

가버 필터를 사용한 철도 콘크리트 궤도 도상의 자동 균열 감지 개발 Development of Automatic Crack Detection using the Gabor Filter for Concrete Structures of Railway Tracks

나용현^{a,*}, 박미연^{a,1}, 박지수^{a,2}, 박성백^{b,3}, 권세곤^{b,4}

Yong-Hyoun Na^{a,*}, Mi-Yun Park^{a,1}, Ji-Soo Park^{a,2}, Sung-Baek Park^{b,3}, Se-Gon Kwon^{b,4}

^a S.H. Tech & Policy Institute, Seoul 06-770, Republic of Korea

^b Dept. of Railroad Research Institute, Korea Railroad Corporation, Daejeon 34-618, Republic of Korea

ABSTRACT

Purpose: Concrete track that affects on railway safety can detect cracks using image processing technique. However, since a condition of concrete track and surface noisy are obstructed to detect cracks, there is a need for a way to remove them effectively.

Method: In this study, we proposed an image processing to detect cracks effectively for Korean railway and verified its performance through experiment. We developed image acquisition system for capture a railway concrete track and acquired railway concrete track images, randomly selected 2000 images and detected cracks in the image process using proposed Gabor Filter Bank methods.

Results: As a result, 94% of detection rate are matched to the actual cracks in same quality and format railway concrete track image.

Conclusion: The crack detection method using Garbor Filter Bank was confirmed to be effective for crack image including noise in the Korean railway concrete track. This system is expected to become an automated maintenance system in the existing human- centered railway industry.

KEYWORDS

Crack detection,
Concrete railway track,
Line detection,
Track Maintenance,
Gabor Filter Bank,
Minimum enclosing rectangle

연구목적: 철도 안전에 영향을 미치는 콘크리트 궤도는 이미지분석 기술을 사용하여 균열을 감지 할 수 있으나 균열을 검출하기 위한 콘크리트 궤도 및 표면 오염의 조건이 균열 검출에 방해되므로 이를 효과적으로 제거하기 위한 방법이 필요하다.

연구방법: 본 연구에서는 한국 철도의 균열을 효과적으로 감지하기 위한 이미지 분석 기법을 적용한 프로세스를 제안하고 실험 모듈을 통해 취득된 이미지를 분석하여 성능을 검증하였다. 또한, 우리는 제안된 Gabor Filter Bank 기법을 사용하여 철도 콘크리트 도상 이미지를 획득한 데이터 중 무작위로 선택된 2000개의 이미지를 개발된 프로세스를 통해 자동 균열 검출을 수행하여 타당성을 검토하였다.

연구결과: 연구에서 제안된 시스템으로 균열 검출 결과 탐지율이 약 94% 성능으로 검토되었으며 취득된 철도콘크리트도상이미지의 균열이 동일한 크기와 형식으로 일치하였다.

결론: Gabor Filter Bank를 사용한 균열 검출법은 한국 철도의 콘크리트 궤도도상에 노이즈를 포함한 균열 이미지에 효과적으로 분석되는 것을 확인 할 수 있었다. 이 시스템은 기존의 인간 위주의 철도 산업에서 자동화 된 유지 관리 시스템이 될 수 있을 것으로 기대된다.

균열 검출,
콘크리트 철도 궤도,
선 검출, 궤도 유지 관리,
가버 필터 뱅크,
균열 영역 인식.

© 2018 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-10-6663-3277. Email. yhna.shtpi@gmail.com

1 Tel. 82-10-2267-2804. Email. momo6238@hanmail.net

2 Tel. 82-10-5152-7021. Email. perfumeindream.shtpi@gmail.com

3 Tel. 82-10-8881-9633. Email. mainline@korail.com

4 Tel. 82-10-2988-6664. Email. tibobkr@korail.com

1976-2208 © 2018 Society of Disaster Information All rights reserved.

