

비전센서를 이용한 강교량 재도장 로봇의 주행 모니터링 모듈 개발

Development of a Monitoring Module for a Steel Bridge-repainting Robot Using a Vision Sensor

서명국^{1*} · 이호연¹ · 장동욱² · 장병하²

Myoung Kook Seo, Ho Yeon Lee, Dong Wook Jang and Byoung Ha Chang

Received: 10 Nov. 2021, Revised: 09 Dec. 2021, Accepted: 10 Dec. 2021

Key Words : Steel Bridges(강교량), Repainting(재도장), Mobile Robot(이동 로봇), Monitoring(모니터링)

Abstract: Recently, a re-painting robot was developed to semi-automatically conduct blasting work in bridge spaces to improve work productivity and worker safety. In this study, a vision sensor-based monitoring module was developed to automatically move the re-painting robot along the path. The monitoring module provides direction information to the robot by analyzing the boundary between the painting surface and the metal surface. To stably measure images in unstable environments, various techniques for improving image visibility were applied in this study. Then, the driving performance was verified in a similar environment.

1. 서 론

강교 재도장 작업은 블라스팅(blasting)을 통하여 강박스 거더(steelbox girder)의 노후된 도장층을 벗겨내고 다시 도장(painting)하는 공정으로, 강교량의 유지관리비에서 가장 많은 부분을 차지하는 작업이다.¹⁾

블라스팅과 도장은 강박스 거더의 옆면과 아랫면에서 진행되는데, 옆면과 달리 아랫면은 가설 작업대의 높이가 60cm 이내로 협소하여, 작업자가 누워서 작업을 해야 한다. 이 때문에 작업 효율이 낮고, 블라스팅 작업으로 발생하는 페인트와 철가루가 포함된 분진이 작업자의 건강에 악영향을 미친다.

최근 작업 생산성과 작업자의 안전성 향상을 위해 열악한 교량 공간에서 진행되는 블라스팅 작업을 반자동으로 수행이 가능한 재도장 로봇이 개발되고 있

다(Fig. 1).²⁾ 재도장 로봇은 거더 아랫면을 왕복 주행하면서 블라스팅 작업을 진행한다.

본 연구에서는 재도장 로봇이 설정한 경로에 따라 자동으로 이동하게 하는 비전센서 기반의 모니터링 모듈을 개발하였다. 모니터링 모듈은 도장면과 도장이 제거된 금속면의 경계를 기준으로 재도장 로봇의 이동 방향 정보를 제공한다.

한편, 블라스팅 작업환경은 협소하고, 분진이 발생하며, 거더 안쪽은 조명이 약하여 안정적으로 도장면 영상을 촬영하기 어렵다(Fig. 2). 본 연구에서는 불안정한 환경에서도 안정적으로 로봇 방향을 제공하기 위하여, 다양한 영상 가시성 향상 기술을 적용하였고, 실제 환경과 유사한 테스트벤치에서 성능을 검증하였다.

