진공흡착방식 기반의 벽면 이동로봇을 위한 자동 균열검출 프로세스에 관한 연구

박재민*, 신동호*, 김현섭*, 김형훈**, 김상훈*
*한경대학교 전기전자제어공학과
**삼성전자
e-mail : kimsh@hknu.ac.kr

A Study on Automatic Crack Detection Process for Wall-Climbing Robot based on Vacuum Absorption Method

Jae-Min Park*, Dong-Ho Shin*, Hyun-Seop Kim*, Hyung-Hoon Kim**, Sang-Hoon Kim*
*Dept of Electrical, Electronic and Control Engineering, Hankyong National University
**Samsung Electronics Co., Ltd

요 약

본 논문은 진공을 이용한 흡착방식과 바퀴형 이동방식을 사용하는 벽면 이동로봇의 구성과 로봇 내부에서의 균열검출 및 처리 프로세스에 관한 연구이다. 임베디드 시스템에서 기계학습을 이용한 균열검출을 구현하기 위해 YOLO v3를 수정하여 구동하였으며, 검출된 균열의 영상을 저장하고 위치 정보를 추정하였다. 또한, 균열 정보를 수집하기 위해 고정 IP를 갖는 서버를 구축하고 각 기기 간의 효율적인 통신 네트워크를 구성하였다. 본 기술은 균열검출 작업뿐만 아니라 보수작업에도 활용될 수 있어, 대형 구조물과 건축물 등의 안전진단뿐만 아니라 안전성 향상에 이바지할 수 있을 것으로 예상한다.

1. 서론

과거뿐 아니라 현재에도 대부분 벽면의 균열을 탐지하고 보수하는 작업이 사람에 의해 직접 수행되고 있지만, 검사 및 보수작업에서 위험성이 따르고 효율성이 부족하다. 이러한 위험성과 효율성 문제를 해결하기 위하여 로봇을 이용한 균열감지 기법에 관한 많은 연구가 이루어지고 있으며, 그중 UAV(드론)를 이용한 균열감지 기법[1-3]에 관한 연구가 가장 활발하다. 그러나 UAV 자체의 위험성으로 인해 벽에 근접하여 촬영할 수 없으므로 미세균열 검출에 있어 불리하고 보수작업이 불가능하다는 단점이 존재한다. 실제로 드론에 대한 사고 위험성을 다룬 기사들이 다수 존재하며, 이는 사회적으로도 논란이 되고 있다. 드론보다는 안전성에서 유리한 지상 로봇을 이용한 연구[4]도 있었지만, 벽면 높이에 따른 한계와 대형구조물과 해저에 기반을 둔 구조물에선 구동할 수 없다는 단점이 있다.

위와 같은 단점을 해결하기 위해 본 논문에서는 벽면 이동로봇에 GPU가 탑재된 임베디드 보드(Jetson TX2)를 추가하여 기계학습을 통해 로봇 내부에서 균열을 검출하고 이를 처리하는 전체적인 프로세스를 연구하였다. 벽면 이동로봇을 이용할 경우, 벽면에 부착하여 이동하기 때문에 미세균열 검출에 대한 위험성이 없고 실내와 교량 등에서도 구동할 수 있어 효율이 높다. 또한, 기압 센서를 통해 Chamber 내부의 압력을 측정하여 배터리 부족이나 모터과열로 인한 위험 상황 등에 대해 지능적으로 대처할 수 있으며, 기존 진공 흡착방식[5-7]을 개선하여 사용함으로써 여러 재질의 벽면에서 구동할 수 있고 균열보수 장치의 탑재도 가능하다.