<http://dx.doi.org/10.15683/kosdi.2018.12.31.458>

ARTICLE HISTORY

Received Nov. 15, 2018

Revised Nov. 21, 2018

Accepted Dec. 13, 2018

1. 서론

철도기술의 발전으로 고속 및 높은 중량의 열차에 대한 하중 지지를 위해 레일을 콘크리트 슬래브에 직접 고정하는 궤도 기술이 보편화 되고 있다. 철도에서의 콘크리트 궤도(도상)은 철도 인프라 구성 요소 중에 하나로 열차를 지지하는 구조물으로써 지속적인 품질관리와 유지보수는 열차와 승객의 안전에 중요한 영향을 미치게 된다. 이러한 콘크리트 궤도는 구조적인 안정성뿐 아니라 과도한 중량 및 반복하중에서의 내구성 확보에 효율적이다. 그러나 시설의 노후화, 열팽창 및 수축, 인력에 의한 손상 및 지형 변화 등의 다양한 영향으로 콘크리트 궤도의 표면과 내부의 손상을 야기한다. 이와 같은 콘크리트 궤도의 분리(Split) 및 결함(Defect)를 보통 균열이라고 하며 콘크리트 궤도 구조물의 건강상태를 직접적으로 반영 한다. 콘크리트 구조물의 보수 및 사고 예방을 위해서는 균열에 대한 시기적절하고 정확한 모니터링 정보와 기술이 필요하다.

지난 몇 년 동안 콘크리트 구조물에 균열이 미치는 영향에 대한 관심이 커졌으며 균열을 무시하는 것보다는 균열의 영향을 최소화하기 위한 노력이 이루어졌다. 이러한 균열의 영향을 최소화하기 위해서는 먼저 발생한 정확한 균열을 측정할 필요가 있으며 지속적인 관리를 통해 균열 변화에 대한 데이터를 수집하고 저장해야 한다. 그러나 대부분의 균열 측정은 검사원의 육안 검사로 수동으로 수행되기 때문에 측정뿐만 아니라 많은 시간과 인력이 데이터를 처리해야 하며 검사원의 주관성이 개입 될 수밖에 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해 많은 연구자들이 이미지 프로세싱 기술을 적용하고 있는데, 이미지 프로세싱을 이용한 균열 측정 기술은 컴퓨터가 자동으로 균열을 인식하는 감지 방법과 감지된 균열의 특성 (폭, 길이 및 방향)을 계산하는 분석 기술로 구분할 수 있다. 전자의 경우, 콘크리트 궤도에서 발생하는 균열의 모양이 무작위이기 때문에 수학적 모델링이 어려우며, 콘크리트 구조물은 시공 직후 외부 환경에 노출되므로 균열을 완전히 감지하는 방법론은 한국에는 널리 알려져 있지 않다.

곡선형과 가늘고 긴 구조의 균열을 검출하는 것은 수많은 분야에 적용이 가능하기 때문에 이미지 처리에서 중요하다. 선행 논문들에서는 커브 구조 검출에 대한 다양한 접근법이 제안되었지만 최근 설문 조사가 [1]에 발표되었다. 기존의 방법론은 파라메트릭 방법에서부터 필터링 기술, 영역 설정, 포인트 프로세스 및 기계 학습 기반 방법에 이르기까지 다양하다.

예를 들어, Hough 변환은 입력 이미지를 선 또는 원형 객체를 감지 할 수 있는 매개 변수 공간으로 변환하는 방식이다. 그것은 관심 패턴의 수학적 모델이 필요하다. 선, 원 및 Y- 접점과 같은 서로 다른 길쭉한 구조는 이미지를 관심있는 패턴을 구별 할 수 있는 특정 매개 변수 공간으로 변환하기 위한 다른 수학적 모델을 필요로 한다.[2]

필터 기법을 기반으로 한 접근법은 다중 스케일 분석에서 국부 유도체를 사용하거나 2차원 가우시안 커널을 사용하여 길쭉한 구조의 프로파일을 모델링 한다 [3]. 라인의 너비 길이 및 방향에 대한 다중 스케일 정보를 고려한 영역 확장은 [4]에서 제안되었다. [5]에서, 수학적 형태학 및 추적 기법은 관심 있는 회선 네트워크에 대한 선형적 정보와 결합되었다. 이 방법들은 직관적이지만 흥미 있는 패턴에 대한 선형적인 구조 정보를 필요로 한다.

높은 계산 복잡성에도 불구하고, 특히 공공 이미지에서, 혹은 도로 및 강 탐지 응용 분야에서 이미지의 라인 네트워크를 탐지하기 위한 포인트 및 객체 프로세스가 제안 되었다. 이 그룹의 방법은 복잡한 수학적 모델의 시뮬레이션을 통해 길쭉한 구조를 추적하는 것을 기반으로 한다. [6]에서, 라인 네트워크는 객체 프로세스에 의해 재구성되는 일련의 상호 작용하는 라인 세그먼트로 간주된다. Gibbs 모델과 Monte Carlo 시뮬레이션에 기반한 포인트 프로세스는 각각 [7]과 [8]에서 소개되었다.

