

구조물 내벽의 균열 검사를 위한 시스템 개발에 관한 연구

이상호*(한양대 대학원 생산공학과), 신동익(한양대 정밀기계공학과), 손영갑(한양대 정밀기계공학과), 한창수(한양대 기계공학과), 이강문(진건설구조시스템), 마상준(한국건설기술연구원)

A Study on the Development of the System for Inspecting Cracks in the Inner Wall of Structures.

S. H. Lee(Mecha. Eng. Dept. HYU), D.Y. Sin(Precision Mechanical Eng. Dept., HYU), Y. K. Son (Precision Mechanical Eng. Dept., HYU), C. S. Han(Mechanical Eng. Dept., HYU)

ABSTRACT

In this paper, we have proposed an automatic inspection system for cracks on the surface of a structure. The proposed system consists of the imaging system and the vehicle system. The imaging system, a set of optical sensor, lens, illuminator, storage and their configuration, images the scene and store it on the hard disk. We adopted a linescan camera of 5000 pixel density to achieve high resolution without loss of simplicity. The vehicle system that moves the optical system is implemented by an AGV. The AGV moves forward at constant velocity and avoid obstacles to acquire a stable image. We have implemented an experimental system and have acquired images of the wall of hallway. The image is of 0.1-mm/pixel resolution and the scanning time is about 1 m/sec. The allow able scan.

Key Words : Crack(균열), Image(영상), Inspection(정밀검사), AGV(무인운반차)

1. 서론

구조물의 상태 및 주변환경이 그 구조물에 끼치는 영향을 판단하는데 있어서, 구조물 표면상에 존재하는 균열은 가장 직접적인 정보를 제공할 뿐만 아니라 이를 통해서 정밀 안전진단의 수행항목, 절차, 방법 등을 결정하게 된다. 이렇듯 구조물의 유지·보수 체계에 있어서 균열 검사는 출발점이 된다고 볼 수 있음에도 불구하고, 주로 작업자의 육안조사에 의존하고 있어 객관적 데이터를 얻기 어렵지만 아니라 효율적으로 관리할 수가 없는 실정이다.

비파괴 검사(Nondestructive Testing, NDT)를 이용한 구조물 내의 균열을 측정할 수 있는 기술은 이미 많은 성과를 거두었지만, 대부분 정밀 안전진단에 응용되고 있을 뿐, 검사의 복잡성, 느린 검사속도 등으로 인해 초기 육안 검사를 대체하지는 못하고 있다.

해외에서는 이러한 문제점을 인식하여, 도로 표면, 교각, 터널 라이닝과 같은 대형 구조물의 초기 육안 균열검사를 자동화 할 수 있는 시스템을 개발하는 데 많은 노력을 기울이고 있으며 영상획득 시

스템은 이미 외국의 몇몇 업체에 의해 상용화 되고 있다.

캐나다 로드웨어(Roadware) 사는 도로 표면의 상태를 검사하기 위한 시스템을 개발하여 상용화 하였다. 이 시스템은 CCD 카메라, 자이로, 초음파 센서를 차량에 탑재하여 도로표면의 영상을 80 km/h의 속도로 3-4 cm 분해능을 갖도록 획득한다. 일본의 코마츠(Komatsu) 사는 자체적으로 개발한 레이저 발진부와 수신부를 차량에 탑재하여 터널 영상을 획득하는 시스템을 개발, 상용화하였다.

일본 철도 종합연구소(Railroad Technical Research Institute, RTRI)에서는 라인 스캔 카메라를 이용하여 철도 터널표면 영상을 획득하는 시스템을 개발하였다. 그러나 이들 시스템은 영상획득 단계에 머무르고 있으며, 균열을 추출 및 측정 할 수 있는 알고리즘은 연구 단계에 있지만 획득한 영상을 이용하여 구조물의 오염, 박리, 박태등 여러 환경에 대한 정보를 획득하는데 유용하게 사용되고 있다.

일반적으로 구조물의 표면 상태를 영상화 하는데 레이저를 이용하는 방법과 카메라를 이용하는 방법을 이용할 수 있다.

