하였기 때문인 것으로 사료된다. 두 번째 원인은 수중 카메라의 시계각이 대기중에는 최대 48° 이나 수중에서는 35.6° 로 감소하기 때문에 대기의 결합 측정도보다 오차가 증가됨을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 사용후핵연료 집합체를 저장하는 저장조 벽면의 결합 성장 크기를 측정하는데 있어서, 스테레오 카메라는 좁은 공간에 대한 제약 조건과, 깊이 정보를 위한 두 영상에 맺힌 각 영상의 점을 실제의 물체 점과 구분하는데 어려움이 있다. 그리고 카메라에 맺힌 두 영상 점을 매칭하기 위해서 복잡한 반복 과정(iteration)을 거쳐야하는 문제점을 가지고 있다. 따라서, 레이저 경사각과 CCD 카메라의 각도추정 알고리즘을 이용하여 수중벽면 결합 측정방법을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

등근 결합 크기는 카메라 수평각이 30° 이내에서 대기 중은 0.5 %, 수중은 1.2 %의 오차율이 발생되며, 60° 이후에서는 각각 평균 2 %, 4.3 %의 오차 증가율을 보여주고 있다. 그리고 70° 이상에서는 영상 데이터의 일부 소멸로 인하여 결합 크기의 측정이 불가능함을 알

수 있었다. 대기보다 수중 환경에서 오차가 증가하는 원인은 두 가지로 고찰될 수 있다. 첫째는 굴절율에 영향을 미치는 슬릿빔의 시계각에 대해서 본 실험에 사용된 빔 발생기의 파장은 670 nm이지만, 고려된 파장은 580 nm에 대한 굴절율을 고려하였기 때문인 것으로 사료된다. 두 번째 원인은 수중 카메라의 시계각이 대기중에는 최대 48°이나 수중에서는 35.6°로 감소하기 때문에 대기의 결함 측정도보다 오차가 증가되기 때문이다. 결국 수중 환경 실험에 있어서 카메라와 슬릿빔의 시계각이 결함 길이에 대한 측정 오차에 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며, 수중에서의 라인 슬릿빔의 경사각을 이용한 카메라의 회전각도 추정 알고리즘의 적용과 결함 영상 회전을 통하여 수중결함 크기 측정 방법을 제시하였다.

References

- [1] Stephen Tetlow and John Spours, "Three-dimensional Measurement of Underwater Work Sites using Structured Laser Light", *Meas. Sci. Technol.* Vol. 10, pp. 1162-1167, 1999.
- [2] Nobuhiri Tsunashima, Hirosada Miyaoka, Kazuo Nakazawa and Masato Nakajima, "Detection of Front Obstacle of the Vehicle using Stereo Images", *T.IEE Japan*, Vol. 118-C, No. 5 pp. 743-748, 1998.
- [3] Kuntal Sengupta and Liyanage C. DeSilva, "A New Depth Cue Based Algorithm for Background-Foreground Segmentation", *SPIE Vol.* 3653, pp. 1305-1314, 1999.
- [4] Woontack Woo and Antonio Ortega, "Modified Overlapped Block Disparity Compensation for Stereo Image Coding", *SPIE Vol.* 3653, pp. 570-581, 1999.
- [5] N. C. Krieger "Automatic localization of Electron Backscattering Pattern Bands from Hough Transform", *Materials Science and Technology Vol.* 12, October pp. 837-843, 1996.
- [6] R. S. Petty, M. Robinson and J. P. O. Evans, "3D Measurement using Rotating Line-scan Sensors", *Meas. Sci. Technol.* Vol. 9, pp. 339-346, 1998.
- [7] Toshiyuki Takatsuji, Atsushi Kirita and Tomizo Kurosawa, "A Simple Instrument for Measuring Edge Angles using a Light Sectioning Method", *Meas. Sci. Technol.* Vol. 9, pp. 782-786, 1997.
- [8] Yan Xu, ChangSheng Xu, YingLi Tian, SongDe Ma and ManLi- Luo, "3-D Face Image Acquisition and Reconstruction System", *Technology Conference 1998.* (<http://lg.or.co.kr>).
- [9] Witold Czajewski and Andrzej Sluzek, "Development of a Laser Based Vision System for an Underwater Vehicle", *ISIE'99-Bled, Slovenia*, pp. 173-177, 1999.
- [10] Andre Morin, Michel Arsenault, Merv H. Edgcombe and Ernst Radloff, "Real-time Mounting of Icebreaker Propeller Blades Ice Load using Underwater Laser Ranging System", *SPIE Vol.* 3640, pp. 206-216, 1999.
- [11] Dae-Gyu Kim and Won-Seok Chang, "A Study on a 3-D Profile meter using Dynamic Shape Reconstruction with Adaptive Pattern Clustering of the Line-Shaped Laser Light", *IEEE Tencon*, pp. 1371-1374, 1999.

