

콘크리트 크랙 탐색 및 실링을 위한 다수의 자율주행로봇

Mobile Robots for the Concrete Crack Search and Sealing

진 성 훈¹, 조 철 주², 임 계 영⁺

Sung-Hun Jin¹, Cheol-Joo Cho², Kye-Young Lim⁺

Abstract This study proposes a multi-robot system, using multiple autonomous robots, to explore concrete structures and assist in their maintenance by sealing any cracks present in the structure. The proposed system employed a new self-localization method that is essential for autonomous robots, along with a visualization system to recognize the external environment and to detect and explore cracks efficiently. Moreover, more efficient crack search in an unknown environment became possible by arranging the robots into search areas divided depending on the surrounding situations. Operations with increased efficiency were also realized by overcoming the disadvantages of the infeasible logical behavioral model design with only six basic behavioral strategies based on distributed control-one of the methods to control swarm robots. Finally, this study investigated the efficiency of the proposed multi-robot system via basic sensor testing and simulation.

Keywords Mobile robots, Behavior Control, Localization, Concrete crack Search and Sealing, Vision

1. 서 론

콘크리트는 다른 재료에 비해 경제적이며 내구성이 좋아 구조물 재료로 가장 많이 사용되지만 외기에 그대로 노출된 콘크리트 구조물은 심각한 손상을 초래할 수 있다. 특히 균열은 발생하면 장기적 요인으로 작용하여 콘크리트 구조물의 내구성이나 안전성에 큰 악영향을 미치며, 균열에 대한 유지관리가 소홀한 경우 대형사고로 이어져 인명피해는 물론 사회적으로 큰 손실을 가져올 수 있다. 따라서 콘크리트 구조물의 안전과 유지관리는 사회적·국가적 문제이며 그 중요성이 크게 증가하고 있어 학계에서는 다양한 연구가 진행중이다^[1,2].

대부분 유지보수 작업은 어렵고 위험하여 로봇이나 자동화 기계를 통하여 수행하는 것이 실용성과 효율성을 높이는 방법이다^[3]. 유지보수를 위한 초기 단계로 영상 처리를 통해 균열에 대한 정보를 자동으로 획득하는 다양한 연구들이 진행되었고^[4-6], 대형 콘크리트나 교량과 같은 균열 검사는 접근이 어려울 뿐만 아니라 안전상의 문제, 작업자의 주관적인 판단 등 여러 가지 어려움이 있어 자동화 및 로봇시스템을 통한 해결 방법이 필수적이며 이를 위한 연구도 많이 진행되었다^[7-8]. 균열에 관한 정보를 바탕으로 실링 자동화에 대한 연구는 90년대 초반부터 진행되었는데 아스팔트 도로면의 균열을 자동으로 실링하기 위해 카메라를 장착한 2축 로봇을 이용한 자동화 시스템이 개발되었고^[9], 차량에 일체화된 직교로봇을 이용하여 도로면의 균열을 실링하는 시스템도 개발되었다^[10]. 도로면 균열을 실링하는 자동화 시스템에 관한 연구뿐만 아니라 교량 하부에 고정되어 균열을 보수하는 로봇도 개발되었다^[3]. 하지만 이러한 로봇들은 대부분 한 대의 로봇을 통해 작업하는 단일 로봇시스템

Received : Jan. 7. 2016; Revised : Feb. 29. 2016; Accepted : Apr. 28. 2016

⁺Corresponding author: Professor, Energy and Electrical Engineering, Korea Polytechnic University (kylim@kpu.ac.kr)

¹Robotics, Graduate School of energy, Korea Polytechnic University (jin-a-mail@hanmail.net)

²Electrical Engineering, Graduate School of energy, Korea Polytechnic University (h2master@naver.com)

에 해당하며, 광범위한 환경의 탐사나 수색 등에서는 기존의 단일 로봇시스템보다 여러 대를 이용하는 군집 로봇시스템이 보다 높은 효율성을 보인다. 일부 로봇의 고장이 발생해도 남은 로봇들로 작업이 가능한 장점이 있으며 개미, 꿀벌 등과 같은 동물의 집단행동으로부터 표출되는 무리 지능을 이용함으로써 집단수준의 과업 처리에는 매우 효율적이어서 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^[11,12]. 최근 들어 콘크리트 균열 탐색을 위해 이동로봇을 이용하는 연구가 진행되고 있고^[13], 건설 현장에서 이동로봇으로 멀티로봇을 구성하여 자재 운반과 청소를 가상의 문제로 접근하는 연구도 있었지만^[14] 아직은 콘크리트 유지보수와 관련하여 구체적인 문제 해결을 위한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 콘크리트 구조물의 유지보수와 관련하여 콘크리트 슬래브나 바닥과 같은 넓은 공간에 존재하는 0.2 mm 이하의 크랙을 탐색하고, 콘크리트 표면 처리공법 중 실링공법으로 조기 보수하는 방법에 대하여 연구하였다. 이를 위해 여러 대의 로봇을 이용하는 멀티로봇 시스템으로 효율적인 작업이 가능하도록 Fig. 1과 같이 프로토타입의 소형 모바일 로봇을 제작하였으며, 자율주행 로봇에게 필수적으로 요구되는 새로운 자기 위치 추정 방법을 적용하였다. 또한 시각 시스템을 통해 외부 환경을 인식함은 물론 크랙 검출과 탐색을 하며 주변 상황에 따라 탐색영역을 분할하여 로봇을 배치하는 영역분할 방법으로 미지환경에서 보다 효율적인 크랙 탐색이 되도록 하였다. 마지막으로 군집로봇의 제어 방식 중 확장성, 유연성, 강건성을 가지는 분산제어 방식에 기초한 6가지 기본행동 전략만으로 논리적인 행



Fig. 1. Mobile robot prototype

동 모델 설계가 불가능한 단점을 극복하는 방법을 제안하였다.

2절에서는 RF와 초음파 센서를 이용한 군집로봇의 새로운 자기위치 추정 방법에 대하여 설명하며 2차원 공간에서 로봇이 효율적으로 크랙을 탐색하고 실링하기 위해 필수적인 비전 시스템에 대하여 설명한다. 또한 미지의 환경에서 효율적인 탐색을 위해 주변 상황에 따라 탐색영역을 분할하여 로봇을 배치하는 방법에 대하여 설명한다. 3절에서는 2절에서 제안한 방법들을 이용하여 로봇들을 제어하기 위한 6가지 기본행동전략에 대하여 설명한다. 4절에서는 제안된 방법과 알고리즘에 대한 타당성을 기초실험과 시뮬레이션을 통해 검증하며 마지막으로 5절에서 결론을 맺는다.

