

터널 구조물의 균열 영상 인식 및 분석

김영린*, 정동현*, 진광원**, 이강문**, 송창근*
*한림대학교 컴퓨터공학과
**(주) MOI

Detecting and Analyzing Crack Image of Tunnel Construction

Young-Rin Kim* Dong-Hyun Jeong*
Kwang-won Jin*, Kang-Mun Lee**, Chang-Geun Song**
*Dept of Computer Engineering, Hallym University
**MOI Ltd

요 약

본 논문에서는 터널 구조물에서 발생하는 균열의 인식과 이에 대한 정보를 획득하기 위한 방법에 대한 연구를 수행하였다. 터널 구조물에서 발생하는 균열의 경우, 건설 분야의 특수성 때문에 기존의 경계점 인식(edge detection) 알고리즘을 적용하는 경우 정밀도 저하의 문제가 발생한다. 이러한 문제점을 해결하고 더불어 정밀도를 향상시킬 수 있는 방법으로 영상에서 균열을 인식하는 균열 인식 단계와 인식된 균열의 길이, 두께 등을 측정하는 균열 정보 획득 단계로 구분하였다. 균열 인식 단계에서는 균열의 시작점과 끝점을 기준으로 휴리스틱(Heuristic) 알고리즘을 사용하여 픽셀 값의 분포에 따라 균열의 중심선을 계산하여 균열을 인식한다. 균열 정보 획득 단계에서는 균열 인식 단계에서 얻은 정보를 통해 균열의 길이, 진행 방향 정보, 그리고 균열의 두께를 계산한다. 균열의 길이 및 진행 방향 정보는 균열 인식 단계에서 얻어진 정보를 통하여 계산하며, 균열 두께 측정은 각 픽셀의 누적 값을 이용하여 계산하는 원형 검출기(Daugman 알고리즘)를 변형하여 사용하였다.

1. 서론

국내의 터널 총 연장 길이는 고속도로 및 국도, 지하철, 철도, 고속전철의 경우 대략 875Km 이상에 달한다. 터널은 외부환경 및 재료 자연적인 요인으로 인하여 노후화되며 특히 고속전철 터널의 경우 전철의 고속 이동에 의한 공진으로 인한 터널의 손상이 문제점으로 제기되고 있다. 이러한 터널 구조물의 안전 점검은 년 0.3회~1회 이상의 정기점검과 정밀검사를 실시하며 이는 터널 내부의 육안조사에 의존되고 있다. 이러한 육안 조사는 점검자의 주관적 판단에 의존하기 때문에 객관성이 결여된다. 터널 균열 자동화 검사 시스템을 개발의 일환으로 터널 영상을 대상으로 기존에 제시되어있는 경계 검출(Edge Detecting) 알고리즘을 사용할 경우 일정 크기 이상의 균열에 대해서는 길이와 두께를 측정할 수 있었으나 미세한 균열에 대해서는 오차 발생으로 인하여 정확한 측정을 할 수 없었다. 건설 분야의 특성상 정밀성을 요구하기 때문에 본 논문에서는 미세한 균열까지 정밀 측정이 가능한 방법을 제안하였다.

본 논문에서 제안한 터널 균열 측정 시스템은 크게 균열 인식 단계와 균열 정보 획득 단계로 구성된다. 균열 인식 단계에서 터널 영상 내에 존재하는 균열의 위치와 방향을 인지하고, 균열 측정단계에서는 변형된 'Daugman 원형 경계 검출기'를 적용하여 균열 정보를 획득하였다.

2. 기존 연구

터널 영상에서 균열 획득을 위해 Sobel, Template Matching, Laplacian Mask 등의 경계 검출 알고리즘을 적용해 보았다. 그 결과 균열의 두께가 비교적 큰 경우에는 모두 만족할만한 결과를 보였지만 두께가 얇은 균열에 대해서는 정밀한 결과를 보이지 못하였다. Sobel 알고리즘 적용 시 해당 경계 주변의 픽셀까지 경계로 검출하는 경우가 많았다. 이러한 성질은 균열 경계의 확대 또는 축소된 결과를 야기했다. Template Matching 알고리즘도 Sobel 알고리즘과 다소 유사한 결과를 보였고 실제 균열보다 넓게 경계를

검출하는 경우가 많았다. Laplacian Mask는 균열 두께에 관계없이 해당 경계를 검출하였지만 잡음(Noise)에 민감하여 많은 오차를 보였다. 따라서 위의 경계 검출 알고리즘을 터널 균열 인식에 사용하기에 무리가 따라 새로운 방법을 제안하였다.