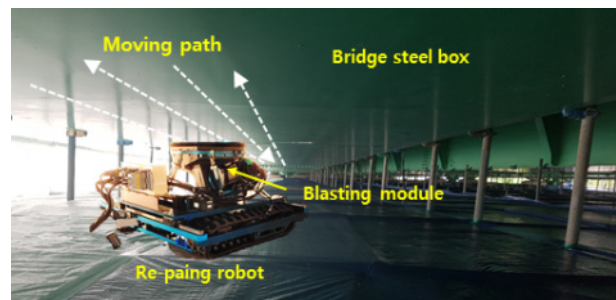


Fig. 1 Re-painting robot with a blasting module

* Corresponding author: seomk@koceti.re.kr

1 Smart Engineering Lab. Korea Constructions Equipment Technology Institute, Gunsan, Jeollabuk-do, 54004, Korea

2 Jire High Tech E&C

Copyright © 2022, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

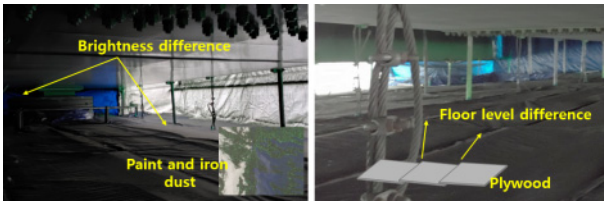


Fig. 2 Steel bridge and working environment

2. 강교 재도장 로봇

2.1 재도장 로봇의 구성과 기능

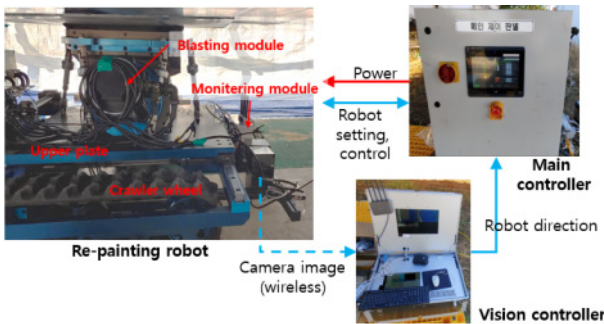


Fig. 3 Re-painting robot system

재도장 로봇은 도장로봇, 통합제어기, 비전센서제어기로 구성된다. 도장로봇은 가로길이 120cm, 세로 길이 140cm, 높이 60cm 크기이며, 두 개의 서보모터로 구동되는 크롤러 방식의 하부체와 블라스팅 모듈과 블라스팅 모듈을 좌우로 이동시키는 상부체로 구성된다. 블라스팅 모듈은 내부에 장착된 블레이드의 회전으로 직경 2mm의 쇠구슬을 도장면에 분사하여 도장층과 오염층을 제거한다.

도장로봇 전면에는 장착된 카메라 모듈은 무선영상수신기를 통해 도장면의 영상과 이동 경로 영상을 비전센서제어기에 전달한다. 통합제어기는 도장로봇에 전원을 제공하고, 로봇의 속도와 방향제어, 블라스팅 모듈의 좌우 이동 범위 및 속도 등 도장로봇의 작업조건을 설정하고 구동을 제어한다.

비전센서제어기는 도장로봇에 장착된 카메라로부터 무선으로 영상을 수신하고, 영상을 분석하여 로봇의 진행 방향과 정지 유무 정보를 통합제어기에 전달한다. 비전센서제어기와 통합제어기는 근거리에서 유선 시리얼 통신(RS232)으로 데이터를 송수신하고 있다.

2.2 작업진행 과정

재도장 로봇은 도장면과 금속면의 경계를 기준으

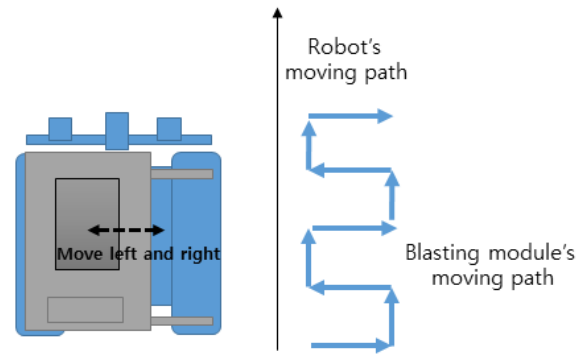


Fig. 4 Blasting module's working path

로 전진 이동하고, 블라스팅 모듈은 좌우로 이동하면서 도장층을 제거한다. 즉, Fig. 4와 같이 로봇이 앞으로 약 25cm 이동 후 정지하면, 블라스팅 모듈이 왼쪽 또는 오른쪽으로 35cm 이동한다. 결과적으로 블라스팅 모듈은 “ㄷ”자 형태로 작업을 진행하게 되며, 로봇이 시작점에서 끝점으로 이동했을 때 도장면의 블라스팅 폭은 35cm 가 된다.

한편, 거더 바닥은 다수 합판(plywood)으로 구성되어 있는데, Fig. 2와 같이 합판의 연결부분에서는 합판의 일부가 상하로 겹쳐져 있기 때문에 $\pm 3\text{cm}$ 안팎의 단차가 발생한다. 이러한 단차로 로봇의 이동 방향을 틀어지게 되는데, 비전센서 기반 모니터링 모듈은 도장면과 금속면을 기준으로 로봇이 이동하여 블라스팅 작업을 진행하도록 로봇 전진 방향을 보정한다.