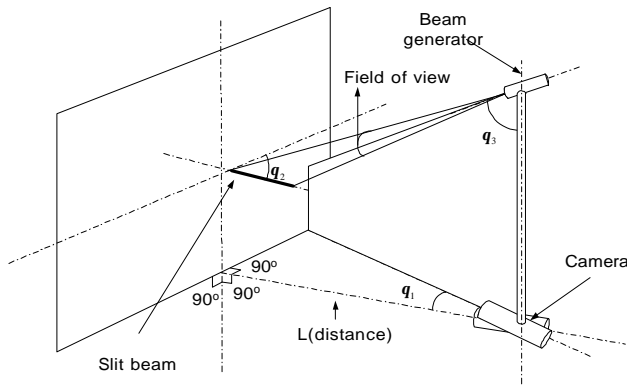


Fig. 1 Orientations of a slit beam generator and a camera against the wall.

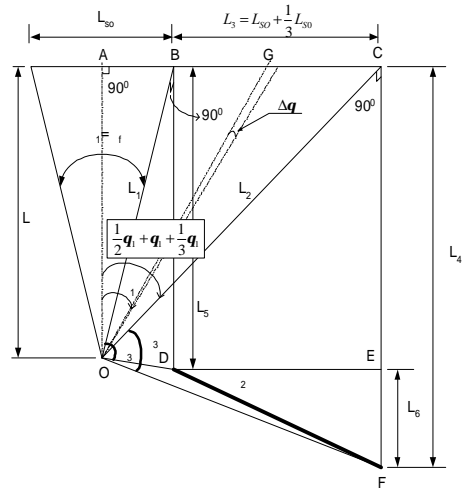


Fig. 2 Relationship of θ_1, θ_2 to θ_3 .

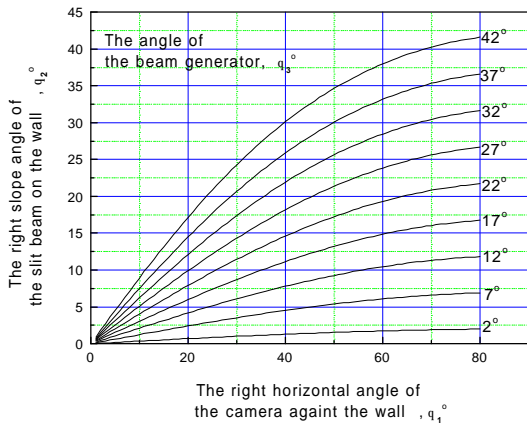
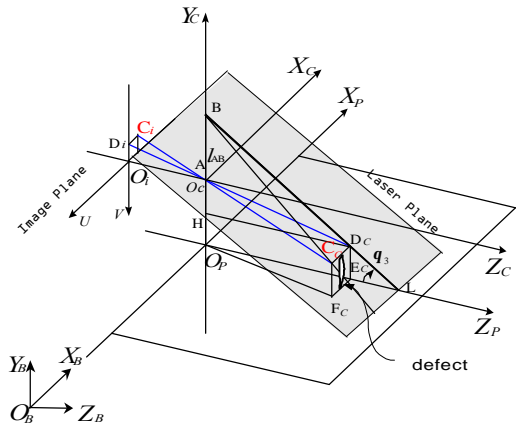


Fig. 3 Trend of θ_2 according to the variation of θ_1 with the parameter θ_3 fixed.



3D of View

Fig. 4 Coordinate system of camera model.

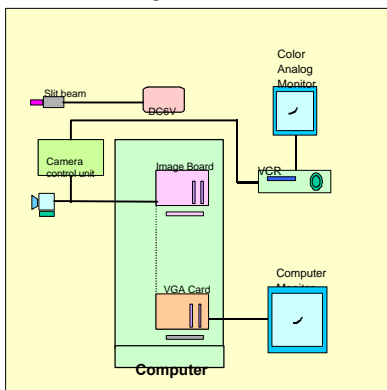


Fig. 5 Schematics of the system

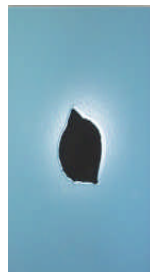


Fig. 6 Defect shape.