3. 균열 영상 인식 및 분석

영상은 밝기와 좌표 값을 갖는 픽셀의 집합으로 볼 수 있다. 균열 인식이란 전체 영상 중에서 균열이라고 판단되는 픽셀의 집합(subset)을 정의하는 것이라고 볼 수 있다. 영상에서 균열을 인식할 수 있는 방법은 특정 픽셀 값을 기준으로 그 값보다 큰 경우에는 균열로 인식하고 그 값보다 작은 경우에는 배경으로 인식할 수 있다. 또는 그 반대의 경우로 생각할 수 있다. 이 방법은 계산상 비용이 적을 뿐만 아니라 가장 오래된 방법으로서 간단한 응용에도 널리 쓰이고 있으나 복잡한 영상의 경우, 이 방법으로는 만족할 만한 결과를 얻기는 어렵다. 특히 본 논문에서와 같이 한 영상 내에 여러 균열이 존재하고, 터널 벽면과 같이 조명이 균일하지 않고 얼룩이나 기타 시설물 등의 밝기 분포를 변화시키는 다양한 요인들이 존재하는 환경에서 획득된 영상의 경우 하나의 밝기를 기준으로 균열과 배경을 분리하기에는 상당한 무리가 따른다.

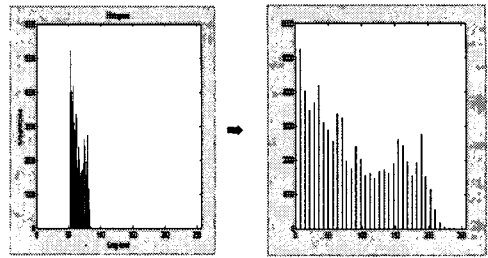
3.1 균열 인식 단계

균열 인식 단계는 영상에서 균열을 인지하는 단계이다. 터널 내부 영상은 촬영 시 조명의 균일 정도, 누수로 인한 터널 내부면의 얼룩, 각 터널의 구조적 차이로 인해 발생 할 수 있는 영상의 왜곡, 각종 노이즈 등의 이유로 터널 내 균열 분석 작업에 그대로 사용하기에는 무리가 따른다. 효과적인 균열 검출 및 분석을 위해서는 명암 대비가 높고 노이즈가 없는 영상이 필요하다. 이를 위해 먼저 영상의 노이즈를 제거 후 히스토그램을 계산하여 영상을 구성하는 모든 픽셀이 균등하게 분포시키기 위해 콘트라스트 스트레칭(Contrast stretching) 알고리즘을 사용하여 히스토그램을 양끝에서 잡아당기는 방법을 사용하였다.

균열의 인식을 완전 자동화로 처리할 경우 영상 내에 존재하는 균열을 검색할 경우 긴 검색 시간을 필요로 하고 검색이 필요하지 않은 영역까지 계산하므로 사용자가 마우스를 사용하여 영상에 존재하는 균열의 시작점과 끝점을 선택하는 방법을 사용하였다.

그리고 선택된 시작점과 끝점을 기준으로 휴리스틱(Heuristic) 알고리즘을 사용해 균열의 길이 값 및 길

이 방향 정보를 얻어 균열을 인식하였다.



(그림 1 콘트라스트 스트레칭 전후의 히스토그램)