특히, Jetson TX2를 이용함으로써 기계학습을 로봇 내에서 구동하고 나아가, 균열과 이의 위치를 검출하는 전반적인 구동 프로세스에 관해 연구하고 구현하였다. 기계학습을 이용하여 균열검출을 진행함에 따라, 기존의 균열검출 방법인 Sobel과 Canny 엣지 검출 방법[8]에 비해 벽면 재질 및 조도에 상대적으로 영향을 덜 받고 검출 정확도 등의 여러 성능 면에서도 우수한 결과를 보임을 증명하였다. 또한, 로봇 내부의 MCU와 Jetson TX2와의 시리얼 통신, Jetson TX2와 안드로이드 애플리케이션과 무선 TCP/IP 통신으로 구성된 통신 네트워크를 고정 IP 서버를 중심으로 구현함으로써 균열검출 후 균열 정보에 대한 데이터 통신이 효율적이고 체계적으로 이루어지도록 구성하였다.

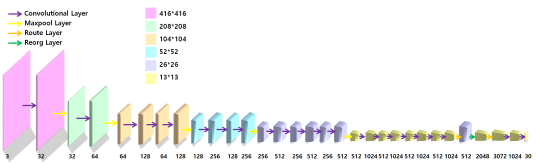
2. 하드웨어 구성

로봇은 고성능 Embedded Software Platform인 Jetson

TX2를 이용하여 머신러닝을 별도의 외부 기기를 통해 구현하지 않고 로봇 내에서 구현한다. 또한, Jetson TX2는 MCU와는 시리얼 통신, 안드로이드 애플리케이션과는 TCP/IP 통신으로 데이터를 주고받도록 통신 프로세스가 구성되어 있다. MCU는 센서를 이용한 모터 제어를 통해 장애물 회피를 기반으로 한 자율주행, 효율적인 전력 소비를 구현한다. 또한 로봇은 진공흡착 메커니즘을 기반으로 벽면에 부착하여 이동하게 되며 Rotor Package를 두 개의 Bowl을 이용하여 설계하면 흡입한 바람이 벽과 반대 방향으로 배출되면서 추력이 발생하게 되기 때문에 적재 하중에 더 유리하다. 이를 이용해 균열보수 장치와 같은 추가적인 부품 탑재도 가능하다.

3. 소프트웨어 구성

기계학습 도구는 YOLO v3[9]를 사용했으며 로봇 내부에서 기계학습을 구동하기 위해 기존 106개의 Layer로 구성된 특징추출 알고리즘을 (그림 1)과 같이 30개의 Layer로 간소화하였다.

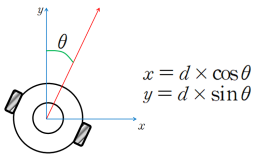


(그림 1) Feature Extraction Layer Configuration

검출된 균열은 현재 시각을 파일명으로 하여 JPEG 형식으로 저장되게 구성하였으며 모든 검출 과정은 AVI 형식의 동영상 파일로 저장되게 하였다.

균열의 위치는 로봇의 상대적인 현재 위치를 기반으로 추정하고 로봇의 위치는 홀센서[10]와 IMU[11]를 이용해 추측항법을 기반으로 추정한다. 로봇에 사용하는 엔코더 모터의 감쇠비가 ζ, 엔코더 기어비가 g, r을 바퀴의 반지름, p를 Pulse의 상승 엣지를 검출한 횟수라고 했을 때 로봇의 이동 거리(Distance)는 식(1)로 표현되고 IMU에서 측정한 로봇의 각도(θ)와 로봇의 이동 거리를 (그림 2)를 이용해 계산한다.

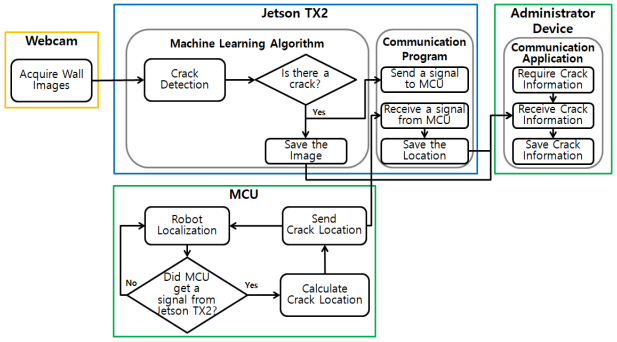
$$Distance = 2\pi r \frac{p}{\frac{1}{\zeta} \times \frac{1}{g} \times 2 \times 2} \qquad (1)$$



(그림 2) Two Dimensions Localization

균열이 검출됨과 동시에 균열 사진 파일이 저장됨을 이용하여 해당 시점에 UART 통신을 이용하여 MCU에게 균열의 위치를 요청하는 신호를 보내도록 구성하였다. 균열의 위치가 담긴 데이터를 받은 Jetson TX2는 간단한 오류 검사 후에 현재 시각을 파일명으로 하여 TXT 형식으로 위치를 저장한다.