3. 모니터링 모듈 개발

3.1 모니터링 모듈의 구성

모니터링 모듈은 로봇에 장착되는 비전센서부와 원격으로 영상을 처리하는 비전센서제어부로 구성된다. 무선 CCTV 시스템 개념을 활용하여, 비전센서부는 실외용 CCTV용 카메라 3대와 무선송신부로 구성되고, 제어부는 무선영상수신기, DVR, 제어용 PC로 구성된다.



Fig. 5 Vision sensor of the re-painting robot

비전센서부를 구성하는 카메라와 무선영상송수신기는 비전센서제어부와와의 50m 이상의 거리에서도 안정적으로 영상을 전송(전송지연, 끊김, 잡음 등이 최소화)하는 성능과 최소 측정 가능 거리, 크기 등을 종합적으로 고려하여 선정하였다. 최종적으로 무선영상송수신기는 4채널급 한화테크윈 SPW-110을 선정하였고, 카메라는 무선 영상 송수신기와 호환되고, 30cm 측정거리, 60도 가량의 화각을 제공하는 한화테크윈의 QNO-6022R1을 선정하였다.

카메라의 경우 무선영상송수신기와 호환 가능한 다른 제조사 카메라 제품을 적용해 보았지만, 세부 사양의 호환 문제로 20m이상의 거리부터는 영상에 계단 현상과 끊기는 현상이 발생하여 정확한 도장면과 금속면 경계 검출이 어려웠다.

무선영상수신기로 수신된 3대 카메라의 영상은 CCTV 모니터에 재생되는 동시에 모니터 화면과 동일한 영상은 HDMI 분배기와 HDMI to USB 컨버터를 통해 PC에 제공된다. 개발한 제어 프로그램에서는 영상에서 좌우 영상과 전방영상을 각각 분리하여 처리한다.

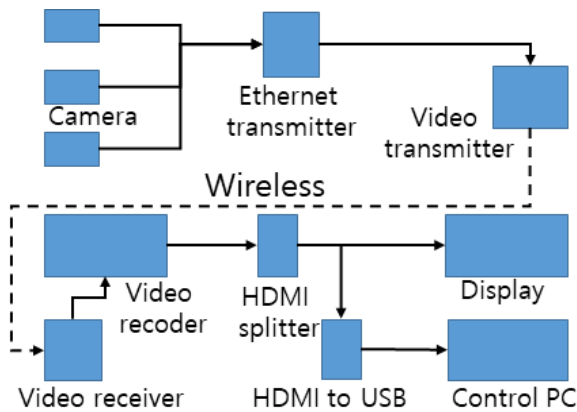


Fig. 6 Vision controller system

로봇의 왼쪽과 오른쪽에 장착된 카메라는 로봇이 작업영역을 왕복하는 과정에서 도장층의 경계를 획득하기 위한 것으로, 도장면을 향해 위 방향으로 장착된다. 좌우 카메라의 간격은 블라스팅 모듈의 최대 좌우 이동 위치에 해당한다.

중앙의 카메라는 전면을 향하고 있으며, 전진 이동 과정에서 장애물과 충돌을 방지하기 위해서 작업자에게 전방 영상을 제공한다.

3.2 카메라 방진 모듈

본 연구에서는 좁고 폐쇄적인 작업 환경에서 안정

적으로 작업면을 촬영하기 위해서 선행 연구²⁾의 저조도 환경 극복 기술³⁾, 빛 반사 제거 기술, 연무 극복 기술⁴⁾을 사용한다. 저조도 환경 극복 기술은 감마보정 알고리즘(식 1)을 기반으로 하고 있으며, 영상의 명도 보정 시 고휘도 영역(80% 이상)을 제외하고 나머지 영역의 평균 명도 값이 30%~70% 범위를 유지하도록 감마값(g)을 조정한다.

$$y = M \left(\frac{x}{M} \right)^g, M = 255 \tag{1}$$

거더 옆면으로부터 확산된 햇빛은 작업면에 반사광을 생성시킨다. 이러한 반사광은 편광 필름을 렌즈면에 부착하여 최소화하였다. 편광 필름은 일정 방향으로 진동하는 빛만을 통과시켜 반사광을 제거한다. 그리고 작업 공간에서 부유하는 먼지는 가시거리와 영상의 채도를 감소시킨다. 안개 제거 알고리즘은 안개(먼지) 농도가 높은 픽셀(dark pixel)이 높은 값으로 나온다는 사실을 기반을 두어 영상에서 대기 투과율(medium transmission)을 계산한 후 초기 영상에서 안개 영향을 분리하여 영상의 채도를 향상시킨다.