2. 자기위치 추정 및 비전 시스템

2.1 위치 추정

이동로봇에서 필수 기능에 해당하는 위치 추정은 측정거리, 측정 방법, 위치 추출 등 세 가지 영역으로 나눌 수 있다. 거리측정을 위한 다양한 센서 중 초음파센서는 간단한 구동원리, 저렴한 비용, 센티미터 단위 정확성 등 다양한 장점이 있고, 초음파 센서 기반 위치인식 시스템을 구성할 경우 동시에 많은 이동 노드를 추적할 수 있어 일반적으로 많이 사용된다^[15]. 센서를 통해 거리를 측정하는 다양한 방법 중 일반적으로 많이 사용하는 TOA (Time of Arrival)는 전파가 송신 측에서 출발하여 수신 측에 도달할 때까지 시간을 측정한 후 전파의 속도를 곱하여 거리를 측정한다^[16]. 이 방법은 신호원과 수신기가 정확히 동기되어야 하며 전파 속도가 느릴수록 정확도가 올라가므로 RF (Radio Frequency) 보다는 초음파가 많이 사용된다. 음파는 온도의 영향을 받으므로 온도보상을 고려한 측정 거리는 다음과 같다.

$$r = v \times t_{ToF} [m], \quad v = 331.5 \times 0.6T [m/s] \quad (1)$$

r : 측정거리, v : 음파 속도, T : 섭씨 온도

일반적으로 초음파 거리 측정은 비행 거리에 따라 초음파의 속도가 상대적으로 변하고 펄스가 트리거 된 후

실제 송출되기까지도 일정한 시간 지연이 발생되며 음원에서 반사판까지 거리를 고려해야 하므로 식 (2)와 같이 변형한다.

$$r = v \times t_{ToF} + E[m] \quad (2)$$

E : 펄스지연오차 + 거리와 반사판 사용에 따른 오차

오차 E 는 거리에 따라 거의 선형성을 가지므로 여러 번 실험을 통해 데이터를 얻을 수 있다. 이렇게 측정된 거리정보를 이용하여 위치를 추정하는 방법들 또한 다양한데 지금까지의 일반적인 방법은 비컨에 해당하는 초음파 송신기들을 천정에 고정하고 수신기를 장착한 로봇들이 비컨까지 거리를 측정하면 삼변측량법(Trilateration)을 이용해 위치인식을 한다. 이러한 방법은 장소가 협소하여 고정 비컨들을 설치할 수 없는 문제와 넓은 영역에서의 설치비용 문제가 있고, 확장성에 제한적이며 여전히 적지 않은 오차가 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 움직이는 로봇이 비컨이면서 동시에 필요한 위치를 획득할 수 있도록 하는 위치인식 비컨 시스템^[17]이 제안됐지만 작업 공간 내에서 상대적인 위치를 인식하며 위치인식을 할 때는 비컨 로봇이 정지한 상태에서 가능했다.

따라서 본 논문에서는 시계가 확보된 넓은 공간에서 영역확장에 따른 확장성이 용이하며 멈추지 않고 자율주행 중에 위치를 인식하여 공간을 탐색하고 작업을 할 수 있도록 멀티로봇의 새로운 위치인식 시스템을 제안한다. Fig. 2는 새로운 위치인식 시스템의 개념도이다. 이 시스템은 Fig. 3과 같은 초음파-비컨 장치와 RF를 이용한 거리측정 시스템을 로봇에 장착하고, 측정 로봇과

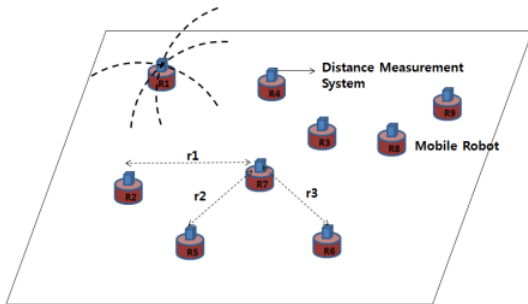


Fig. 2. Localization system outline

비컨 로봇이 역할을 교대로 수행하면서 로봇이 자율주행 중에 자기위치 인식이 가능한 시스템이다. 초음파-비컨 장치의 반사판은 일정한 지향각을 갖고 수직 방향으로 방사된 초음파를 수평 방향으로 전파시켜 모든 로봇이 동시에 거리측정이 가능하도록 하고, 반사각에 따른 거리 값의 변화^[18]를 방지하며 정반사 되도록 Fig. 4와 같이 설계하였다.

새로운 위치인식 시스템에서 위치 추정을 할 때 모든 로봇의 초기 위치값은 알고 있으며, 모든 로봇의 위치는 공유 가능하다고 가정한다. 로봇의 위치 추정 방법을 예를 들어 설명하면 먼저 1번 로봇이 비컨이 되어 Fig. 5의 신호체계에 따라 모든 로봇에게 RF 동기 신호를 보낸 후 응답 신호를 받으면 초음파 신호를 송신한다.

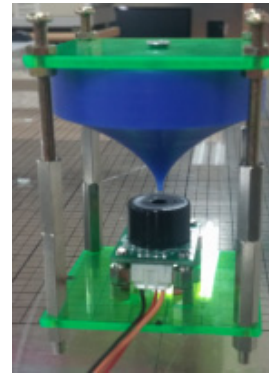


Fig. 3. Ultrasonic-Beacon system

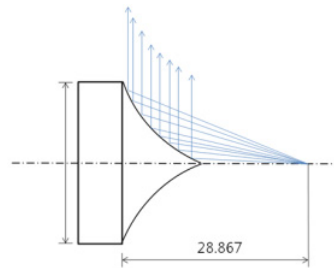


Fig. 4. Ultrasonic reflector

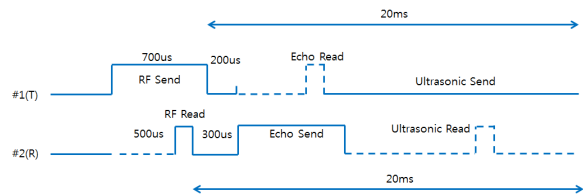


Fig. 5. Signal rule of localization system

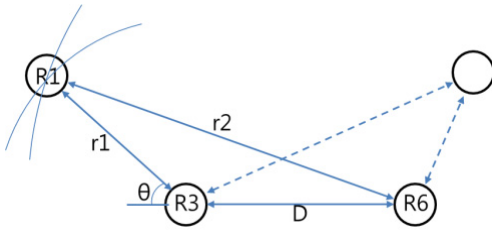


Fig. 6. Requirement for application of trilateration

1번 로봇을 제외한 다른 모든 로봇은 응답 신호를 보낸 후 초음파 신호를 대기하면서 시간을 카운터하여 1번 로봇과의 거리 값을 계산하여 저장한다. 다음은 2번 로봇이 비컨이 되어 모든 로봇에게 동기 신호와 초음파 신호를 송신하며 나머지 로봇들은 2번 로봇과의 거리 값을 계산하여 저장한다. 이런 방법으로 n번 로봇까지 진행하고 이것을 다시 반복 순환한다. 이 과정에서 모든 로봇은 다른 로봇과의 거리 값을 최신 정보로 업데이트 하고, 다른 로봇과의 거리정보가 세 개(r_1, r_2, r_3) 이상이면 위치(p_1, p_2, p_3)는 알고 있으므로 삼변측량법을 적용하여 자기위치 측정이 가능하다.