[9]와 [10]에서, 포인트 프로세스는 세분화의 정확성을 향상시키기 위해 그래프 기반의 표현과 분류와 결합되었다. 포인트 프로세스와 그래프 기반의 접근은 높은 계산 성능을 요구하므로 결과적으로 고해상도 이미지 적용 가능성이 감소한다. 마지막 그룹에서, 기계 학습 기술을 사용하는 방법이 있다. 그것들은 픽셀 단위의 특징 벡터의 구성과 픽셀이 길쭉한 구조의 일부인지 아닌지를 결정하기 위한 학습기 사용을 기반으로 한다. [11]에서, 멀티 스케일 가우시안 필터들의 응답은 k-NN와 결합하여 사용되지만 [12]에서 특징 벡터는 외곽선 검출기뱅크의 응답으로 구성되었다.

[13]에서, 멀티 스케일 가버 웨이블릿의 계수는 특징 벡터를 형성하고 베이저안 학습기를 훈련시키는데에 사용되었다. 최근 라인의 이미지 패치로 훈련된 CNN기법이 [14]에서 제안되었다.

이 논문에서는 Gabor Filter Bank 기법이 포함된 디지털 영상 처리 기술을 철도의 콘크리트 궤도의 고해상도 이미지를 수집하고 저장된 균열 데이터를 분석하는 자동 균열 검출 과정을 제시한다.[15]

이와 같은 지능형 영상감지 시스템은 사람이 판단해 왔던 부분을 시스템의 자동인식 및 판단 기능으로 대체하면 현장근무자의 업무부하를 저감하고 신속 정확한 상황판단과 의사결정지원에 도움이 될 수 있다.[16]

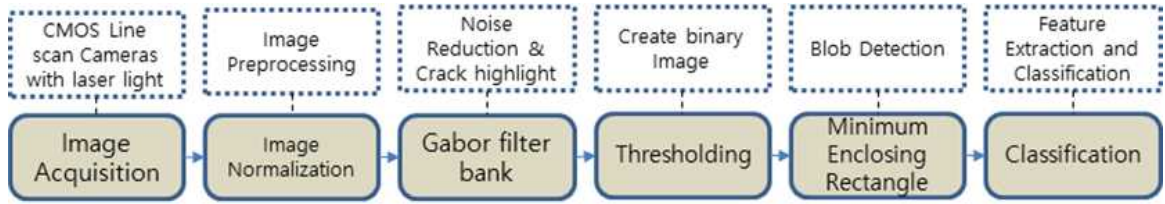


Fig. 1 Automatic crack detection process flowchart.

또한 본 논문에서 제안한 이미지 분석 방법에 대한 성능을 레이저 광 및 라인 스캔 카메라가 장착 된 이미지 획득 모듈을 열차에 설치하여 국내 철도 콘크리트 궤적을 취하여 시험을 통해 검증 하였다.

2. 균열 검출 시스템

2.1 이미지 취득

이 논문에서는 철도 콘크리트 궤도의 고해상도 이미지를 수집하고 Gabor Filter Bank 방법을 포함한 디지털 이미지 분석 기술을 사용하여 저장된 균열 데이터를 분석하는 자동 균열 검출 프로세스가 제안되었다. 또한 본 논문에서 제안한 이미지 분석 방법의 성능은 열차에 레이저 광 및 라인 스캔 카메라가 장착된 영상 획득 모듈을 설치하여 국내 철도 콘크리트 궤도를 취하는 실험을 통해 검증되었다.

이미지 취득을 위하여 철도산업에서 다양한 작업에 사용되는 모터카에 레이저 조명과 라인 스캔 카메라를 장착한 이미지 검출 모듈과 캡처된 이미지를 저장할 수 있는 데이터 스토리지 및 PC, 검측 차량의 속도 및 위치 검지를 위한 타코미터가 장착된 균열 검출 장비를 구축하여 실험에 사용하였다. 이미지 취득 모듈은 레이저 조명과 스캔 카메라가 탑재된 4개의 모듈로 구성되고, 각 모듈은 4096x4096로 1픽셀당 0.3mm의 크기를 가지는 이미지를 취득한다. 4개의 모듈은 상호 중복 구간을 촬영하였으며 통합 4,200mm 폭의 철도 콘크리트 궤도를 촬영 할 수 있도록 제작 되었다. 타코미터는 차축에 설치되었고, 검측 차량의 이동 속도 및 위치 데이터를 이미지 취득 모듈에 넘겨 PC상에서 취득 이미지의 위치 데이터를 연계하여 저장한다. 고품질, 고해상도로 취득된 이미지는 수량과 용량이 많아 오프라인으로 후처리된다.

