

# 화방 정찰 체계에서의 다수의 이동 로봇을 위한 시간 효율적인 경로 계획 알고리즘에 대한 연구

## Time-Efficient Trajectory Planning Algorithms for Multiple Mobile Robots in Nuclear/Chemical Reconnaissance System

김재성\*, 김병국  
(Jae-Sung Kim and Byung-Kook Kim)

**Abstract:** Since nuclear and chemical materials could damage people and disturb battlefield missions in a wide region, nuclear/chemical reconnaissance systems utilizing multiple mobile robots are highly desirable for rapid and safe reconnaissance. In this paper, we design a nuclear/chemical reconnaissance system including mobile robots. Also we propose time-efficient trajectory planning algorithms using grid coverage and contour finding methods for reconnaissance operation. For grid coverage, we performed an analysis on time consumption for various trajectory patterns generated by straight lines and arcs. We proposed BCF (Bounded Contour Finding) and BCFEP (Bounded Contour Finding with Ellipse Prediction) algorithms for contour finding. With these grid coverage and contour finding algorithms, we suggest trajectory planning algorithms for single, two or four mobile robots. Various simulations reveal that the proposed algorithms improve time-efficiency in nuclear/chemical reconnaissance missions in the given area. Also we conduct basic experiments using a commercial mobile robot and verify the time efficiency of the proposed contour finding algorithms.

**Keywords:** nuclear/chemical reconnaissance system, mobile robot, trajectory planning

### I. 서론

화생방전은 화학, 생물학, 또는 핵무기를 사용하여 인명을 살상하거나 군사적 행동을 무력화시키는 것을 목적으로 한다. 따라서 화생방 첩보가 입수되면 정찰을 통해 오염이 예상되는 지역에 대해 신속한 탐지 및 식별을 하여 민간인들의 안전한 보호시설로의 대피가 가능하게 하고, 중요 군사시설이나 장비에 있는 화생방 오염물질을 제독함으로써 군사력의 저하를 피할 수 있게 한다. 이러한 화생방 정찰은 다음과 같은 제한 조건을 가진다[1,2].

- 안전성: 화생방 공격에 이용되는 물질의 경우 인체에 치명적인 영향을 미치는 것이 대부분이고, 육안으로는 위험도 및 위험 지역의 구별이 어려우며 고농도에 노출 시 증상을 입거나 사망할 수 있다.

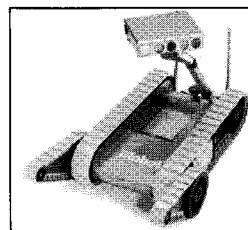
- 시간 효율성: 화생방 공격은 시간에 따른 확산으로 광범위한 영역에 지속적인 오염을 일으킨다. 따라서, 신속한 정찰을 통해 위험 상황에 빠르고 적절하게 대처하여 인명피해와 군사력저하를 최소화해야 한다.

- 정확성: 화생방 정찰을 통해 파악한 오염지역은 충분한 신뢰성을 가져야만 그것을 기준으로 진행되는 군사작전에 유용한 정보로서 가치가 있다.

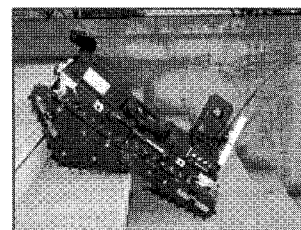
현용 정찰 체계의 경우 화학병이 오염에 노출되고 보호를 위한 과도한 장비를 필요로 하며[3] 그로 인해 정찰 계획 시 제약이 생긴다. 따라서 이를 개선하기 위해 화학병의 역할을 이동 로봇으로 대체하는 무인화에 대한 연구가 이루어지고 있고, 국내외에서는 이미 다양한 화생방 정찰용 이동 로봇이