여기서 자신을 제외한 모든 로봇은 비컨으로서의 역할이 가능하지만 반드시 모두가 가능한 것은 아니다. 본 논문에서는 고정 비컨이 아니라 비컨들이 자율 주행하는 로봇이므로 가령 비컨들과 측정 로봇이 일직선상에 있을 때 거리측정 오차를 고려하면 만나는 점이 형성되지 않아 측정이 불가능하다. 따라서 Fig. 6의 θ 와 D 가 식 (3), (4)를 만족하는 로봇들을 선택한다.

$$\text{조건 1: } |r_1 - r_2| < D < |r_1 + r_2| \tag{3}$$

$$\text{조건 2: } \theta > \theta_T \tag{4}$$

이렇게 측정된 위치들은 식 (5)과 같이 일반화된 식으로 나타낼 수 있다.

$$x_i^n = \hat{x}_i^n(r_1, r_2, r_3) + \Delta x \tag{5}$$

x_i^n : n번 로봇의 i번째 위치 추정 값

\hat{x}_i^n : n번 로봇의 i번째 위치의 위치 측정 값

여기서 Δx 는 측정 오차이며 칼만 필터를 통해 측정 에러를 감소시킨다. 칼만 필터를 이용한 위치 보정 방법은 예측단계에서 추정된 위치정보, 오차 공분산, 로봇의 속도정보를 이용하여 로봇위치와 오차 공분산을 예측하고 측정값과 예측값으로 로봇의 위치를 추정한다^[19]. 멀티 로봇의 위치 추정을 위한 선형 모델과 상태변수는 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + w_k, & z_k &= Hx_k + v_k \\ x_k &= [p_x p_x p_y p_y]^T, & z_k &= [p_x p_y] \end{aligned} \tag{6}$$

x_k : 상태변수(위치, 속도), z_k : 측정값(로봇의 위치)

A : 상태전이행렬, H : 측정값과 상태변수 관계

2.2 비전 시스템

로봇이 주어진 임무를 수행하기 위해 스스로 주위 환경 정보를 획득하는 것은 필수적이며, 본 논문에서는 2차원 평면에 존재하는 크랙을 탐색하고 실링하는 방법에 관한 연구가 목적이므로 비전 센서를 통해 보다 효율적인 크랙 탐색과 검출 및 실링을 하도록 한다.

2.2.1 시각 시스템 모델링

시각 시스템을 통해 외부환경을 인식하기 위해서는 실 좌표 중 적어도 하나의 좌표 정보를 알아야 하며 본 논문에서는 2차원의 평면 바다에 존재하는 크랙을 탐색하는 문제이므로 z 에 대한 정보는 알 수 있다. 따라서 Fig. 7과 같은 시각 시스템 모델링을 통해 수학적으로 계산이 가능하다^[20]. 식 (7)은 실 좌표를 영상 좌표로 변환하는 식이며, 본 논문에서는 탐색 된 영상 좌표를 통해 실세계 좌표가 필요하므로 식 (8)과 같이 변환한다.

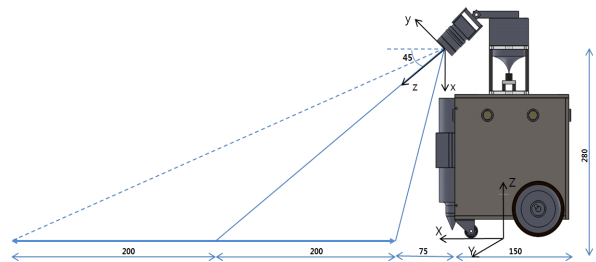


Fig. 7. Vision system modeling

$$c_h = PCRGw_h \quad (7)$$

$$w_h = (PCRG)^{-1}c_h \quad (8)$$

P : 원근 변환, R : 회전 변환, C : 짐벌-영상 변환
 c_h : 영상 좌표, w_h : 실세계 좌표, G : 기준-짐벌 변환

변환 행렬 $(PCRG)^{-1}$ 을 구하는 방법은 모델 식을 통해 구할 수도 있지만 카메라 경사각이 고정되어 있어 실 좌표를 알고 있는 여러 점을 이용하는 카메라 보정 방법을 사용하여 추정하도록 한다. 바닥에 존재하는 크랙의 Z 값은 0이므로 식 (9)와 같이 동차 좌표형태로 나타내고, 변환행렬의 미지수를 결정하기 위해 식 (10)을 풀어 정리하면 식 (11)을 얻을 수 있으며 정확한 정보를 위해 여러 번의 데이터 획득을 통해 변환 행렬을 결정하도록 한다.

$$w_h = \begin{bmatrix} kX \\ kY \\ k \end{bmatrix}, c_h = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, PCRG^{-1} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} a_{31}xX + a_{32}yX + a_{33}X - a_{11}x - a_{12}y - a_{13} &= 0 \\ a_{31}xY + a_{32}yY + a_{33}Y - a_{21}x - a_{22}y - a_{23} &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

2.2.2 크랙 검출

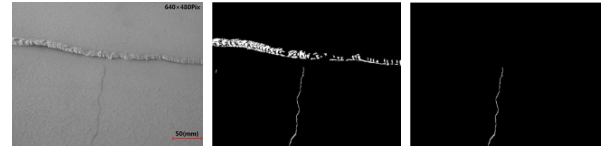
콘크리트 균열 검출과 관련한 많은 연구들이 진행되었지만 전체적인 흐름에서 알고리즘들은 큰 차이가 없으므로 본 논문에서는 이동로봇의 실시간 처리에 주안점을 두어 알고리즘을 적용하였다. 먼저 처리 속도를 고려하여 컬러 영상을 흑백으로 변환하고, 배경과 크랙의 밝기값 대비를 강조하여 효과적으로 크랙을 검출하도록 식 (11)과 같이 모폴로지 기법을 적용하였다¹⁹⁾.

$$h = f + (f - (f \circ b)) - ((f \cdot b) - f) \quad (11)$$

\circ : Opening 연산, \cdot : Closing 연산

f : 입력영상, b : 구조요소

영상 전처리 후 배경과 물체를 분리하는 일반적인 방법은 이진화 기법이며, 본 논문에서는 이들 중 Otsu방법



(a) Origin image (b) Sealing and crack (c) Crack only

Fig. 8. Crack detection

을 적용하였다²¹⁾. 이진화 처리 후 영상은 크랙뿐만 아니라 많은 노이즈를 포함하고 있다. 일반적으로 노이즈는 연결되어 있지 않고 산포하기 때문에 labeling 기법을 통해 이들을 제거할 수 있다. 미소 잡음 제거 후 남은 물체는 잘못 인식된 작은 물체와 실링이 완성된 크랙, 그리고 검출하고자 하는 크랙 등 세 가지 정도가 있을 수 있다. 본 논문에서는 찾고자 하는 크랙만 검출하기 위해 물체의 특징을 나타낼 수 있는 형상분석 방법 중 Packing density를 적용하여 최종 크랙을 검출하였다⁸⁾. Fig. 8의 (a)는 가지 형상의 크랙으로 일부 실링작업이 완료된 영상이고 Fig. 8의 (b), (c)는 검출 알고리즘에 따라 실링작업이 완료된 크랙과 작업 전 크랙을 분리하여 검출한 영상을 보여준다.

2.3 탐색영역 분할

주어진 2차원 평면 공간에서 주변 상황에 따라 탐색영역을 분할하여 로봇을 배치함으로써 효율적인 탐색작업이 되도록 하며, 영역분할을 위해 영상처리 기법과 보로노이 테셀레이션 방법²²⁾을 적용한다.

2.3.1 탐색공간 정의

탐색공간은 일반적으로 사용하는 격자형태의 2차원 평면으로 가정하며, 위치인식 시스템의 오차를 고려해 한 셀의 크기는 30×30 cm, 전체공간은 600×400 cm이다.