레이저의 경우는 국외 균열 검사 시스템이 많이

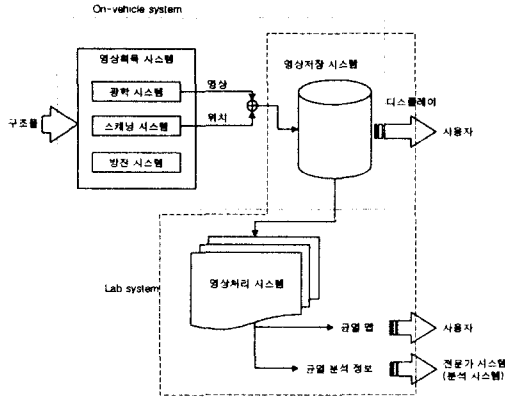


Fig. 1 Crack inspection system

적용하고 있지만, 측정 대상체와 센서와의 거리가 멀리 떨어져 있을 경우 높은 파워의 레이저가 필수적으로 제작해야 하는 문제가 있으며 고 파워의 레이저는 가격이 수 억원에 이른다. 또한 레이저 수신투 제작 및 레이저 변조를 위한 광학 시스템 설계 문제, 측정 표면에 물과 같은 이물질이 있는 경우의 레이저 반사 특성 변화 등 여러 가지 고려해야 할 사항이 많이 있다. 또한 레이저를 이용할 경우 레이저 특성이 영상의 품질을 좌우하기 때문에 장기 사용에 따른 레이저 열화에 따른 레이저 교체 문제와 고발열 레이저 냉각 시스템 비용등은 균열 인식 시스템의 운전 비용에 큰 부담을 줄 수 있다. 따라서 레이저를 이용하는 방법의 여러가지 문제점을 극복하고 저가의 시스템 개발을 위해서는 카메라를 이용하여 구조물의 표면을 영상화하는 연구가 절실히 요구된다.

본 논문에서는 카메라를 이용하여 구조물의 표면상태를 영상화하는 시스템 개발에 관한 연구를 언급하고자 한다. 이러한 영상화 시스템은 향후 구조물의 건전성 평가를 위한 구조물의 균열 인식 시스템을 구성하는데 매우 중요한 역할을 한다.

Fig. 1 은 현재 연구 수행중인 구조물의 균열 인식 시스템의 구성과 본 논문에서 언급할 영상화 시스템의 적용 예를 나타내고 있다. 이러한 균열 인식시스템은 구조물의 상태를 영상으로 획득하여 저장하고, 또한 영상처리를 이용하여 균열을 판독함으로써 구조물의 보수, 보강에 이용될 균열에 대한 여러 가지 정보를 제공하는 시스템이다.

2. 영상획득 시스템 구성

영상획득 시스템은 크게 측정 대상 표면에 대한 정보를 획득할 수 있는 센서를 포함한 영상화 장치와 영상화 장치를 일정하게 측정 대상표면을 따라 스캐닝 할 수 있도록 구동하는 구동 시스템으로 구성된다. 영상 획득시스템의 전체 구성을 Fig. 2 에 나타냈는데 카메라와 조명은 측정 대상 표면

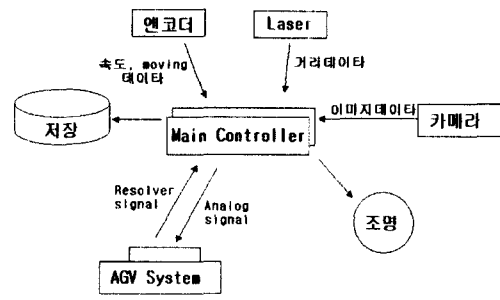


Fig. 2 Imaging system

의 정보를 받아들이는 영상화 장치이다. AGV 는 고정되어 있는 구조물을 따라 일정한 거리를 두고 일정한 속도로 구동하기 위하여 고안된 장치이다.