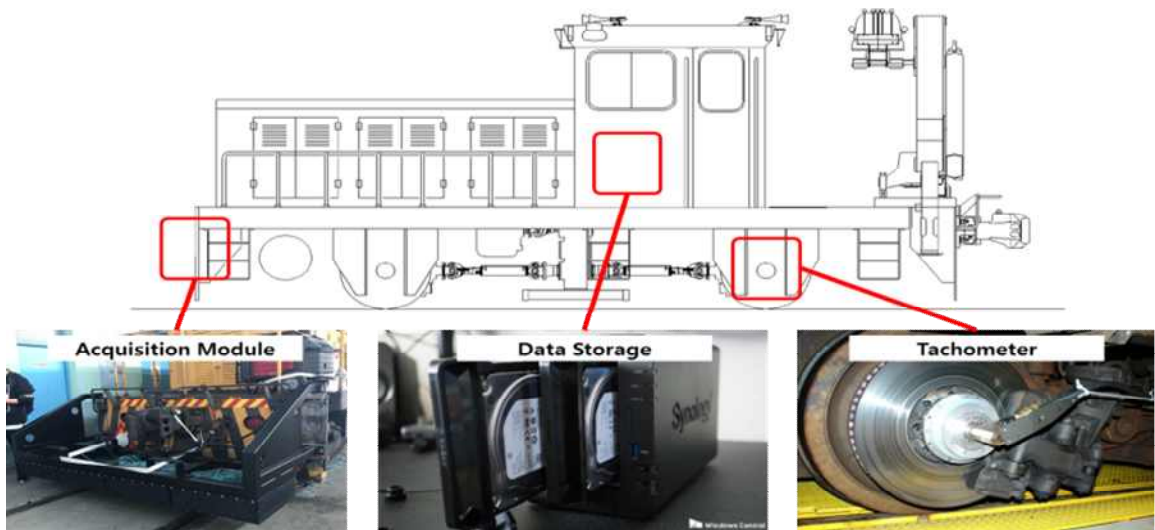


Fig. 2 Image acquisition system for capture a railway concrete track

2.2 균열 탐지 방법론

이 논문에서는 자동 균열 검출과 이미지 프로세싱 기술이 주로 다루어진다. 이미지 분석 과정은 이미지 취득 모듈의 레이저 조명과 라인 스캔 카메라를 이용하여 취득한 이미지를 전처리하는 첫 번째 단계와 균열을 검출하는 두 번째 단계, 마지막으로 균열 및 구조물을 분류하는 단계로 이루어 진다.

- 전처리 단계

일반적으로 이미지 프로세싱은 GrayScale 이미지를 사용하여 컬러 이미지를 GrayScale 이미지로 변경하는 과정이 들어가 지만, 본 논문의 방법은 가시광선의 조명을 사용하지 않으므로 GrayScale 변환을 거치지 않고 정규화 과정만을 거치게 된다.

- 균열 검출 단계

정규화 과정을 거친 후 Gabor Filter Bank를 사용하여 노이즈를 제거 및 외곽선을 검출하여 균열을 검출 하게 되는데, Gabor filter는 사인 함수로 모듈레이션된 가우시안 필터라고 할 수 있으며, 본 논문상에서는 여러 개의 Gabor filter를 사용하여 철도 노면상의 구조물과 노면의 균열 영역을 효과적으로 분리 할 수 있다.

$$g(x, y; \lambda, \theta, \Psi, \sigma, \gamma) = \exp\left(\frac{-x'^2 + \gamma^2 y'^2}{2\sigma^2}\right) \cos\left(2\pi \frac{x'}{\lambda} + \Psi\right) \quad (1)$$

σ : 필터의 크기

θ : 방향

Ψ : 중심으로부터의 필터 이동값(Radian)

λ : 사인 함수 값으로 주변값의 더하기/빼기의 반복을 설정.