2.3.2 영역 분할

여러 대의 로봇을 이용하여 미지의 환경을 탐색할 때 작업효율이 낮은 로봇들을 미 탐색영역으로 배치하여 널리 퍼진 상태로 탐색하면 전체 영역의 Coverage를 확보함과 동시에 목표물 탐색의 가능성을 높일 수 있다.

따라서 본 논문에서는 로봇의 탐색영역 할당을 위해 처음부터 영역을 분할하지 않고 자신과 주변 상황에 따

라 탐색영역을 분할한다. 격자 공간에서 하나의 셀은 영상에서의 픽셀로 가정하고 픽셀의 강도를 탐색량 $Q(x, y)$ 로 대체하면 식 (12)과 같은 일반적인 영상 함수는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있어 영상처리 기법을 적용할 수 있다.

$$f(x, y) = i(x, y)r(x, y) \quad (12)$$

$$f(x, y) = Q(x, y) \quad (13)$$

여기서 $i(x, y)$ 는 물체에 투사된 광원의 양이며, $r(x, y)$ 은 반사된 광원의 양이다. 영역 분할을 위해 이진화 방법을 사용하며, 이때 임계값 설정은 식 (14)과 같이 탐색량의 평균을 구해 임계치 T 를 설정하고, 탐색량이 많은 곳과 적은 곳을 분리하는 이진화 영상 $g(x, y)$ 를 계산한다. 이진화 처리 후 서로 같은 지역으로 묶을 수 있는 연결 알고리즘인 레이블링을 수행하여 영역 분할을 완성한다.

$$T = \frac{\sum f(x, y)}{N}, \quad g(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } f(x, y) > T \\ 0, & \text{if } f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (14)$$

2.3.3 세부영역 분할

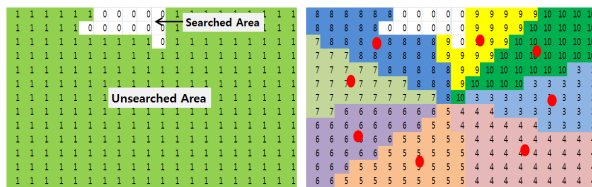
로봇들이 작업을 시작한 초기에 영역 분할을 하는 경우 Fig. 9의 (a)와 같이 미 탐색지역이 아주 크게 분할되고, 이 지역을 한 대의 로봇이 이동하여 탐색을 하는 것은 비효율적이므로 일정 크기 이상의 큰 영역이라면 다시 세부영역으로 분할하는 것이 합리적이다. 영역 분할은 기하학 등에서 많이 사용하는 보로노이 테셀레이션 알고리즘을 사용한다. 식 (15)는 보로노이 셀 $V(p_i)$ 를 정의한다.

$$V(p_i) = \{x | \text{dist}(x, p_i) < \text{dist}(x, p_j) \text{ for } j=0, 1, \dots, n \text{ and } j \neq i\} \quad (15)$$

보로노이 테셀레이션을 실행하기 위해 보로노이 셀이라는 생성자가 필요하며 면적 중심점을 이용하여 찾는다. 식 (16)에서 A 는 분할하고자 하는 영역의 면적이며, \bar{x}, \bar{y} 는 1차 면적 모멘트에 해당하는 면적의 중심점이다.

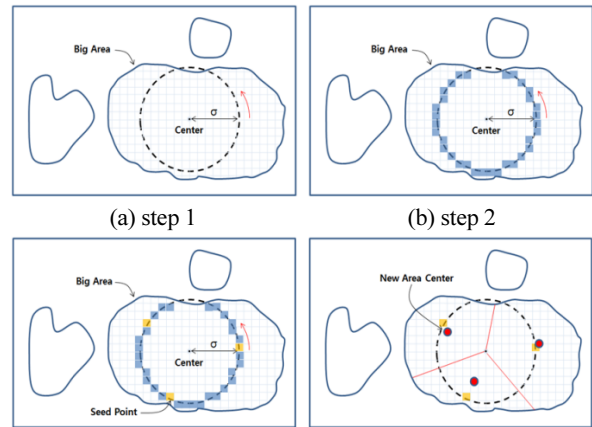
$$A = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f(i, j) \\ \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m jf(i, j)}{A}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m if(i, j)}{A} \quad (16)$$

면적 중심이 구해지면 중심에서 얼마나 산포하는 가를 나타내는 분산값을 구하고, 면적 중심에서 이 분산값을 반지름으로 하는 원을 그린다. 이 원주 상에 분포하는 셀들의 수를 분할하려는 수로 나누고, 등 간격에 분포한 셀들이 찾하고자 하는 생성자가 된다. 획득한 생성자를 중심으로 보로노이 테셀레이션을 수행하여 Fig. 9의 (b)와 같이 세부 영역 분할을 완성한다. Fig. 10의 (a)~(d)는 세부영역 분할의 단계를 설명하며, 완성된 세부 영역들의 면적 중심점들은 새로운 목표 지점으로 모든 로봇에게 통신을 통해 공유한다. 세부영역 분할의 수는 최대 작업 로봇의 수와 같으며 최소 20픽셀 이상일 때 세부영역 분할을 한다.



(a) Initial separation (b) Separation in detail

Fig. 9. Area saeparation for searching



(a) step 1 (b) step 2 (c) step 3 (d) step 4

Fig. 10. Area separation in detail

3. 기본 행동전략과 실링작업

2차원 평면공간에서 작업을 시작하는 멀티로봇은 기본적으로 탐색모드와 실링모드 두 가지로 나뉘며, 탐색모드에서 충돌회피, 주변 탐색, 근거리 탐색, 전역 탐색, 임의 탐색 등 다섯 가지 행동을 통해 크랙을 탐색하고 크랙이 탐색되면 실링모드로 전환한다. 실링모드에서는 주변 상황에 따라 실링작업유도 행동을 통해 다른 로봇을 크랙으로 유도하며 2대의 로봇이 협동하여 효율적인 실링작업이 되도록 한다.

3.1 충돌 회피

로봇이 충돌을 회피하는 것은 기본적인 능력에 해당하며 효율적인 충돌회피에 관한 다양한 방법들이 있지만 여전히 충돌 위험성 문제와 과도한 경로 회피 문제를 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 작업의 효율성을 고려해 다음과 같은 방법을 사용한다. 우선 모든 로봇은 현 작업 상태에 따라 Table 1과 같이 가상의 질량 가중값을 가진다. 두 로봇이 충돌회피 영역 안에 있는 경우 질량 가중값이 큰 로봇은 식 (18)을 사용하여 속도만 감속하고 방향은 유지한다. 반면 다른 로봇은 Borenstein과 Koren이 제안한 포텐셜 필드 알고리즘에 따라 식 (17)의 포텐셜 필드 함수에 의해 결정된 방향과 속도로 충돌을 회피하는 방식이다^[23,24]. 실링하는 두 로봇이 마주 보고 충돌하는 경우는 가중값이 적은 로봇이 임의 방향으로 회피하고, 만약 가중값이 같을 때는 실링량이 많은 로봇이 임의 방향으로 회피한다.

$$F_{tot}(q) = F_{att}(q) + F_{rep}(q) \quad (17)$$

Table 1. Weight Value depending on Working State

Robot state	Weight	Robot state	Weight
Neighbor Search	4	Under Sealing & Branch Detection	7
Nearest Search	3	Under Sealing	6
Global/Attraction Behavior	2	Sealing Waiting	5
1 (default)			

$$v_c^i = \begin{cases} (1 - e^{-d_{ij}})v_0, & \text{if } w_m^i > w_m^j \\ \eta F_{tot}(q), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

식에서 w_m^i 는 i 번째 로봇의 질량 가중치를 나타내고, d_{ij} 는 i 번째 로봇과 j 번째 로봇과의 거리를 나타내며, v_0 는 처음 속도, v_c^i 는 i 번째 로봇의 현재 속도를 의미한다. η 는 포텐셜 함수에 의해 구해진 전체 힘의 가중치를 나타내는 상수이다.