2.1 영상화 시스템

CCD 카메라는 감광소자의 배열 형태에 따라 매트릭스(matrix) 카메라와 라인스캔(linescan) 카메라로 구분된다. 매트릭스 카메라는 한번의 노출로 일정 면적의 영상을 형성하기 때문에 사람의 눈과 친숙하고 인터페이스가 이미 표준화되어 있는 장점이 있지만, 소자의 밀도가 비교적 낮은 단점이 있다. Table 1.은 10 m 의 폭을 갖는 구조물에 대해서 1 mm/pixel 의 정밀도를 갖는 영상을 획득하기 위해 필요한 전형적인 카메라의 개수를 비교한 것이다.

Table 1. Matrix vs. linescan camera

	Matrix Camera		Linescan CCD
Density	512×512	2000×2000	5000
Cost	Low	High	Low
# of Cam.	20 / 10m	5 / 10m	2 / 10m
Resolution	1 mm/pixel		

Table 2. Specification of the camera

Elements	Specification
Density	5000 pixels
Readout rate	12M pixels/sec
Interface	RS-424

일반적인 TV 카메라를 사용했을 경우 라인스캔 카메라와 같은 정밀도를 얻기 위해서 필요한 카메라 개수가 10 배가 되는 것을 볼 수 있다. 또한 매트릭스 카메라의 경우, 구조물의 전체 영상을 얻기 위해서는 많은 양의 사각 영상을 합성해야 하는데, 이 과정에서 영상간의 불연속 혹은 겹침(overlap)이 발생할 수가 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 고밀도(5000 pixel) 라인스캔 카메라를 영상획득 센서로 선정하였다. 라인스캔 카메라는 별도의 정밀한 스캐닝 메커니즘(scanning mechanism)이 필요한데, 이것은 2.2 절에서 다루도록 하겠다.

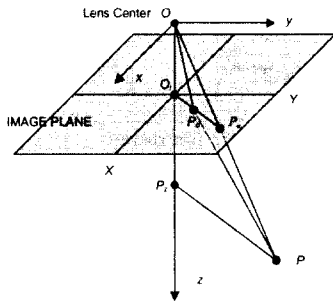


Fig. 3 Perspective transform with lens distortion.

Table 2는 카메라의 사양을 나타내고 있다.

영상 내의 치수를 화소 단위가 아닌 의미있는 단위로 나타내기 위해서는 카메라 모델링이 되어야 한다. 즉 화소 좌표계(pixel coordinate system)와 실제 좌표계(world coordinate system) 사이의 변환 관계식을 정의하고 각 파라미터를 보정해야 한다. 본 연구에서는 바늘구멍카메라(pin-hole camera)에 원심방향의 렌즈왜곡(radial lens distortion)을 고려한 카메라 모델을 채택하였다. 이는 카메라 중심의 강체변환과 카메라의 투영변환(perspective transform), 식 (1)과 같은 렌즈왜곡 모델을 통해 표현된다.

$$\begin{aligned} X_d + \kappa_1 X_d (X_d^2 + Y_d^2) &= X_u \\ Y_d + \kappa_1 Y_d (X_d^2 + Y_d^2) &= Y_u \end{aligned} \quad (1)$$

(X_u, Y_u) 는 왜곡이 없을 경우 점 P 의 상이고 (X_d, Y_d) 는 왜곡에 의한 상이다. Fig. 3은 렌즈 왜곡을 고려한 투영변환을 나타내고 있다.

라인스캔 카메라는 일반적인 CCD 카메라에 비해 유효 민감도(sensitivity)가 떨어지기 때문에 더 많은 광량을 요구한다. 특히 터널과 같은 구조물의 경우는 상당히 높은 출력의 조명 사양이 요구된다.

조명 시스템이 가져야 하는 또다른 특성은 시간에 따라 조사분포가 변하지 않는 안정성이다. 본 연구에서는 할로겐 광원을 이용한 최대 1000 W의 출력을 낼 수 있는 조명을 선정하였다. 그리고 조사효율을 높이기 위한 반사경(reflecting mirror)과 넓은 범위에 조사할 수 있도록 확산렌즈(scattering lens)를 설계하였다.