γ : 이 논문에서 다양한 Gabor필터를 사용하여 분리된 가로/세로 비율

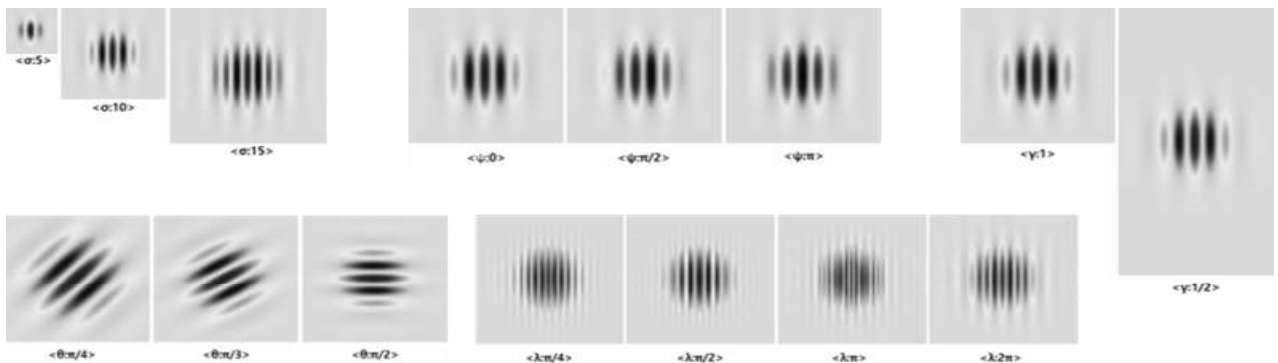


Fig. 3 Gaussian filters factor from Gabor Filter Bank

Gabor Filter Bank를 이용한 균열 검출 이후 이진화 이미지를 생성하여 이진화 이미지 상의 강조된 균열을 Blob단위로 검출하게 되는데 이 Blob을 생성 하는 방법은 MER (Minimum Enclosing Rectangle)방법론을 따른다.

이 논문에서 우리는 철도 콘크리트 궤도의 균열을 찾기 위한 방법으로 MER개념을 사용하고 있다. 여기에는, 두 단계가 포함된다. 첫 번째는, 분할 알고리즘을 적용하여 토폴로지 근처의 균열 모양을 클러스터로 나눈다. 두 번째 단계는 최소 크기의 직사각형 상자를 사용하여 클러스터 그룹을 포함하는 영역을 생성 한다. 각 사각형 단위 및 좌표는 획득한 이미지의 픽셀을 기반으로 한다. 정확한 균열 분류에서, 이미지의 좌표는 균열의 상대적 위치를 결정하는데 중요하다.

- 특성 분류 단계

전 단계에서 MER방식으로 분류된 Blob은 픽셀의 연결성 분석을 통하여 균열의 폭, 길이, 타입등을 분류하게 되며 사용자 분류에 따라 Blob의 속성을 추출 하게 된다.

3. 실험 결과

3.1 검증 방법

본 논문에서 제안된 방법을 바탕으로 개발된 자동 균열 검출 과정은 실험을 통하여 취득된 이미지를 Gabor Filter Bank 기법으로 전처리 후 균열 탐지를 수행 하였다. 본 연구를 통하여 개발된 자동 콘크리트 균열 분석 시스템 (ACTCAS: Automatic Concrete Track Crack Analysis System)은 Fig. 4와 같다.

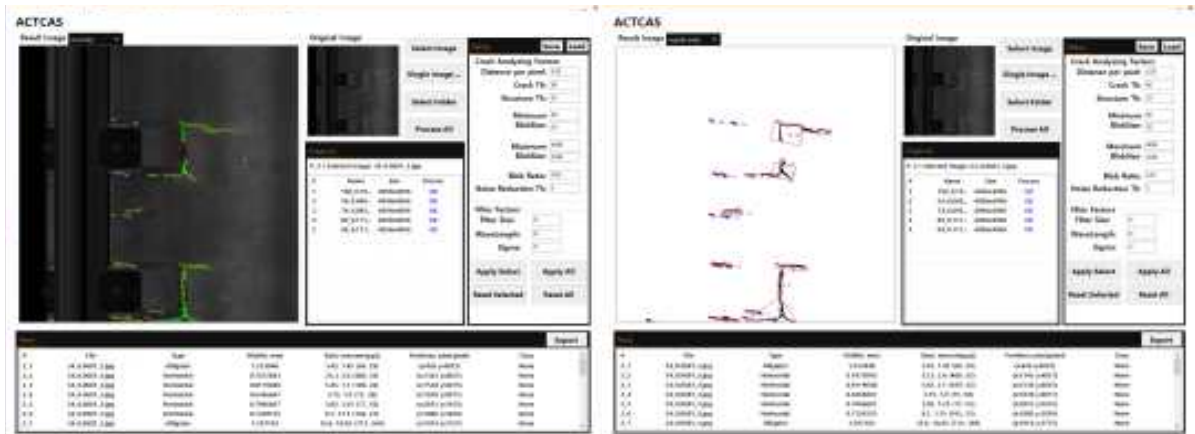
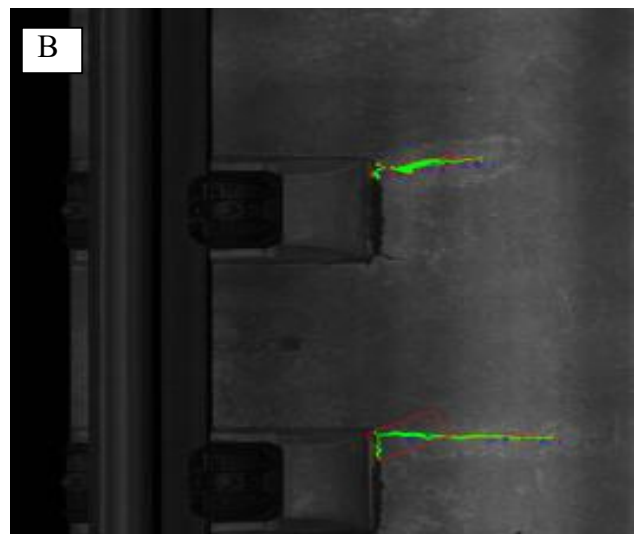