3.2 주변 탐색

작업공간에 있는 로봇은 항상 임의의 셀 안에 존재하므로 현 셀을 포함한 주변 8개 셀의 탐색량을 평가하고, 탐색이 필요한 경우 현 셀의 중앙으로 이동하여 회전하면서 영상으로 크랙을 탐색한다. 탐색 윈도우 영역 안의 탐색량을 누적 계산하기 위해 셀들은 작은 셀들로 세부 분할되며 회전하는 동안 주변 셀들의 누적 탐색량이 일정 값(1800) 이상이 되면 주변 탐색을 완료한다. 식 (19)은 k 셀의 누적 계산식을 나타낸다.

$$Q_k(x, y) = \sum q_k(i, j) \quad (19)$$

3.3 근거리 탐색

작업 초기 처음 영역 분할은 전체 탐색공간의 영역 분할로 볼 수 있으며, 처음 분할된 지역으로 이동하여 탐색하는 로봇은 현 지역에서 탐색과 작업을 완료한 후 다른 지역으로 이동하는 것이 효율적이다. 따라서 다음 조건을 만족하는 경우 현 위치에서 가장 가깝고 미탐색된 공간으로 이동하여 탐색을 하도록 한다.

조건1: 주변 탐색을 완료한 경우

조건2: 현 지역의 탐색률이 임계값 이하인 경우

조건3: 목표점 주변 다른 로봇이 없는 경우

3.4 전역 탐색

주변 상황에 따라 탐색량이 적거나 미탐색된 지역으로 이동하여 탐색하는 것은 로봇들을 전체 작업 영역으로 분산시켜 로봇들 간의 충돌을 예방하고 주어진 임무를 빠른 시간에 완성할 수 있는 적절한 방법이다. 따라서

다음 조건을 만족하는 경우 2절에서 제안한 영역 분할 방법을 통해 전역목표 지점으로 이동하여 전역 탐색을 수행한다.

- 조건1:** 주변 탐색을 완료한 경우
- 조건2:** 근거리 탐색을 할 수 없는 경우
- 조건3:** 목표점 주변 다른 로봇이 없는 경우
- 조건4:** 평가함수 μ_k 의 최대값이 0보다 큰 경우

$$\mu_k = \begin{cases} c \frac{e^{-\sum Q_k(x, y)}}{d_k}, & \text{if } c \frac{e^{-\sum Q_k(x, y)}}{d_k} \leq T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

영역 분할 방법을 통해 찾은 전역목표 지점들은 상황에 따라 다르지만 여러 목표 지점들이 주어진다. 이때 로봇들은 식 (20)과 같이 평가함수를 통해 가장 높은 값을 가지는 지점으로 이동하는 것이 합당하다. μ_k 는 전역 목표 지점 k 셀의 평가값이고, $\sum Q_k(x, y)$ 는 k 셀 주변 8 개를 포함하는 탐색량이며, d_k 는 현 로봇에서 k 셀까지 거리를 나타낸다. c 는 평가함수를 조절하기 위한 상수이다. T 는 평가 함수의 임계값으로 조건 없이 이동하는 경우 목표점 도착 전에 다른 로봇이 같은 지역으로 이동할 수 있어 이를 방지한다.

3.5 임의 탐색

임의 탐색 동작은 작업 마무리 단계에서 기본 여섯 가지 동작 중 충돌 회피, 주변 탐색, 실링작업유도, 근거리 탐색 그리고 전역 탐색이 선택되지 않을 때이며, 작업 초기에 임의 탐색은 거의 이루어지지 않는다.

3.6 실링작업 유도

2절에서 제안한 비전 시스템에 의해 크랙을 발견하는 경우 두 번의 단계를 통해 크랙에 도달한다. 첫 번째는 탐색 윈도우 안에 존재하는 크랙의 중간점을 계산하고 그 지점으로 이동을 시작한다. 두 번째는 이동 중 크랙과 일정 거리에서 다시 크랙을 탐색하고, 만약 크랙의 끝점이 발견될 경우 끝점으로 이동하고, 아니면 다시 크랙의 중간점을 다시 계산해 이동한다. 이때 끝점 혹은 중간점, 그리고 다른 점과의 기울기를 계산해 실링 방향도 알

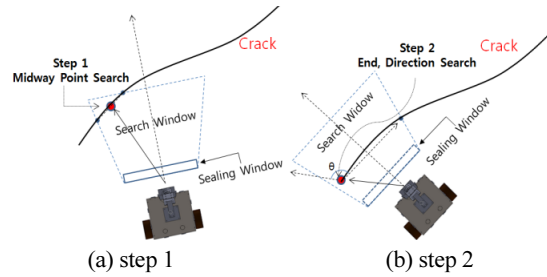


Fig. 11. Crack approach method

수 있다. Fig. 11의 (a), (b)는 단계별 크랙 접근방법을 보여준다. 크랙의 끝점을 발견했을 때는 현 로봇이 즉시 실링을 시작하고, 끝점이 아닌 경우 협동 작업을 위해 주위 로봇들에게 크랙 발견을 통신으로 알리고 실링작업을 유도한다. 이때 실링작업 중이고, 목표점으로 이동 중인 로봇을 제외한 모든 로봇 중 가장 가까이 있는 로봇을 유도하며, 일정 시간 동안만 유도신호를 보내고 유도되는 로봇이 없을 때는 협동 없이 실링작업을 시작한다. 실링작업 중 가지 형상의 크랙을 발견하는 경우도 실링작업 유도를 하게 된다.

3.7 실링작업

발견된 크랙에 도착하면 실링작업 윈도우로 전환하고, 크랙 탐색 단계에서 구한 실링 방향으로 회전하여 실링작업 준비를 완료한다. 본 논문에서는 영상 시스템을 이용하여 크랙을 정밀하게 추적하면서 동시에 실링작업을 해야 하므로 탐색작업에서 사용한 탐색 윈도우를 실링작업 윈도우로 변경할 필요가 있다. 따라서 실링 작업 윈도우의 시각 시스템 변환행렬은 실링작업 윈도우 영역으로 한정된 데이터를 통해 다시 계산된다. Fig. 11의 실링작업 윈도우는 로봇의 중앙에서 전방 150 mm, 실링건에서 75 mm 지점에 위치하며, 크기는 300×50 mm이다. 새로운 변환행렬을 사용한 실세계 좌표 계산 오차는 평균 ±0.3 mm 이내로 매우 적고, 실제 실링한 라인의 두께는 30 mm 정도 폭을 가지므로 정확한 실링 작업을 위해 충분함을 알 수 있다.