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1-t(x)) \tag{2}$$

여기서, x 는 이미지 픽셀의 위치, $J(x)$ 는 왜곡되기 이전 이미지, $I(x)$ 는 카메라 이미지, $t(x)$ 는 대기 투과율, A 는 대기 산란광(airlight)을 나타낸다.

한편, Fig. 2처럼 블라스팅 작업 과정에서 발생하는 철 및 페인트 가루 일부는 주변으로 튀어나와 좌우 카메라 렌즈 부분에 쌓이게 된다. 본 연구에서는 이러한 오염물이 카메라 렌즈 부위에 부착되는 것을 방지하고, 부착된 오염물을 제거하기 위해서 별도의 카메라 보호 모듈을 제작하였다(Fig. 7).

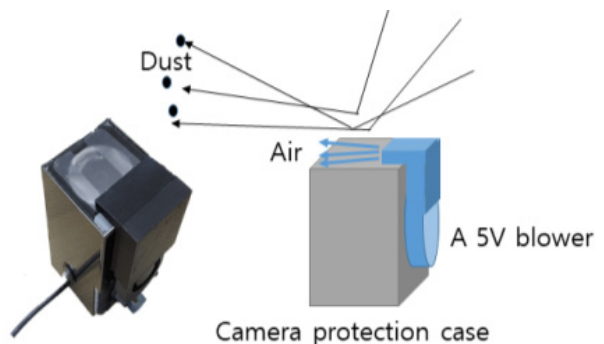


Fig. 7 Camera protection module

카메라 보호 모듈은 로봇의 무게 최소화를 위해 아크릴로 제작되었으며, 측면에 카본 필름으로 씌워 내구성을 향상시켰다. 카메라 렌즈 방향 면에는 흡집 방지 보호필름을 부착하여 철가루로부터의 잔 흡집이 발생하는 것을 방지하였고, 오염될 경우 바로 교체가 가능도록 하였다.

그리고 오염물이 카메라 렌즈 면에 쌓이거나, 부착되는 것을 방지하기 위해서 방진 모듈을 장착하였다. 5V급 소형 송풍기와 공기 분출기로 구성된 방진 모듈은 렌즈부위에 압축 공기를 분출한다.

방진 모듈의 이물질 제거 성능을 검증하기 위해 카메라 모듈을 위 방향으로 세우고, 렌즈 면에 커피가루와 모래가 섞인 이물질을 뿌려놓은 후 전원을 인가하였다. 아래 Fig. 8은 방진 모듈의 성능을 시험한 결과이다. 방진 모듈을 구동하기 전후를 비교해보면 렌즈 면에 쌓인 이물질이 제거되는 것을 확인할 수 있다.

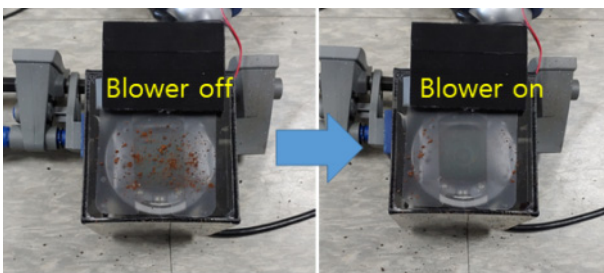


Fig. 8 Dust-proof module performance

3.3 영상 기반 주행 방향 가이드

본 연구에서는 작업면의 영상에서 도장면과 금속면의 경계를 검출하여 로봇의 주행 방향을 제어한다. 영상에서 경계는 소벨(sobel)⁵⁾, 캐니(canny)⁶⁻⁷⁾ 등의 경계 검출 알고리즘을 적용하여 검출 가능하다. 하지만 기존 알고리즘은 조명 변화 및 잡음 정도에 따라 검출되는 경계 위치와 수가 달라져서 경계가 일관되게 검출되지 않았다. 그리고 관심 대상의 경계의 위치, 방향 범위를 사전에 설정하여 최종 검출되는 경계를 필터링할 수 있지만 사전에 상세한 조건 설정이 필요로 하였다. 본 연구에서는 실제 작업 현장에서 안정적인 경계 검출 성능을 보여준 선행 연구의 6지점 기반 라인 트래킹 기법²⁾을 사용하였다.