Fig. 4 ACTCAS Program for capture a railway concrete track

Fig. 5의 A,C는 실험을 통한 철도 콘크리트 궤도 주변의 퍼지는 균열 이미지를 보여 준다. ACTCAS프로세스에서 얻은 결과는 Fig. 5의 B, D에 나와 있으며, 본 논문에서 제시한 자동 균열 검출 과정에서 균열의 탐지율을 평가하기 위해 임의로 획득한 영상을 선택하여 검출하였다.



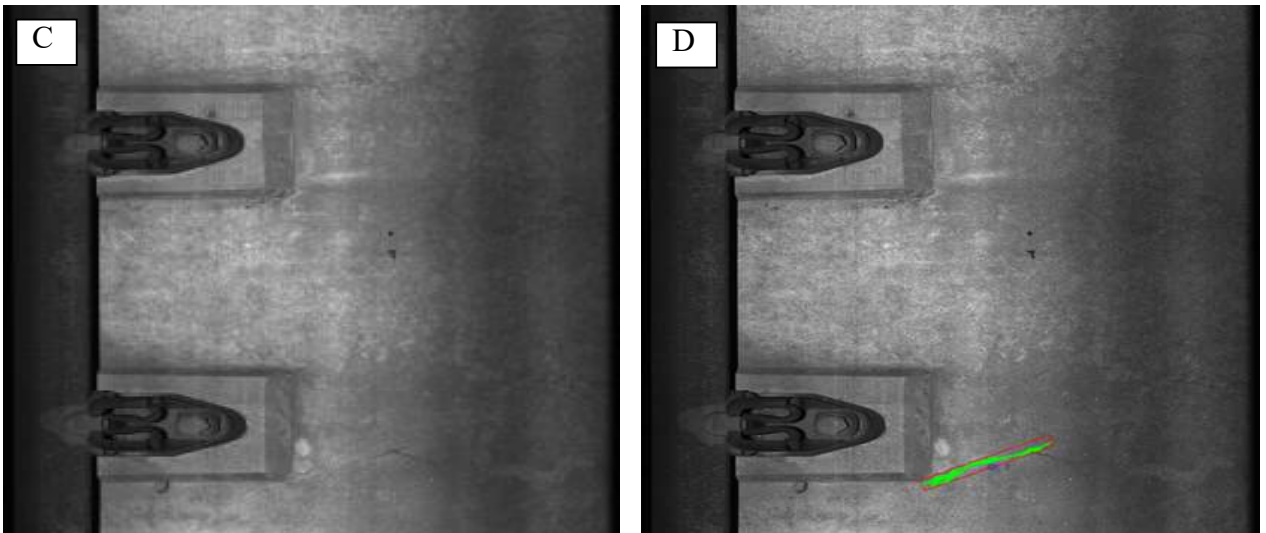


Fig. 5 Experimental results from the proposed automatic crack detection process
(A, Case01 - Original; B, Case01 - Result; C, Case02 - Original; D, Case02 - Result)

또한 해당 모듈은 한국 고속철도의 콘크리트 선로에서 고속으로 이미지를 취득할 수 있도록 개발된 레이저 조명과 라인 스캔 카메라를 장착한 이미지 취득 모듈로 촬영 시 주/야간에 상관없이 고 품질의 이미지를 취득 할 수 있었다.