개발되어 이용되고 있다. 미국은 아이로봇사가 그림 1(a)와 같은 군사용 이동 로봇인 팩봇(packbot)[4]을 개발하여 이라크와 아프가니스탄에 투입하여 지뢰나 폭발물 탐지 및 정찰용으로 사용했고, 국내 유진 로보틱스사가 제작한 그림 1(b)의 롬해즈(robhaz)[5]는 이라크 자이툰 부대에 시험활용 단계로 배치되었다. 소개된 로봇들의 경우, OCU (Operating Control Unit)에 의한 무선 통신을 통해 원거리에서 조정되거나 또는 반자율 주행이 가능하고 카메라를 통해 로봇 주위의 상황 영상도 확인할 수 있다. 그리고 다양한 요구 정보에 관한 센서 탑재가 가능하고, 험지에서의 용이한 주행을 위해 무한궤도형 바퀴 구조를 갖고 있다.

이런 가운데 국내외적으로 이동 로봇을 이용한 화생방 정찰의 필요 기술에 관련된 연구가 활발하게 수행되고 있다. 저자는 이동 로봇의 자율 주행 및 시스템의 저전력화 및 소형화 등 화생방 정찰용 이동 로봇의 필요 기술을 분석하였고 [6], 신속한 화방 정찰을 위해 강인한 화방 센서를 이용한 이동 로봇의 격자 경로 계획을 연구하였다[7]. 그러나 강인한 화방 센서를 가정했기 때문에, 현재의 측정 상한선이 존재하는 화방 센서를 사용하는 시스템에는 적용이 불가능하다.



(a) Packbot



(b) Robhaz

그림 1. 화생방 정찰용 이동 로봇.

Fig. 1. Mobile robots for NBC reconnaissance.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 4. 6., 수정: 2009. 5. 27., 채택확정: 2009. 8. 12.

김재성, 김병국: KAIST 전기 및 전자공학부

(jskim@rtcl.kaist.ac.kr/bkkim@ee.kaist.ac.kr)

※ 본 연구는 한국과학기술원 국방무인화기 특화연구센터를 통한 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었음.

U.S. Army Research Laboratory에서는 무인 이동 로봇 3대가 협력적으로 화학 오염지역의 윤곽을 발견하는 방법을 연구하였다[8]. 하지만 실제 센서의 성능 및 오염지역에 대한 초기 발견이 고려되지 않았다. 따라서, 측정 상한선이 존재하는 실제 화방 센서를 사용한 이동 로봇 정찰 체계를 위한 시간 효율적인 경로 계획 알고리즘에 대한 연구가 필수적이다.

본 연구에서는 안전성 보장을 위해 이동 로봇이 화학병을 대체하는 새로운 정찰 체계를 설계하고, 측정 상한선이 존재하는 화방 센서를 사용하여 신속한 임무 수행을 위한 시간 효율적인 경로 계획 알고리즘을 제안한다. 주어진 경로는 경로 제어기에 의하여 잘 추종한다고 가정한다. 그리고 생물학 정찰은 탐지 장치를 통해 실시간으로 결과값을 얻기 어렵기 때문에 본 연구의 범위에서 제외하고 장애물이 없는 바람 부는 평지로 환경을 단순화한다.

제 II 장에서는 이동 로봇을 포함한 화방 정찰 체계를 설계하고, 제 III 장에서는 이동 로봇의 시간 효율적인 정찰을 위한 경로 계획 알고리즘을 제안한다. 그리고 제 IV 장에서는 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 알고리즘의 시간효율성을 검증하며, 제 V 장에서는 수행된 연구에 대한 결론과 추후 과제에 대하여 기술하였다.

## II. 화방 정찰 로봇 체계 설계

이 장에서는 현용 화방 정찰 임무를 소개하고, 이동 로봇을 이용한 정찰을 위하여 현용 화방 정찰 체계에 기반한 화방 정찰 로봇 체계의 하드웨어와 소프트웨어 구조의 설계를 기술한다.