한편, 6지점 기반 라인 트래킹 기법은 안정적인 경계 검출이 가능하지만, 각 지점 내부 및 지점 간 방향 변위를 고려하지 못하기 때문에 정밀도가 낮아 계간 형태로 방향을 제어하는 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 보다 정밀한 방향 가이드를 위해 Fig.

9와 같이 도장면과 금속면의 평균 위치를 이용하여 경계 위치를 계산하였다. 부분적으로 노이즈가 발생하는 영상의 양끝단 2/5부분을 제외한 영역에서 도장면과 금속면의 각 평균 위치를 계산하고, 왼쪽에 있는 면을 기준으로 아래 식 3을 통해 경계위치(C)를 도출하였다.

$$C = Mc + (Mc - d0) \tag{3}$$

$$= 2Mc - d0$$

로봇의 진행 방향은 계산한 경계 위치(C)와 영상 하단의 중심 위치 사이의 각도(θ)가 된다. 실시간으로 계산되는 각도는 로봇의 블라스팅 모듈이 좌우로 이동된 후, 이동하는 과정에서 반영된다.

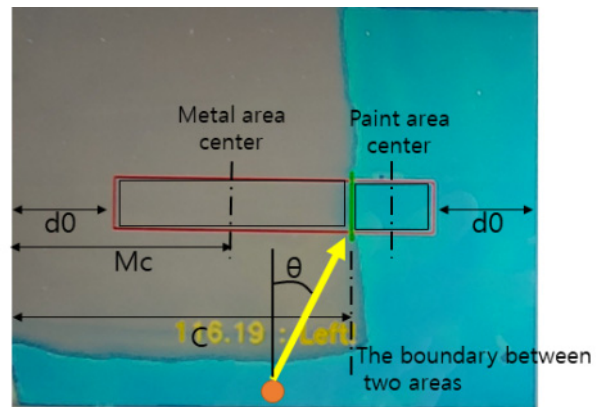


Fig. 9 The boundary between metal and paint areas

도장면과 금속면이 완벽하게 분리된 상태에서 평균 위치를 이용한 경계 위치 추출 방법은 정확하게 경계를 추출하였지만, 도장면과 금속면이 섞여 있는 상태에서는 경계 위치에 오차(각도 계산 시 3도~15도 오차)가 포함된다.

본 연구에서는 안정적으로 로봇의 이동 방향을 제어하기 위해서 6지점 기반 라인 트래킹 기법을 기반으로 정밀 방향은 평균 위치에서 계산된 각도를 적용하였다(Fig. 10). 만약 평균 위치 값이 사전 설정한 6지점 기반 라인 트래킹 기법에서의 좌우 회전 각도 범위를 벗어 날 경우에는, 6지점 기반 라인 트래킹 기법에서 설정한 방향을 적용하도록 하였다.

카메라의 전체 화각으로 영상을 촬영하는 경우 작업 현장에 따라 영상에 가장자리가 빛 반사와 편광 필름의 영향으로 무채색으로 나타나는 현상이 발생하였다. 무채색 영역은 금속면으로 인식되기 때문에 주행 방향에 오차를 발생시켰다. 본 연구에서는 영상 처리 기법인 관심영역(region of interest) 설정을 통해