위 방법으로 저장된 균열의 사진과 위치는 안드로이드로 애플리케이션으로부터 전송 요청이 오면 자동으로 전송되도록 프로세스를 구성하였다. (그림 3)은 균열검출 프로세스의 전반적인 흐름도이다.



(그림 3) Crack Detection Process

4. 실험 및 분석

로봇 내부에서 기계학습을 구현하기 위해 GPU를 탑재한 Jetson TX2를 사용하였으며 부피 및 무게의 적합성을 고려해 기존 Develop Board 대신 Connect Tech사에서 제공하는 Orbitty Carrier Board를 사용하였다.

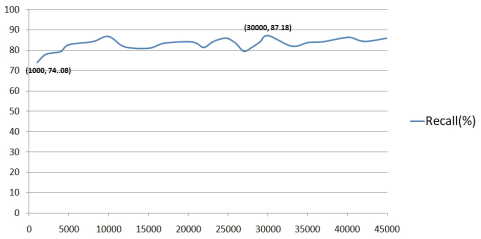
본 논문에서 학습에 사용된 Dataset은 <표 1>과 같이 인터넷에서 수집한 이미지들[12-13]과 일부 연구자가 위치한 건물들에 발생한 균열들을 직접 촬영한 사진으로 구성되어 있다.

<표 1> Dataset Configuration

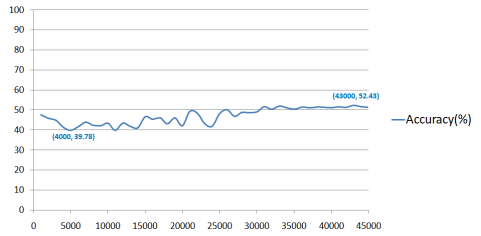
Classification		Number of Images
Crack	Training image	11,548
	Test image	156
Intact (Non-crack)	Training image	48,633
	Test image	75

균열검출과 같이 객체를 빠뜨리지 않고 검출하는 것이 중요한 알고리즘은 Recall이 주요 성능지표가 될 수 있다. 따라서 Testset을 성능분석에 이용하여 (그림 4)과 같이 Epoch에 대한 Recall을 분석하였고 (그림 5)로 Accuracy

를 분석 결과를 나타내었다.



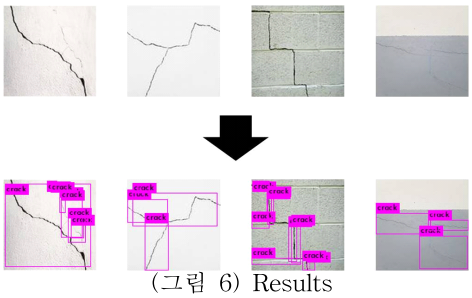
(그림 4) Recall Analysis



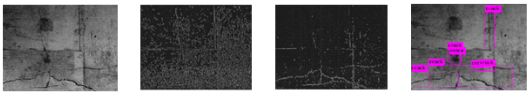
(그림 5) Accuracy Analysis

평균 Recall 값은 77.5%였고 30,000 Epoch에서 87.18%로 가장 큰 값을 보였다. 평균 Accuracy는 51.6%로 43,000 Epoch에서 52.43%로 가장 높은 수치를 나타내었다.

아래 (그림 6)은 정성적 평가를 통해 알아보기 위해 실제 균열 사진에 대한 검출 결과를 나타낸 그림이다. (그림 7)는 기존 영상처리 기법과의 비교를 위해 품질이 좋지 않은 이미지를 입력으로 했을 때의 결과를 나타낸 그림이다.