### 1. 화방 정찰 임무

화방 무기의 공격 징후가 포착되면, 화생방 사령부에서는 공격된 혹은 공격이 예측되는 지역에 대해 분대에 정찰 명령을 내린다. 각 분대의 분대장들은 주어진 영역에 대하여 효과적인 정찰 계획을 수립하고, 차량을 이용한 차량 정찰이나 화학병들에 의한 도보 정찰을 수행한다. 정찰병들은 현용 화생방 정찰교리 및 화생방 정찰 장비 운용 지침에 의거하여 안전하게 정찰하고, 탐측 정보를 분대장에게 보고한다[1,2].

반면 화학병의 역할을 대체하는 이동 로봇은 주어진 경로에 의해 정찰을 수행하기 때문에 이를 위해 화방 분대 컴퓨터에 의한 경로 계획이 필요하다. 그리고 정찰 시 획득한 오염도 및 위치 정보를 통해 오염 지역을 결정하고, 미래 오염 지역에 대해 예측하는 임무 등이 수행되어야 한다.

### 2. 이동 로봇을 포함한 화방 정찰 로봇 체계 설계

#### 2.1 화방 정찰 체계

화방 정찰 로봇 체계에서는 현용 체계의 화학병의 정찰 임무를 이동 로봇을 통해 대체하고, 조작병들이 정찰 로봇을 제어한다. 이 체계에서는 한 명의 조작병이 두 대의 반자율 동작이 가능한 정찰 로봇을 동시에 조정할 수 있게 하여 최대 4대의 정찰 로봇을 이용해 효율적이고 안전한 정찰을 수행할 수 있다. 그리고 데이터 통신을 통해 정확하고 신속한 정찰 정보 획득이 가능하다.

#### 2.2 이동 로봇

현재 사용 가능하고 다양한 지형에 적합한 이동 로봇의 구조는 차륜(differential driven) 이동 로봇의 형태로서, 그림 2와 같이 두 바퀴의 이동 로봇과 동일하게 모델링된다.

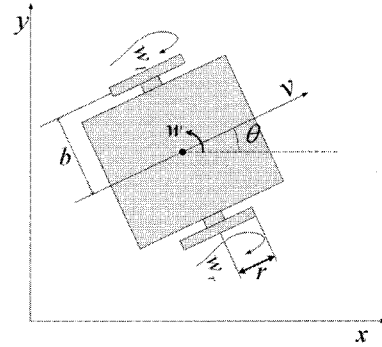


그림 2. 차륜 이동 로봇.

Fig. 2. Differential driven mobile robot.

이러한 이동 로봇의 자세(위치 및 방향)  $P(t)$  는 식(1)과 같고, 선속도  $v$  와 각속도  $w$  를 포함한 기구학은 식(2)와 같다[9].

$$P(t) = [x(t) \quad y(t) \quad \theta(t)]^T \quad (1)$$

$x, y$  는 이동 로봇의 평면상의 위치이고,  $\theta$  는 이동 로봇이 향하는 방향이다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (2)$$

차륜이동 로봇은 2개의 구동 바퀴가 각각 로봇의 양 옆에서 각속도의 독립적인 제어가 가능한 시스템으로 PWS (Power Wheeled Steering)로 불리우고, 회전 반경이 작으며 제 자리에서의 방향전환 및 회전이 가능하다는 장점이 있다. PWS 기구학은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_r \\ w_l \end{bmatrix} \quad (3)$$

$r$  은 바퀴의 반지름,  $b$  는 바퀴와 중심축과의 거리,  $w_{r,l}$  은 양 바퀴의 회전각속도를 나타낸다.

화방 정찰 이동 로봇은 주행을 담당하는 모바일 시스템과 센서로부터 오염도 정보의 획득을 담당하는 센서 시스템으로 구성된다. 모바일 시스템에 의해 자율주행이 수행되며, 예외 상황에서는 조작병이 주위 환경에 대한 정보를 비전을 통해 획득하고 OCU를 이용하여 주행 명령을 내린다.