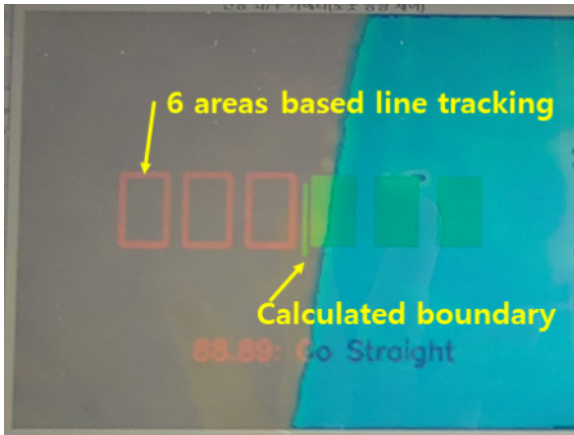


Fig. 10 Vision based line tracking

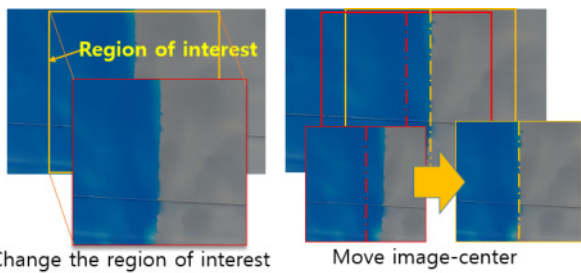


Fig. 11 Setting the region of interest in the image

환경에 따라 영상 좌우 인식 범위를 조정 가능하도록 하였다(Fig. 11).

그리고 좌우 카메라 위치 조정 없이 영상의 관심 영역을 좌우로 이동 가능하도록 하여, 카메라의 영상 중심이 블라스팅 모듈의 좌우 이동 끝점에 일치시킬 수 있도록 하였다.

4. 성능 시험

4.1 테스트벤치

비전센서 기반 모니터링 모듈의 주행 가이드 성능 시험을 위해서 컨테이너를 이용하여 테스트벤치를 구축하였다(Fig. 12). 실외 야적장의 컨테이너에 실제 재도장 작업 환경과 동일한 비계와 보양을 설치하였



Fig. 12 Testbench using a container

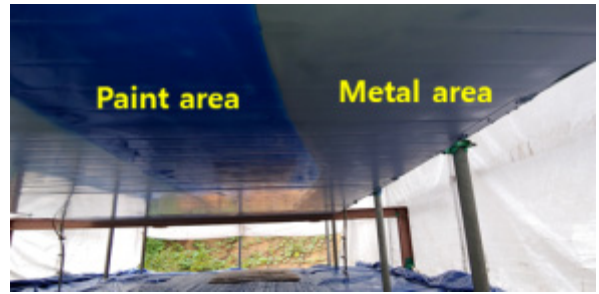


Fig. 13 Paint and metal area of the testbench

다. 굴곡이 있는 컨테이너 밑면에는 샌드위치 판넬을 부착하여 평평한 면을 구성하였고, 판넬에 도장면과 금속면을 모사하기 위해 청색 페인트와 회색 페인트를 직선과 곡선으로 구성된 경계를 따라 7m 가량 칠하였다(Fig. 13).

4.2 주행성능 시험

테스트베드의 페인트가 충분히 건조된 후, 1차 시험에서는 블라스팅 모듈을 제거한 상태에서 7m 구간을 멈춤 없이 주행 하도록 하였다. 100mm/s 속도로 진행한 시험에서, 도장로봇은 선형연구²⁾처럼 정해진 경로에 따라 이동하는 것을 확인하였다. 또한, 돌아오는 경로에서도 경로 이탈 없이 이동하는 것을 확인하였다(Fig. 14).

2차 시험에서는 실제 로봇 상태와 동일하게 블라스팅 모듈을 상판에 장착하고 주행하였다. 안전상 블라스팅 모듈에는 쇠파이프를 넣지 않고 블레이드만 회전하면서 진행하였다. 2차 시험에서 재도장 로봇은 전진 이동 후, 블라스팅 모듈이 좌 또는 우측으로 이