3.2 검측 확인

이미지 분석을 통한 결과 균열 이미지의 경우 Ground Truth를 통하여 픽셀 기반으로 명확하게 정의 될 수 있다. 실제 현장에서의 균열 데이터는 더욱 주관적인 분석이 이루어지며 정확한 데이터를 보장하는 것은 거의 불가능 하다. 그래서, 가장 좋은 방법은 가능한 신뢰할 만한 기준을 얻는 것이다. 참고 문헌 중 PGT방법은 4명의 전문가에 의해 취득한 이미지를 수동으로 분석한 결과를 바탕으로 정의한다.

우리가 사용한 이미지 탐지 및 분석 프로그램을 통해 파생된 Blob단위의 결과는 적용된 알고리즘의 임계 값을 기반으로 잘못된 탐지비율 및 분석 정확도를 가질 수 있다. 이 경우 잘못된 추정 결과를 수동으로 제거하거나 분류 할 수 있으며 이러한 반 자동 분석 절차는 매우 빠르고 신뢰할 수 있다. 다음의 4가지 값은 균열 검측 결과를 Ground Truth와 PGT와 비교, 요약 하였다.

- True Positive(TP) : 올바르게 검출된 균열픽셀,
- False Positive (FP) : 잘못 검출된 균열 픽셀
- False Negatives(FN) : 검출중 누락된 균열 픽셀
- True Negatives (TN) : 올바르게 감지된 배경 픽셀 (비균열) [15]

정밀도 지수 : 균열을 잘못 검출한 비율.

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \tag{2}$$

감도 지수 : 탐지되지 않은 균열의 비율.

$$S = \frac{TP}{TP + FN} \tag{3}$$

DICE유사도 : 정밀도와 감도의 조화 평균.

$$DSC = \frac{2TP}{2TP + FP + FN} \quad (4)$$

이 논문에서 제시된 자동 균열 검출 공정의 성능 평가에 대한 검토 결과는 다음 Table 1.과 같다.

Table 1. Results of evaluation of the automatic crack detection process

테스트	균열 검출 결과				
	Present	n	Absent	n	총
Positive	True Positive(TP)	1857	False Positive(FP)	121	1978
Negative	False Negative(FN)	15	True Negative(TN)	7	22
Presision(P)	0.9388(94%)				
민감도(S)	0.9919(99%)				
DICE 유사 계수(DSC)	0.9666(97%)				

4. 결론

본 연구를 통하여 개발된 자동 균열 검출 시스템에서 제안된 Gabor Filter Bank 이미지 처리 기법은 Gaussian 함수와 Furier 함수의 구성된 비직교 함수로 수집된 이미지의 픽셀에 적용하여 콘크리트 상의 균열의 국부적인 특성을 분석하는데 용이한 것을 확인 할 수 있었다. 특히 취득 이미지가 가지는 균열부 픽셀의 방향이나 주파수와 관련된 특징을 찾아낼 뿐 아니라 특징을 보이는 픽셀의 방향과 주파수에 대하여 Gabor Filter의 집합인 Gabor bank를 구성하여 적용할 수 있다. 즉, 기존의 이미지 분석 방법에서 사용되어온 알고리즘들은 이미지에 적합한 Filter를 사용자가 Factor 값을 수정하여 분석에 적합한 설정값 셋팅이 중요한 문제로 거론되어 왔다. 하지만, 본 논문에서 적용된 Gabor Filter Bank 기법은 입력된 이미지의 특성을 일정부분 분석하여 적용할 Filter 그룹을 형성함으로써 사용자가 설정해야 하는 Factor의 개수와 빈도를 크게 줄일 수 있었다. 균열 검출 역시 철도 콘크리트 도상 이미지를 취득하여 분석한 결과 균열과 균열이 없는 콘크리트면을 구분하여 검출함에 있어 만족할 만한 분석 결과를 얻을 수 있었다.

결과적으로, Gabor Filter Bank를 사용한 균열 검출법은 한국 철도의 콘크리트 궤도 도상에 노이즈를 포함한 균열 이미지에 효과적으로 분석되는 것을 확인 할 수 있었다. (감지 비율 94%, 콘크리트 도상이미지 데이터 사용.)