4. 실험 및 시뮬레이션 고찰

본 논문은 콘크리트 슬래브나 바닥과 같은 넓은 공간

에 존재하는 0.2 mm 이하 크랙을 탐색하고, 콘크리트 표면 처리 공법 중 실링공법을 통해 조기 보수하는 방법에 관한 연구가 목적이므로 미지의 환경에서 자율 주행하는 로봇은 주어진 임무를 완수하기 위해 자기위치 인식은 물론 주변 환경을 인식할 수 있어야 한다.

따라서 본 논문의 실험을 위해 제작한 로봇에 장착된 자기위치 추정 시스템과 비전 시스템에 대한 기초 실험 결과에 대하여 먼저 논하고, 이를 바탕으로 전체 알고리즘의 효용성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하고자 한다.

4.1 자기위치 추정 시스템

로봇이 자율 주행하면서 스스로 자기위치를 인식하는 시스템은 Nordic사의 nRF24L01 RF 모듈과 하기소닉사의 HG-M40DC 송/수신 겸용 초음파모듈을 사용하여 구성 하였다. 정지한 상태에서 거리측정 실험은 평균 0.76 cm 오차를 보이며, 위치측정 실험은 평균 1.1 cm 오차를 보였다. 이동 중인 로봇의 위치 인식은 처음 로봇들의 위치는 안다고 가정하고, 기초 실험으로 획득한 데이터를 바탕으로 거리측정 시 거리 오차를 감안한 오차 평균 (0.1 cm)과 표준편차(0.92 cm)로 정규 분포를 따르는 거리 오차를 발생시키며, 180 ms 단위로 로봇의 진행 방향을 랜덤으로 변화시켜 진행하도록 하는 시뮬레이션 환경에서 MATLAB으로 구현하였다. 측정된 위치 오차 보정을 위해 갈만 필터에 적용된 파라미터는 샘플링 시간 (20 ms)과 위치와 속도관계를 고려하여 A , H 를 설정하고, 잡음에 대한 공분산을 나타내는 Q , R 은 센서 오차에 대한 정보를 바탕으로 식 (23)과 같이 적절한 값을 선정 하였다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0.02 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.02 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}$$

Fig. 12와 Fig. 13은 총 7대 중 2대에 대한 위치 추정 오차와 그에 따른 궤적 오차를 나타내고 있으며, 7.5 cm/s의 이동 속도로 60초 동안 연속적으로 움직여 실험

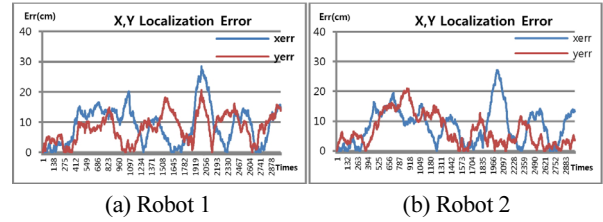


Fig. 12. Position estimation error

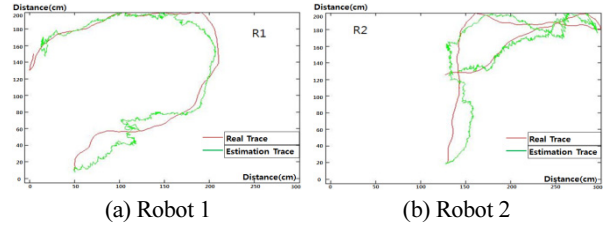


Fig. 13. Moving trace error of mobile robot

한 결과이다. 전체적으로 최대 30 cm 이내의 오차로 크게 발산하지 않고 위치 추정이 됨을 알 수 있으며, 이 오차를 고려하여 탐색 공간의 격자 셀 기준을 30 cm×30 cm로 하였다. 실제 적용되는 환경에서 로봇은 주변 탐색을 하는 동안 제자리에서 회전만 하여 이동과 정지 상태를 반복하고, 실링 작업에서는 현실성을 고려하여 현재 속도보다 1/3 정도로 감속하므로 센서 샘플링 타임은 이보다 줄어 위치 오차는 더 줄 것으로 판단하며, 시각 시스템의 탐색 윈도우가 로봇의 중앙에서 전방으로 550 mm, 좌우로 최대 500 mm의 범위를 가지므로 최대 30 cm 위치 추정 오차는 충분히 크랙을 검출할 수 있는 오차임을 알 수 있다.

4.2 비전 시스템

시각 시스템 모델링을 통해 주변 환경을 인식하기 위해 Point Gray사의 FFMV-03M2M 카메라 모델과 초점 거리 3.5 mm 렌즈를 사용하였고, Fig. 11과 같이 탐색 윈도우가 형성되도록 하였다. 카메라는 45도 아래로 고정되어 있으므로 카메라 캘리브레이션을 통해 영상 중심좌표(315, 251)와 Scale factor $S_x=0.005488$ (mm/pix), $S_y=0.006816$ (mm/pix)을 구했다. 영상 좌표를 실 좌표로 변환하는 변환 행렬은 탐색 윈도우에서 사용되는 T_A 와 실링작업 윈도우에서 사용하는 T_B 를 구별하여 적용하며 각각의 변환행렬은 다음과 같다.

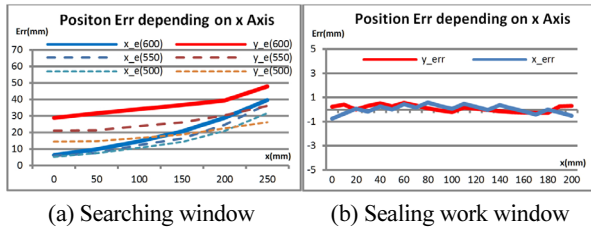


Fig. 14. Localization error of vision system

$$T_A = \begin{bmatrix} -0.0044 & -0.118 & 0.4938 \\ -0.0025 & 0.2082 & 0.7662 \\ 0.00001372 & -0.0005766 & 0.0026 \end{bmatrix}$$

$$T_B = \begin{bmatrix} -0.0001 & -0.000456 & 0.00256 \\ -0.32985 & -0.09567 & 0.49556 \\ -0.033003 & 0.21585 & 0.7631 \end{bmatrix}$$

Fig. 14의 (a)는 탐색 윈도우 위치 오차를 나타내는 것으로 x 축 중앙에서 벗어날수록 위치 오차가 크게 나타나는 것을 볼 수 있고, 오른쪽 250 mm 지점, 전방 600 mm 지점에서는 렌즈 왜곡에 의해 오차가 거의 50 mm까지 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서 탐색 윈도우 영역을 전방 550 mm에서 좌우 500 mm로 하였다. 그리고 Fig. 14의 (b)는 실링작업 윈도우의 위치 오차를 나타내며 중앙에서 벗어날수록 오차는 거의 변화가 없고, 평균 0.3 mm 정도로 아주 정밀하게 측정 되었다.