Table 3. Specification of light

Elements	Specification
Source	Halogen
Reflecting mirror	250 mm radius
Scattering lens	1500 mm radius

2.2 구동 시스템

구조물의 균열 검사용 시스템은 일반적으로 특수하게 제작한 자동차를 이용하고 있다. 이러한 특장차는 도로 및 교각과 터널 라이닝부등 적용 목적과

검사의 효율성을 높이기 위하여 고안된 장치이다. 그러나 구조물 내벽을 검사하기 위해서 특장차를 운용한다는 것은 구조물 안으로 자동차를 이송하는 문제와 균열 검사 시 자동차의 접근 문제 등 많은 어려움이 따른다. 따라서 구조물 내벽의 균열을 효율적으로 검사하기 위해서 본 논문에서는 자동차를 대신하여 AGV(Automatically Guided Vehicle)를 이용하였다. AGV를 이용한 검사 시스템은 구조물 내벽 균열 검사를 자동화 할 수 있는 효율적인 시스템이라 할 수 있다. 본 논문에서 적용한 AGV는 일정한 속도로 직진 운동을 구현할 수 있는 장치이다.

영상획득을 위한 라인스캔 카메라는 카메라의 특성상 일정한 속도를 유지하면서 측정 대상 물체에 대한 영상을 기록한다. 만약 속도가 일정하지 않게 영상을 획득 하였다면 영상의 프로세싱이나 구조물 내부 벽면의 맵(map)을 형성할 때 영상의 늘어짐으로 인하여 많은 자료를 잃게 된다. 따라서 영상화 장치가 장착된 AGV는 카메라의 처리 속도보다 낮은 속도로 일정하게 움직여야 한다. 일정한 속도로 움직이더라도 카메라의 처리 속도보다 빠른 속도로 움직이면 영상획득 과정에서 이 또한 늘어진 영상을 얻을 것이다. 또한 AGV와 측정 대상체간의 거리가 변화하면 영상으로 기록된 균열 정보 처리 시 일반화된 균열 크기 보정이 어렵다.

3차원 정보를 지닌 실제계 좌표를 이미지 평면으로 변경 시 고려해야 하는 여러 파라미터들은 AGV가 구동될 때 실시간으로 처리될 수 없기 때문에 측정 대상체와 카메라와의 거리는 일정하게 유지되어야 한다. 따라서 구조물 내벽의 균열을 검사하기 위해 적용할 AGV는 일정한 속도와 측정 대상체와의 일정한 거리가 유지될 수 있도록 제어되어야 한다.

AGV에는 측정 대상 표면과의 정보를 획득하기 위한 레이저 센서, 구동 거리 측정을 위한 엔코더 센서, 그리고 영상화 장치가 장착되어 있다. Main Controller는 영상화 장치를 구동 시키며 영상화된 정보를 저장한다. 또한 측정 대상과의 거리를 일정하게 유지하도록 AGV 경로를 제어하면서 AGV 바퀴에 부착된 엔코더 신호를 받아들여 AGV 속도를 제어하며 스캐닝한 거리를 처리한다. 따라서 구조물 내벽에 대한 표면 상태를 측정 거리에 따라 영상화하여 구조물 내벽에 대한 정보를 정확하게 처리하여 균열의 위치 및 구조물의 상태를 저장할 수 있다. Fig. 4는 본 논문에서 적용한 영상화 장치가 장착된 AGV를 나타내고 있으며 AGV는 AGV 구동부와 Cart 장치로 구성된다. Fig. 5에 Cart 장치를 나타낸 것처럼 Cart에 카메라와 조명, 엔코더와 영상 저장장치를 설치하고 Cart를 AGV 구동 장치와 결합시켜 AGV가 Cart를 이동 시키게 하였다. Cart 장치를 고려한 이유는 건물 내벽외에 건물 외벽 및 터널 라이닝부 검사 시 쉽게 AGV 구동부와 Cart를 분리시킬 수 있도록 함으로써 영상 획득시스템의 범용성을 확보하기 위해서 이다