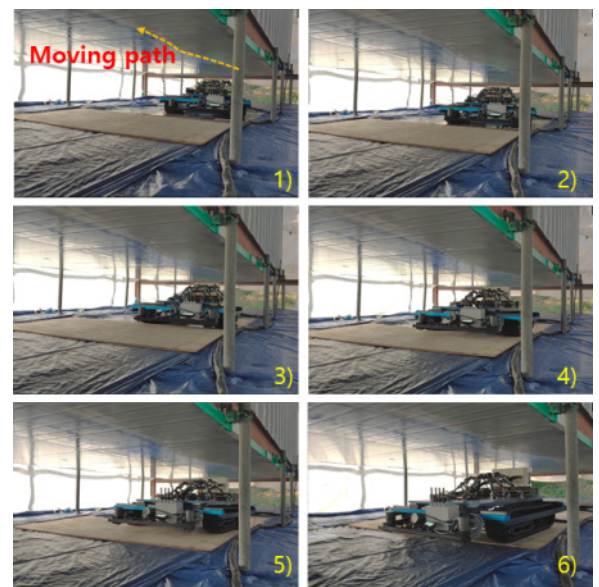


Fig. 14 Driving performance test

동하는 복합 동작에서도 정해진 경로를 따라 이동하는 것을 확인하였다(Fig. 15). 로봇의 설정 경로의 주행 여부는 도장면의 경계 위치와 블라스팅 모듈의 측면 위치를 비교하여 판단하였다.



Fig. 15 Combined driving of the re-painting robot

테스트벤치는 실제 작업 현장과 비교해 상대적으로 가로 폭이 좁아, 양 옆에서 들어오는 간접 빛으로 인하여 평균 조도가 230lux 이었다. 개발한 알고리즘의 경우 3lux 이상에서는 색상 인식이 가능²⁾하여 테스트벤치에서는 조명 없이 가시성 향상 알고리즘만으로도 안정적으로 경계 검출이 가능하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 재도장 로봇에 장착되어 로봇의 주행을 제어하는 비전센서 기반의 모니터링 모듈을 개발하였다.

저조도, 빛 반사, 부유먼지 등과 같은 문제에 대응하기 위해서 다양한 영상 가시성 향상 기술을 적용하였고, 블라스팅 과정에서 발생하는 페인트 및 금속 먼지 등의 오염물이 카메라에 부착되는 것을 방지하는 방지모듈을 개발하였다. 재도장 로봇의 정밀한 방향 제어를 위해 6지점 기반 라인트래킹 기법에 도장면과 금속면의 평균값을 이용한 경계 위치 추정 기법을 융합하여 적용하였다.

실제 작업환경과 유사하게 구축된 테스트벤치에서 모니터링 모듈의 주행 가이드 성능을 검증하였고, 직선과 곡선으로 구성된 이동경로를 이탈 없이 주행하는 것을 확인하였다.

향후 연구에서는 실제 작업 환경에서 로봇의 목표 이동 경로와 실제 이동 경로 사이의 오차를 정량적으로 분석하고, 오차를 최소화하기 위한 회전 각속도 조정과 제어 시점 보정 관련 연구를 진행할 예정이다. 또한 실내에서 원격으로 도장로봇을 모니터링 및 제어가 가능하도록 비전센서제어기와 통합제어기간의 데이터 통신을 무선으로 개발할 예정이다.

후 기

본 연구는 국토교통기술촉진연구사업 지원에 의해 수행됨(과제번호: 19CTAP-C15073-01)

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음

References

- 1) D. H. Kim, H. Y. Jung and J. Y. Kim, "An Evaluation of Life for Corrosion and Damage of Steel Bridges," Journal of the Institute of Industrial Technology, Vol.14, pp.103-109, 2006.
- 2) M. K. Seo et. al., "Development of a Prototype Monitoring Module for Steel Bridge Repainting Robots," Journal of Drive and Control, Vol.17 No.4, pp.15-22, 2020.
- 3) S. K. Bhatia, "Advances in Computer Communication and Computational Sciences," Proceedings of IC4S, Springer, pp.301-302, 2017.
- 4) K. He, J. Sun and X. Tang, "Single Image Haze Removal using Dark Channel Prior," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.33, pp.2341-2353, 2011.
- 5) N. Kanopoulos, N. Vasanthavada, and R. L. Baker, "Design of an Image Edge Detection Filter using the Sobel Operator," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.23 No.2, pp.358-367, 1988.
- 6) J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," in IEEE Transactions on Pattern Analysis

- and Machine Intelligence, Vol.PAMI-8, No.6, pp.679-698, 1986.
- 7) X. M. Zhao, W. X. Wang and L. P. Wang, “Parameter Optimal Determination for Canny Edge Detection,” The Imaging Science Journal, Vol.59, No.6, pp.332-341, 2011.