4.3 탐색 및 실링 시뮬레이션

멀티로봇 시스템을 이용하여 콘크리트 슬래브나 바닥에 존재하는 크랙을 탐색하고 실링하는 방법에 대한 효율성을 검증하기 위해 MATLAB을 사용하여 시뮬레이션하였다. 사용된 로봇의 대수는 최대 7대이고 로봇의 탐색 속도는 7.5 cm/s이며, 실링 작업할 때 실링 속도는 2.5 cm/s이다. 로봇의 크기는 지름 10 cm이며 탐색 영역 안의 크랙 구성과 배치는 Fig. 15와 같이 두 가지 형태로 구성하여 실험하였다. 출발은 한 곳에서 하지만 매번 실험을 반복할 때마다 출발 위치를 달리하여 다양한 환경에서 실험한 효과를 얻을 수 있도록 하였다. Fig. 16은 작업 시작 후 주변 상황에 따라 충돌 회피 경로와 전역 탐색 경로 및 행동의 변화를 나타내는 것으로 시뮬레이션에서 파란색은 충돌 상태를 나타내며, 분홍색은 전역 탐색의 상태를 나타낸다. ③번 로봇은 시작점 주변 셀들

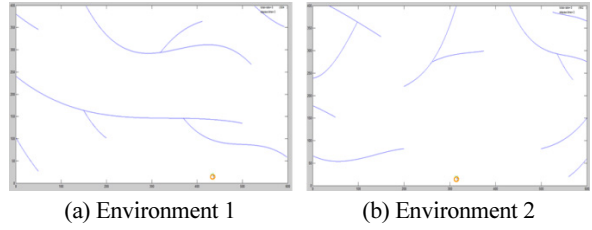


Fig. 15. Sample of environment

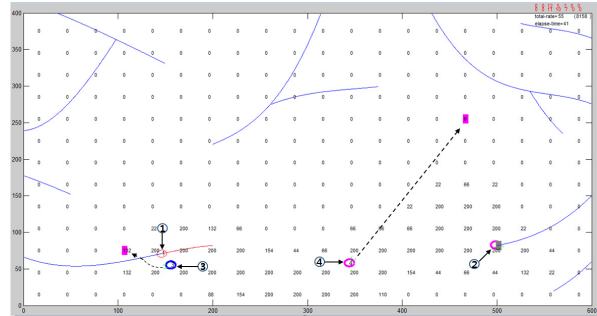


Fig. 16. Change of path and behavior depending on the circumstances (collision avoidance, global search)

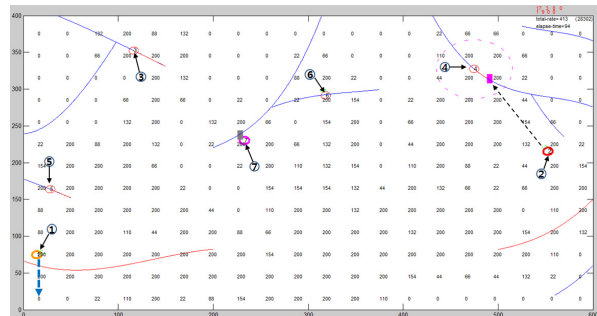


Fig. 17. Change of path and behavior depending on the circumstances (neighbor, nearest search, attraction behavior)

이 모두 탐색되어 전역 탐색 경로로 이동 중 ①번 로봇과 충돌이 예상되어 제안하는 충돌 회피 방법으로 회피하여 목표 지점으로 이동하는 것을 보여준다. 그리고 ④번 로봇은 주변 셀들의 상황에 따라 전역 목표 지점으로 이동하는 것을 보여준다. Fig. 17은 주변 탐색, 근거리 탐색, 실링작업유도 등의 경로와 행동의 변화를 나타낸다. ①번 로봇은 실링 작업을 완료한 후 주변 탐색을 하고 있으며 황색으로 현재 작업 상태를 나타내고 있다. 주변 탐색을 완료하면 현재 지역에서 가장 가까운 지역으로 이동하여 근거리 탐색을 하며 파란색 실선으로 표시된 지역으로 이동한다. ④번 로봇은 크랙에 도착한 다

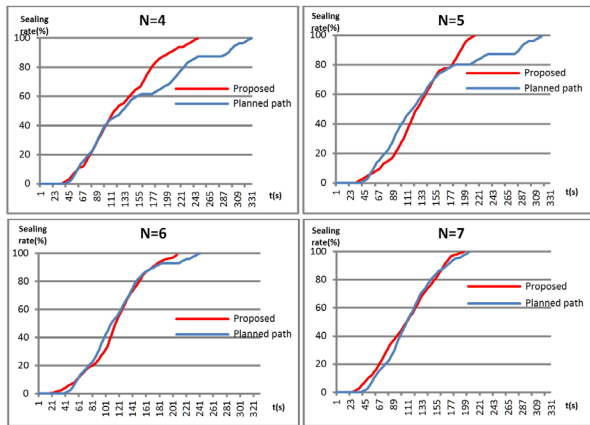


Fig. 18. Result of simulation (Environment 1, N=4, 5, 6, 7)

Table 2. Simulation results comparison (Environment 2)

No of Robot \ Method	4	5	6	7
Proposed Method	307 sec	275 sec	241 sec	213 sec
Planned Path Method	377 sec	277 sec	273 sec	225 sec

음 주변 로봇들에게 실링유도 신호를 보내 협동 작업을 유도하였고, 주변 탐색을 하고 있던 ②번 로봇이 유도되는 것을 확인할 수 있다. 유도되는 로봇은 빨간색으로 현재의 작업 상태를 나타내고 있다. ⑥번 로봇도 크랙에 도착하여 유도 신호를 보내고 있으며 일정 시간이 지나고 유도되는 로봇이 없다면 협동 없이 실링 작업을 진행하게 된다.

크랙 탐색과 실링하는 방법에 대한 효율성 검증은 제안하는 방법(Proposed Method)과 계획된 경로 탐색(Planned Path Method)의 두 방법을 비교 실험하여 진행하였으며, 계획된 경로 탐색은 탐색영역의 크기를 정확하게 안다고 가정하고 일정한 간격으로 배치하여 미리 계획된 경로로 탐색하는 방법이다. 모든 실험 결과는 총 20번 실험한 평균값을 적용하였다. Fig. 18은 로봇 수량을 달리해 비교 실험한 결과이며, 로봇 수량이 적을수록 큰 차이를 보이며 최대 100초 이상 차이가 나는 것을 알 수 있다. Table 2는 Environment 2에서 실험한 결과를 표로 정리한 것이며 Environment 1과 비슷한 실험 결과를 보인다.

모든 경우의 실험에서 제안하는 방법은 로봇 수량과 환경의 변화에 거의 일정한 작업 시간의 변화를 나타내고 있는 데 반해 PPM 방법은 환경에 따라 작업 시간의

변화가 불규칙적이며, 로봇 수량 증가에 따라 작업효율이 좋아져야 하지만 Table 2의 PPM 방법에서 5대와 6대의 작업시간 차이는 거의 없는 경우도 발생한다. 이것은 제안하는 방법이 전역 탐색을 통해 로봇을 분산된 상태로 효율적으로 탐색하고 있음을 증명한다. 한편, 로봇 수량이 적을 때와 달리 수량이 점점 증가하면서 두 방법의 작업시간 격차가 점점 줄어드는 것은 제한된 영역에서 일정 수 이상의 로봇이 투입되면 계획된 경로 탐색과 비교하여 상대적으로 분산효과가 크지 않아 나타나는 현상으로 판단된다. 하지만 실제 현장에 적용할 경우 탐색 공간에 대한 정확한 정보를 알 수 없을 뿐만 아니라 미리 계획된 경로로 적용할 수 없는 경우가 훨씬 많으므로 제안하는 방법을 적용하는 것이 현실적이며 효율적이라고 판단된다.