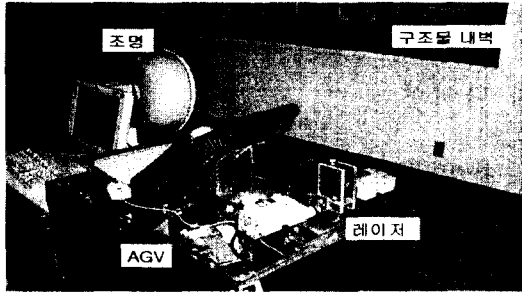


Fig. 4 (a) AGV system

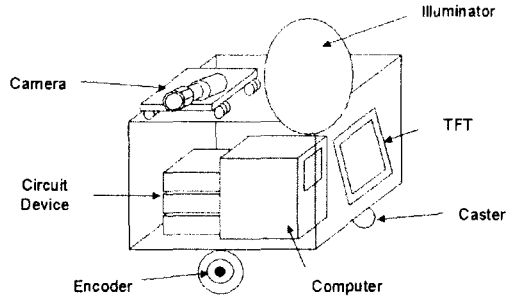


Fig. 4 (b) Schematic diagram of cart system

Fig. 4 Scanning system

3. 실험

Fig. 4 와 같이 개발된 시스템으로 연구실 차원의 실험을 수행하였다. 획득한 벽의 영역은 1 m x 10 m 이고 측정 속도는 0.8 m/sec 이다.

Fig. 5 는 획득된 영상이다. Fig. 5(a)는 획득 대상을 디지털 카메라로 획득한 영상이고 Fig. 5 (b)는 본 시스템을 통해 획득한 영상이다.

조명이 FOV(Field of view) 전체를 조사하지 못한 점이 발견되고 그 부분에서의 SN(signal to noise)비가 상당히 작은 것을 확인하였다. 영상의 분해능은 0.2 mm/pixel 이다.

4. 결론

본 연구에서는 라인 카메라를 사용하여 구조물 내부의 균열을 검사하는 시스템을 제안하고 개발을 수행하였다. 일정 속도 구현을 위한 스캐닝 시스템과 AGV 의 영상획득 실험으로 검사의 정밀도를 실현 하였다. 본 실험에서 개발한 영상 획득 장치를 이용한 균열 영상인식 시스템은 단독적인 모듈 형태이며, 구조물 내부 또는 터널 등의 구조물에 적용이 가능하도록 시스템의 유연성을 보였다. 즉, 철도 및 도로의 터널과 구조물의 내 외벽 등을 하드웨어적으로 개조 없이 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이는 추후 연구될 로봇을 이용한 대형 구

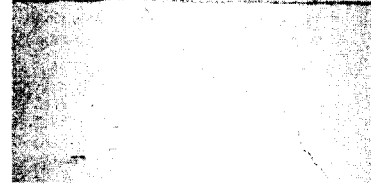


Fig. 5 (a) Target object



Fig. 5 (b) Acquired image

Fig. 5 Experimental result

조물의 균열 조사 시스템의 개발에 큰 도움이 될 것이고, 이러한 영상 및 기구 시스템은 검사 대상의 정밀도를 고려하여 최소한의 중량과 크기로 구성하여 다양한 검사 대상의 이동 검사 및 대규모 영상 획득 구동 장치를 도입하기에 적합하도록 개발 될 것이다.

참고문헌

1. Kuk-hyun Han, Sinn Kim, Yong-jae Kim, Jong-hwan Kim, "Internet Control Architecture for Internet-Based Personal Robot," autonomous Robots , Vol. 10, pp. 135 - 147, 2001.
2. Fenghui Yao, Guifeng Shao, Hiroaki Yamada, Kiyoshi Kato, "Development of an automatic Conceret-tunnel Inspection System by an Autonomous Mobile Robot," Proceedings of the 2000 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication Osaka, Japan - September 27-29 2000
3. Tlusty, J., Smith, S., and Zamudia, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 517 - 521, 1990.
4. H.D.Cheng, M.Miyojim, "Automatic Pavement Distress Detection System," Journal of Information Sciences 108, pp.219-240, 1998
5. J Pynn, Awright, R Lodge, "Automatic Identification of Cracks in Road Surfaces," Image Processing and its Applications, Conference Publication, No. 465, 1999
6. 윤지섭, "원격 로봇용 카메라 자동추적시스템 개발에 관한 연구," 대한 기계 논문집, 제 17 권, 제 9 호, pp. 2373-2380, 1993.