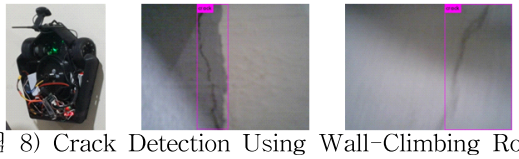


(그림 6) Results



(그림 7) Performance Comparison with Traditional Edge Detection

균열검출 프로세스를 시험해보기 위해 로봇을 별도의 조작 없이 작동하도록 구성하고 벽면을 검사한 후, 폴더의 저장된 이미지를 관리자 기기로 전송받았다. (그림 8)은 실제 로봇의 작동 사진과 안드로이드로 전송받은 이미지이다.



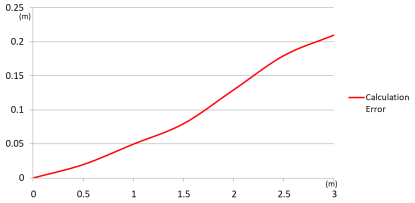
(그림 8) Crack Detection Using Wall-Climbing Robot

(그림 8)과 같이 영상이 흔들릴 때도 균열검출이 가능했으며 관리자 기기로 원활하게 전송되었다. 균열이 검출된 모든 프레임은 JPEG 형식으로 저장되었고 미세한 균열도 검출할 수 있었다.

균열의 위치는 로봇에 반지름이 45mm인 바퀴와 엔코더 기어비 1/13, 감쇠비 1/150인 엔코더 모터를 장착하고 실험하였다. <표 2>는 4.1절의 이론을 이용하여 0.5m마다 이동 거리를 계산했을 때의 결과이고 (그림 9)는 이동 거리(x축)에 따른 계산 오차(y축)를 나타낸 그래프이다.

<표 2> Distance Calculation Result

Measured Travel Distance	Calculated Travel Distance
0.5m	0.52m
1.0m	1.04m
1.5m	1.58m
2.0m	2.13m
2.5m	2.68m
3.0m	3.21m



(그림 9) Distance - Error Graph

실험결과, 이동 거리가 멀어질수록 오차가 누적되므로 점점 증가하는 모습을 보였고 0.5m당 약 0.03m 정도의 오차가 누적되며 오차 누적은 선형에 가까운 관계를 보였다.

5. 결론 및 향후 연구

실험을 통해, 수정된 YOLO 알고리즘은 실제 구동에서 다소 많은 균열 객체를 검출해 내긴 했지만, 검출하지 못한 균열은 없었다. 나아가 기존의 영상처리 기법을 이용한 Sobel, Canny 엣지 검출 기법보다 오검출률이 각각 80%, 20% 이상 개선되어 확연하게 우수한 성능을 보였다(그림 9). 또한, 별도의 클라우드 서비스나 서버를 이용하지 않고 로봇 내부에서 기계학습을 이용한 균열검출 알고리즘을 구동할 수 있음을 증명하였다. 나아가, 벽면 이동 로봇을 이용한 균열검출 알고리즘을 이용해 육안으로 잘 확인할 수 없는 균열까지 검출할 수 있다는 것을 확인하고 그 성능을 (그림 8) 등에 제시하였다.

균열검출의 완성도를 높이기 위해서는 비전에만 의존한 검출 알고리즘뿐만 아니라, 초음파 센서와 같은 다른 보조적인 장치 등을 함께 이용[14]하여 구조물의 내부 균열과 기계학습으로 검출하지 못한 균열까지도 효과적으로 검출하도록 구성하는 것이 향후의 연구로써 필요하다.

균열 위치추정은 면적이 작은 벽면의 경우, 오차가 크지 않아 허용될 수 있지만, 넓은 벽면을 검사할 때는 오차가 더욱 심해짐을 알 수 있으며 Beacon[15]이나 Wifi 신호[16]와 같은 부가 설치물을 사용함으로써 해결할 수 있다.