본 연구에서, 제안된 프로세스는 철도의 콘크리트 궤도에서 무작위로 선택된 2000개의 실제 이미지에서 균열을 감지하여 Ground Truth를 통해 탐지된 Blob들이 실제 균열과 일치함을 확인할 수 있었다. 일반적인 프로세스는 검출 후 후속 작업을 통해 비균열을 분류해야 하며 하나의 동일한 팩터를 사용하여 모든 이미지를 탐지하는 것은 어려우나, 본 연구에서 제안된 방법으로 취득된 이미지에서 균열을 검출을 수행할시에는 동일한 팩터 설정값에서 더 높은 검출성능을 낼 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

이와 같은 시스템은 국내 철도산업에서 기존의 인력중심에서 자동화된 시스템을 통한 유지보수 체계를 확립할 수 있을 것으로 기대되는 기술로 인력 검출에서 발생할 수 있는 주관적인 검출 결과, 과도한 비용을 해결 할 수 있다. 이러한 이미지 분석 기술은 철도산업 뿐 아니라 콘크리트 구조물이 사용된 다양한 산업에 적용 될 수 있는 기술로써 향후 실제균열 검출 결과와의 비교를 통하여 신뢰성을 확보하여 해당 분야에 적합한 비파괴검사 시스템으로 구축될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 18RTRP-B113566-03).

References

- [1] Bibiloni, P., González-Hidalgo, M., Massanet, S. (2016). "A survey on curvilinear object segmentation in multiple applications. *Pattern Recognition*", 60, 949 - 970.
- [2] Frangi, A.F., Niessen, W.J., Vincken, K.L., Viergever, M.A. (1998). "Multiscale vessel enhancement filtering. *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention.*" Springer, pp. 130 - 137.
- [3] Hoover, A., Kouznetsova, V., Goldbaum, M. (2000). "Locating blood vessels in retinal images by piecewise threshold probing of a matched filter response." *IEEE Transactions on Medical imaging*, 19, 203 - 210.
- [4] Martinez-Perez, M.E., Hughes, A.D., Thom, S.A., Bharath, A.A., Parker, K.H. (2007). "Segmentation of blood vessels from red-free and fluorescein retinal images." *Medical image analysis*, 11, 47 - 61.
- [5] Mendonca, A.M., Campilho, A. (2006). "Segmentation of retinal blood vessels by combining the detection of enterlines and morphological reconstruction." *IEEE transactions on medical imaging*, 25, 1200 - 1213.
- [6] Lacoste, C., Descombes, X., Zerubia, J. (2005). "Point processes for unsupervised line network extraction in remote sensing." *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 27, 1568 - 1579.
- [7] Lafarge, F., Descombes, X., others. (2010). "Geometric feature extraction by a multimarked point process." *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 32, 1597 - 1609.
- [8] Verdié, Y., Lafarge, F. (2012). "Efficient Monte Carlo sampler for detecting parametric objects in large scenes." *Computer Vision - ECCV*, pp. 539 - 552.
- [9] Chai, D., Forstner, W., Lafarge, F. (2013). "Recovering line-networks in images by junction-point processes." *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1894 - 1901.
- [10] Türetken, E., Benmansour, F., Andres, B., Głowacki, P., Pfister, H., Fua, P. (2016). "Reconstructing curvilinear networks using path classifiers and integer programming." *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 38, 2515 - 2530.
- [11] Niemeijer, M., Staal, J., van Ginneken, B., Loog, M., Abramoff, M.D., others. (2004). "Comparative study of retinal vessel segmentation methods on a new publicly available database." *SPIE medical imaging. SPIE*, Vol. 5370, pp. 648 - 656.
- [12] Staal, J., Abramoff, M.D., Niemeijer, M., Viergever, M.A., Van Ginneken, B. (2004). "Ridge-based vessel segmentation in color images of the retina." *IEEE transactions on medical imaging*, 23, 501 - 509.
- [13] Soares, J.V., Leandro, J.J., Cesar, R.M., Jelinek, H.F., Cree, M.J. (2006) "Retinal vessel segmentation using the 2-D Gabor wavelet and supervised classification." *IEEE Transactions on medical Imaging*, 25, 1214 - 1222.
- [14] Liskowski, P., Krawiec, K. (2016). "Segmenting Retinal Blood Vessels With Deep Neural Networks." *IEEE transactions on medical imaging*, 35, 2369 - 2380.
- [15] Rabih, A., Sylvie, C., Jérôme, I. (2016). "Automatic Crack Detection on Two-Dimensional Pavement Images: An Algorithm Based on Minimal Path Selection." *IEEE transactions on intelligent transportation Systems*, vol.17, 2718 - 2729
- [16] SangWan Hong, YoungJin Park., HaCheol Lee. (2014). "Experimental and Analytical Study on the Water Level Detection and Early Warning System with Intelligent CCTV" *KOSDI Journal of the Korea Society of Disaster Information*, vol.10, pp. 105-115