5. 결 론

본 논문은 콘크리트 구조물의 안전성에 큰 영향을 미치는 크랙을 효율적으로 탐색하고 실링하는 방법에 대하여 연구하였다. 2차원 평면과 같은 넓은 지역에서 탐색과 동시에 실링작업을 수행하기 위해 멀티로봇 시스템을 적용하였고, 카메라를 통해 크랙 탐색과 검출 및 주변 환경을 인식하였으며, 자율주행 로봇에 필수적으로 요구되는 자기위치 추정에 대한 새로운 방법을 제안하였다. 마지막으로 군집로봇의 제어방식 중 분산제어 방식에 기초한 6가지 기본행동전략을 통해 효율적인 탐색과 실링작업이 가능함을 기초 실험과 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 추후에는 개발된 프로토타입의 로봇을 통해 제안한 방법들이 실제 적용 가능함을 연구할 계획이다.

References

- [1] J.I. Park, S.H. Bae, J.W. Yu, K.M. LEE, "Factors Influencing the Service Life of Concrete Structures", The Transactions of the Korea Concrete Institute, pp. 21-22, 2010.
- [2] J.Y. Lee, B.Y. Cho, Y.K. Kim, S.K. Oh, "An Experimental Study about Characteristics of Penetrating Surface

- Protection”, The Transactions of the Korea Institute of Building Construction, Vol.5, pp.93-96, 2005.
- [3] K.Y. Lim, W.W. Lee, K.T. Kim, C.J. Choi, “A concrete Repair Robot Under the Upper Plate of Bridge”, ICASS, pp. 488-491, October. 2008.
- [4] Ito, A., Aoki, Y., and Hashimoto, S., “Accurate Extraction and Measurement of Fine Cracks from Concrete Block Surface Image,” IEEE Industrial Electronics Society, Vol.3, 2002, pp.2202-2207.
- [5] B.Y. Lee, Y.Y. Kim, J.K. Kim, “Development of Image Processing for Concrete Surface Cracks by Employing Enhanced Binarization and Shape Analysis Technique,” journal of the Korea Concrete Institute, vol. 17, no. 3, pp. 361-368, June, 2005.
- [6] Y. Fujita, Y. Mitani, and Y. Hamamoto, “A Method for Crack Detection on a Concrete Structure,” ICPR ‘06, Hong Kong, Aug. 2006, pp. 901-904.
- [7] J.K. Oh, Y.J. Choi, B.J. Yi, H.W. Yang, J.H. Lee, Y.S. Moon, “Robotic System for Searching Cracks beneath Bridge,” The 5th International Conference on URAI 2008
- [8] Mohammad Salman, Vaidehi Baporikar, “Autonomous Robot for Crack Detection and Mapping for Bridge Surface,” IRCCE, Vol.3, Issue. 7, July. 2015
- [9] Haas, C., Hendrickson, C., McNeil, S. and Bullock, D., “A field prototype of a robotic pavement crack sealing system,” Proc. of 9th Int. Symp. Automation and Robotics in const., ISARC Tokyo, Japan, pp. 313-322.
- [10] Y.S. Kim, “Development and application of an automatic crack and joint sealing system,” J. of the Korean Society of Civil Engineers, KSCE, Vol.2, No.4, pp. 407-417.
- [11] John A.Sauter, Robert Matthews, H.Van Dyke Parunak, and Sven A. Brueckner, “Performance of Digital Pheromones for Swarming Vehicle Control,” AAMAS 05, July 25-29, Utrecht, Netherlands.
- [12] Erik Kuiper, Simin Nadjm-Tehrani, “Mobility Models for UAV Group Reconnaissance Applications,” IEEE, 2006.
- [13] S.N. Yu, J.H. Jang, and C.S. Han, “Auto Inspection System using a Mobile Robot for Detecting Concrete Cracks in a Tunnel,” Automation in Construction, Vol. 16, pp. 718-725, 2004.
- [14] N.M. Kwok, Q.P. Ha, and G. Fang, “Motion Coordination for Construction Vehicles using Swarm Intelligence,” International J. of Advanced Robotic System, Vol. 4, No. 4, pp. 469-476, 2007.
- [15] Hakan Koyuncu, Shuang Hua Yang, “A Survey of Indoor Positioning and Object Localization Systems,” International Journal of Computer Science and Network Security, vol. 10 no. 5, May 2010.
- [16] Nissanka B. Priyantha, Anit Chakraborty, Hari Balakrishnan, “The Cricket Location-Support system” 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, Boston, MA, pp. 32-43, Aug, 2000.
- [17] Luis E. Navarro-Serment, Christiaan J. J. Paredis, and Pradeep K. Khosla, “A Beacon System for the Localization of Distributed Robotic Teams,” In Proceedings of the International Conference on Field and Service Robotics, 1999.
- [18] Y.R. Heo, J.H. Yun, J.D. Ryeom, “Location Measurement method Depending on Reflection Characteristics of Ultrasonic Sensors for The Flat LED Lamp,” JIEIE, vol. 27, No. 12, pp. 38-43, 2013.
- [19] S.I. Roumeliotis, and G.A. Bekey, “An extended Kalman filter for frequent local and infrequent global sensor data fusion,” Proc of the Sensor Fusion and Decentralized Control in Autonomous Robotic Systems(SPIE), Pittsburgh, PA, USA, pp. 11-22, 14-15, Oct. 1997.
- [20] R.C. Gonzalez, R.E. Woods, “Digital Image Processing,” Addison Wesley Longman, 1992.
- [21] N.A. Otsu, “Threshold Selection Method from Gray-Level Histogram,” IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-9, No. 1, 1979, pp. 62-66.
- [22] G. Wang, G. Cao, and T.L. Porta, “Movement-assisted Sensor Deployment,” IEEE INFOCOM 2004, Vol. 4, pp. 2469-2479, 2004.
- [23] R. Daily and D.M. Bevly, “Harmonic Potential field Path Planning for High Speed Vehicles,” American Control Conference, pp. 4609-4614, 2008.
- [24] O. Khatib, “Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots,” 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, St. Louis, Missouri, March 25-28, pp. 500-505, 1990.



진성훈

1996 충남대학교 기술교육학과(공학사)
 2002 인하대학교 자동화공학과(공학석사)
 2008 ~ 현재 한국산업기술대학교 지식기반
 에너지대학원로봇공학전공 박사과정

관심분야: 군집로봇, 지능로봇제어, 퍼지제어



조 철 주

2004 한국산업기술대학교 전자공학과(공학사)
2010 한국산업기술대학교 전기공학(공학석사)
2010 ~ 현재 한국산업기술대학교 지식기반
에너지대학원전기공학전공 박사과정

관심분야: 군집로봇, 지능로봇제어, 적응제어



임 계 영

1975 서울대학교 전기공학과(공학사)
1983 미)뉴욕주립대 전기공학(공학석사)
1985 미)뉴욕주립대 전기공학(공학박사)
2006 ~ 현재 한국산업기술대학교 전기공학과
교수

관심분야: 적응제어, 산업용 제어 시스템