Fig. 7 Experimental set up for wall defect measurement

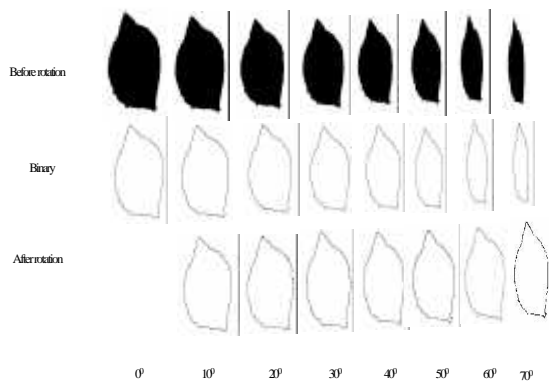


Fig. 8 Image reconstruction for round shape defects viewed at right section with various angles(θ_1).

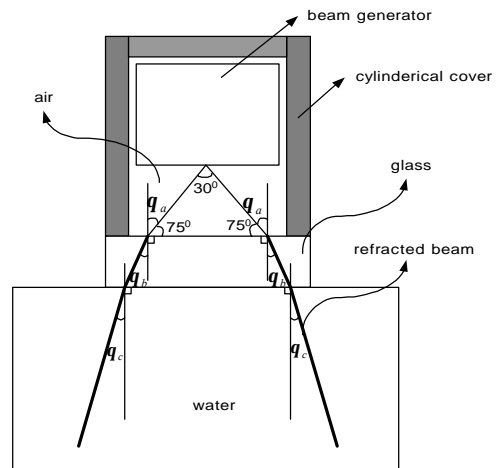


Fig. 9 Field of view of the projected beam in the water.

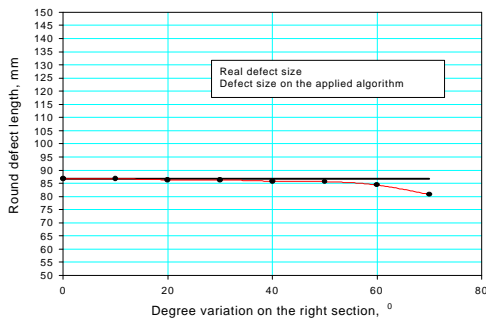


Fig. 10 Result of length estimation of round defect in the position tracking algorithm of the camera right angle.

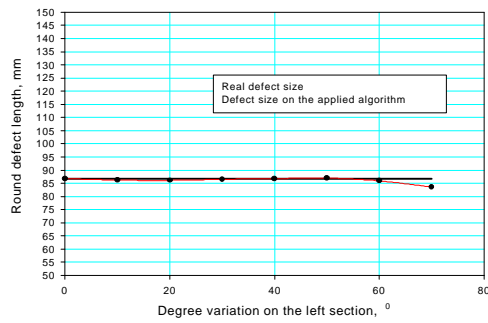


Fig. 11 Result of length estimation of round defect in the position tracking algorithm of the camera left angle.

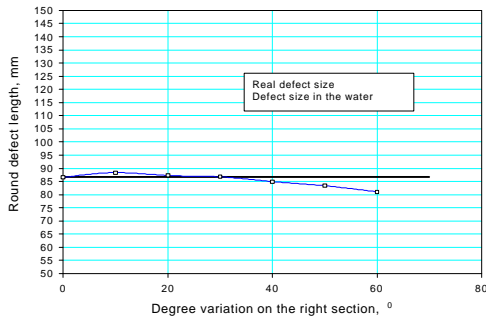


Fig. 12 Result of length estimation of round shape defect in the water of the camera right angle.

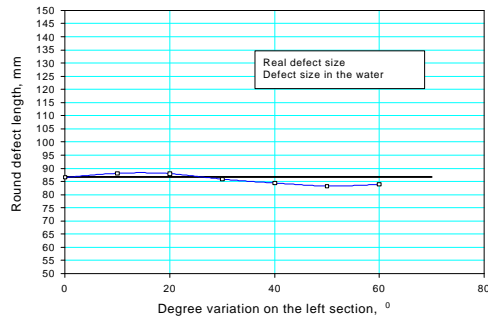


Fig.13 Result of length estimation of round shape defect in the water of the camera left angle.