3.2 균열 정보 획득 단계

균열 정보 획득 단계는 균열 인식 단계에서 인식한 균열에 대해 두께 값 정보를 획득하는 단계이다. 균열의 두께 값을 사람의 홍채 영역 인식에서 이미 정확성과 연산속도가 검증되어진 'Daugman 원형 경계 검출기'를 변형하여 얻는다. 이는 이미지에서 특정 영역의 픽셀 값의 누적 값을 구한 후 그 누적 값의 변화를 분석하는 방법이다. 원형 객체에 대해서만 적용되는 Daugman의 방법을 각 픽셀에서의 기울기 값을 적용하여 임의의 곡선 또는 직선에 대해서도 적용될 수 있도록 변형한 방법으로 이를 위해서는 균열의 길이와 균열의 방향(기울기), 그리고 휴리스틱 알고리즘을 종합적으로 사용하게 된다. 휴리스틱 알고리즘에 의하여 추출된 균열의 그래프를 시작점을 1로 끝점을 N으로 표현하는 경우, 균열의 중심선을 기점으로 두께를 계산할 수 있다. 선택된 영역에서 균열의 두께를 계산하기 위하여 휴리스틱으로 균열의 기울기를 따라서 그래프의 X축에 대한 폭을 계산하여 평균을 내는 방식으로 균열의 두께를 계산한다. 각 중심픽셀에서의 기울기를 사용하여 x, y축에 계속적으로 수정/변경되기 때문에 결과적으로 하나의 긴 수직선의 형태에서 균열의 두께를 계산하는 방식으로 귀착될 수 있다.

균열의 중심선에 해당하는 픽셀(휴리스틱 알고리즘의 의해 검출된 균열의 패턴)을 기준으로 x축에 해당하는 2P개의 픽셀을 추출하여 픽셀의 집합을 구성하며, y축을 기준으로 1부터 N까지의 범위 내에서 각 픽셀의 변화량을 누적 값으로 계산한다. 중심선을 기준으로 좌, 우측에 해당하는 픽셀에서의 누적 값을 서로 독립적으로 계산하여 균열 폭의 시작점과 끝점을 추출해 낸다.

$$u_{left} = \int_1^N (nx+1, ny+y) dy \quad (-p \leq x \leq 0) \quad (1)$$

$$w_{right} = \int_1^N I(mx+x, my+y) dy \quad (0 \leq x \leq p) \quad (2)$$

mx : x축에 대한 균열의 중심 좌표
 my : y축에 대한 균열의 중심 좌표
 x : x축에 대한 픽셀의 좌표
 y : y축에 대한 픽셀의 좌표

픽셀의 위치 값인 -P부터 P까지의 X축에 대하여 식 (1)과 식(2)와 같이 각각의 Y축에 대한 픽셀 값을 누적하여 w_{left} 와 w_{right} 를 계산한다. 누적된 w_i 값에 대하여 식(3)과 같이 최대값을 추출하면 균열의 경계면에서는 상대적으로 다른 영역에서 보다 더 큰 w_i 를 찾아낼 수 있기 때문에, 이 지점을 균열의 시작 혹은 끝점으로 간주할 수 있다.

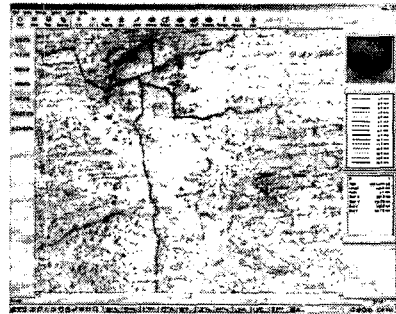
$$\max(i, mx, my) \left| \int_1^N I(mx+i, my+y) dy \right| \quad (3)$$

여기서 P값은 고정된 값이 아니라 사용자가 그 값을 임의로 선택할 수 있는 값이다. 한 균열의 두께 측정을 위한 픽셀 값의 비교 회수는 (2P * 균열의 길이)이다. 따라서 측정 범위(P값)가 증가할수록 할수록 그 측정 범위에 비례하여 연산회수가 증가하고 자연스럽게 시스템의 속도가 저하된다. 또한 두께가 가는 미세한 균열의 경우 영상의 노이즈로 인하여 측정 범위를 넓게 하면 할수록 두께 값 검출에 대한 오차 발생률이 증가한다. 그리하여 본 논문에서는 사용자로 하여금 검출 할 수 있는 크랙의 최대 두께 값을 지정하여 두께 값이 크지 않은 균열에 대해 불필요한 연산(픽셀 값 비교)을 감소시켜 시스템의 속도를 향상시키며 오차 발생률을 감소시켰다. 여기서 측정 범위의 사용자 입력 값은 픽셀수를 길이(mm)로 환산하여 1mm, 3mm, 5mm, 10mm로 고정시켰다. 이때 한 픽셀의 가로 * 세로 값을 1 * 1로 하여 수직 * 수평 방향은 1, 대각선 방향은 $\sqrt{2}$ 로 계산하였다.