참고문헌

[1] Jong-Woo Kim, Sung-Bae Kim, Jeong-Cheon Park, Jin-Won Nam, "Development of Crack Detection System with Unmanned Aerial Vehicles and Digital Image Processing", The 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics(ASEM15), 2015.

[2] Tae-Jin Yun, Jin-Woo Jeon, Byung-Yoon Ko, Hyun-Koo Woo, "Crack detection system for exterior wall in a drone camera image using YOLO deep learning technique", Proceedings of the Korean Society of Computer Information Conference, 27(1), pp.303-304, 2019.

[3] Kim Jong-Woo, Jung Young-Woo, Rhim Hong-Chul, "Study on Structure Visual Inspection Technology using Drones and Image Analysis Techniques", Journal of the Korea Institute of Building Construction, vol.17, pp.545-557, 2017.

[4] Sung-yul An, Jae-ho Jang, Chang-soo Han, and Pyung-hwa Kim , "An inspection system for detection of cracks on the concrete structures using a mobile robot", 21st InternationalSymposium onAutomation and Robotics inConstruction (ISARC), Korea: Jeju: 21-25., 2004.

[5] Young-Min Eun, Min-Seong Kim, Se-Yeop Oh, Seon-Woong Shin, Sang-Hoon Kim, "Intelligent Robot for Wall Climbing", Journal of Information and Control Symposium, Vol.2012, No.10, pp.442-443, 2012.

[6] William Morris, Jizhong Xiao, "City-Climber: Development of a Novel Wall-Climbing Robot", J Stud Res., 1, pp.40-45, 2008.

[7] Ig Mo Koo, Young Kouk Song, Hyungpil Moon, Sun Kyu Park, Hyouk Ryeol Choi, "Design and Control of Wall Climbing Robot Using Impeller", Journal of Intelligent & Robotic Systems, Vol.72, Issue.1, pp.57-72, 2010.

[8] Ikhlas Abdel-Qader, Osama Abudayyeh, Michael E. Kelly, "Analysis of Edge-Detection Techniques for Crack Identification in Bridges", Journal of Computing in Civil Engineering, 17.4, pp.255-263, 2003.

[9] Redmon, Joseph and Farhadi, Ali , "YOLOv3: An Incremental Improvement", arXiv preprint arXiv:1804.02767, 2018.

[10] Kim Kwan Seek, Won Chung Yeon, "Control Algorithm PMSM using Rectangular 2 Hall Sensors Compensated by Sensorless Control Method", 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. IEEE,

[11] Sebastian O. H. Madgwick, Andrew J. L. Harrison, Ravi Vaidyanathan, "Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm", 2011 IEEE international conference on rehabilitation robotics. IEEE, 2011.

[12] satyenrajpal, "crack_dataset.tar.gz" Available at: https://drive.google.com/file/d/1kC60RGO3rcScVk7HY-s7tTMJeMbADfh1/view (Accessed: 20 March 2019).

[13] Çağlar Fırat Özgenel, "Concrete Crack Images for Classification" Available at: http://dx.doi.org/10.17632/5y9wdsg2zt.1#file-c0d86f9f-852e-4d00-bf45-9a0e24e3b932 (Accessed:3 April 2019).

[14] Tae-Sik Kim, Dong-Ik Sin, Kyo-Hong Jin, Chi-Sub Jin, "Analysis of Crack in Concrete Structure Using Ultra-Sonic Technique", Journal of Research Institute of Industrial Technology, Vol.61, pp.55-62, 2002.

[15] Hyun Nam-gung, Il-Kwon Lim, Jae-Kwang Lee, "Location Estimation Method of Positioning System utilizing the iBeacon", Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, Vol.19, No.4, pp.925-932, 2015.

[16] Seon-Phil Kim, Namgi Kim, "Point-based Location Estimation using WiFi Signal", The Journal of Korean Institute of Information Technology, 10(1), pp.121-126 2012.

본 논문은 과학기술정보통신부 정보통신창의인재양성사업의 지원을 통해 수행한 ICT멘토링 프로젝트 결과물입니다.