$\sqrt{2}$	1	$\sqrt{2}$
1	Center	1
$\sqrt{2}$	1	$\sqrt{2}$

(그림 1 Center를 기준으로 한 각 픽셀간 길이)

그리고 본 논문에서는 반복 실험을 통하여 균열의 폭의 변화가 크고 일정길이 이상의 균열의 경우에 오차 발생 확률이 높음을 인지하였다. 예를 들어 균열의 폭이 점증적으로 넓어지거나 또는 좁아지는 경우이다. 그리하여 이로 인한 오차발생을 최소화하기 위하여 길이가 N인 균열의 경우 위의 작업을 N번 누적하여 작업하지 않고 일정한 단위길이(본 논문에서는 최대 50픽셀을 단위 길이로 함)로 분할하여 폭을 측정 후 산술평균을 취하여 균열의 폭을 결정하였다.



(그림 2 손상 정보 추출 소프트웨어)

4. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서 제안한 터널 구조물의 균열 영상 인식 및 분석에 관한 방법 중 'Daugman 원형 경계 검출기'를 변형하여 적용한 방법은 기존에 제시되어있는 기타 경계 검출 알고리즘을 적용했을 때와 비교하여 터널 영상 내 균열 정보 획득에서 균열의 두께와 상관없이 상대적으로 좋은 결과를 보였다. 물론 이 방법의 터널 영상의 균열 정보를 획득하는데 있어서 최적의 방법은 아니며 균열 인식에서 사용된 휴리스틱 알고리즘의 특성상 수행 시간이 오래 걸리고 항상 최적의 결과를 내지 못한다는 문제점을 가지고 있다. 또한 터널 구조물에 대한 균열 검사 시스템의 국내에서는 전무한 실정이지만 몇몇 선진국에서는 터널뿐만 아니라 기타 건축물 등에 대해서도 이러한 시스템이 개발되어있고 상용화되어 있다. 앞으로 본 논문에서 제안한 방법 이외의 기타 알고리즘을 적용하여 비교 분석하며 외국의 상용시스템과 비교하여 단점을 보완할 예정이다.

[참고문헌]

- [1] 대우건설기술연구소, "터널 안전관리를 위한 정밀 안전진단 시스템 개발", 과학기술부, 1998. 10.
- [2] 김수점, 장유정, "에지의 구조적 정보를 이용한

- 에지추출” 한국정보처리학회 논문지 제 3권 제 5호
1996.
- [3] 이성원, “터널의 외관조사를 위한 터널 스캐닝시스
템”, 건설기술정보, 1998.6.
- [4] 장승필 외 5인, “터널의 유지관리 및 계측”, 대한
토목학회지, 1998.11.
- [5] 한국건설기술연구원, “터널의 안전진단 체계정립 및
균열 자동측정 시스템 개발(I)”, 한국건설품질관리공
단연구원, 1998.9.
- [6] 한국철도기술연구원, “고속철도 선로구축물 성능
확보를 위한 터널 계측 및 평가 시스템 개발(II)”, 한
국고속철도건설공단, 1999.12.
- [7] D. H. Ballard and C. M. Brown, “Computer
Vision, Englewood Cliffs”, NJ: Prentice-Hall, 1982.
- [8] J. Maeda, 1994, Development and application of
the SMART system, Automation and Robotics in
Construction, Vol. 11
- [9] R. Jain, R. Kasturi, and B. G. Schunck, “Machine
Vision”, McGraw-Hill, 1995.
- [10] R. J. Schalkoff, “Digital Image Processing
and Computer Vision”, John Wiley & Sons, 1989.
- [11] R. M. Haralick and L. G. Shapiro, “Computer
and Robot Vision”, Addison-Wesley, Vol. I, 1992.
- [12] Rafael C. Gonzalez “Digital Image Processing”
Addison-Wesley Publishing Company
- [13] Bernd J hne “Digital Image Processing 1991,
Springer-Verlag
- [14] I. Pitas “Digital Image Processing Algorithms
and Applications” 1993, Prentice Hall
- [15] Maher A. Sid-Ahmed, “Image Processing”
1995, McGraw-Hill
- [16] L. S. Davis. “A Survey of Edge Detection
Techniques,” 8omputer Graphics and Image
Processing 4, pp. 248-270, 1975.
- [17] Tamar Peli, “A Study of Enge Detection
Algorithms” Computer Graphics and Processing
20,1-21. 1982