### 3. 화방 정찰 체계 소프트웨어

화방 정찰 체계에서 제안된 임무의 효과적인 수행을 위해 체계적으로 분산된 소프트웨어 모듈이 필요하다. 효과적인 정찰 임무 수행을 위해 주어진 목표지역에 대한 정보로부터 이동 로봇의 경로를 계획하고, 얻어진 탐측 정보로부터 화방 오염 지도를 작성한다. 처리된 데이터는 화면에 표시되고, 상급 부대 및 정찰 로봇과의 통신이 수행된다.

이 중 경로 계획의 목적은 화방 오염 예상 지역에 대해 이동 로봇이 정찰을 수행하여 오염 위치의 파악 및 오염지역의 윤곽을 추정하는 것이므로, 이를 위해 오염 위치를 찾아내기

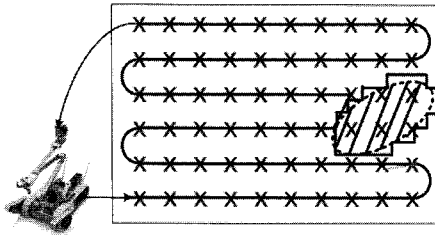


그림 3. 격자 커버리지와 윤곽 발견 방법.

Fig. 3. Grid coverage and contour finding method.

위한 격자 커버리지 방법 및 오염지역의 윤곽 발견 방법을 제안한다.

우선 확산법칙이 적용된[10] 오염지역 예측 프로그램인 SCIPUFF[11]를 이용하여 오염시작점이 점이라는 가정으로 간단한 시뮬레이션을 수행하면, 바람 부는 평지에서 오염 농도 준위 별 윤곽은 단일 폐곡선으로 이루어져 있으며, 타원의 모양을 갖고 있다는 사실을 확인할 수 있다.

화생방 첩보를 기반으로 타원형 오염지역에 대한 초기 발견을 위해서는 그림 3과 같이 주어진 영역에 대하여 고농도 영역을 제외한 격자 커버리지가 필요하다.

격자 커버리지를 통해 오염지역에 대한 초기 발견이 이루어졌다면, 현재 휴대용 화학 센서의 측정 상한선을 고려하여 구체적인 윤곽을 찾아야 한다. 센서들은 저농도의 오염환경에서는 일정 주기마다 계속해서 탐측을 할 수 있는 반면, 고농도의 오염환경에서는 장비 오염이 일어나거나 EMP (Electro Magnetic Pulse)에 의해 전자 장비가 망가지는 등의 문제가 있으므로, 그림 3과 같이 고농도의 오염지역(빛금친 부분)을 회피하며 오염지역의 윤곽을 발견하는 방법이 필요하다. 이 때 오염 기준 농도는 화학 센서 특성에 의해 정해진다.

III. 시간 효율적인 화학 정찰 경로 계획 알고리즘 제안

본 장에서는 장애물이 없는 평지 환경에서 타원형의 오염지역이 예상될 때, 시간 효율적인 정찰을 위한 격자 커버리지 알고리즘과 윤곽 발견 알고리즘을 제안하고, 단일 로봇이나 두 대, 네 대의 이동 로봇의 효과적인 화학 정찰을 위한 격자 및 윤곽 경로계획 알고리즘을 제안한다.

1. 오염도 격자 커버리지 알고리즘

그림 4와 같이 back and forth motion을 이용하여 격자점을 커버리지는 문제는 TO (Translation Only)와 TR (Translation & Rotation)구간으로 나누어진다. TO 구간은 최대 선속도와 최대 가속도를 이용함이 시간 효율적이다. 따라서 TR 구간에 대한 시간 효율적인 경로 계획이 중요하다. 이를 위해 야외에서 여섯 격자점을 통과하는 직진 및 회전 구간의 격자 커버리지 문제에 대한 직선과 호로 이루어진 다섯 가지 경로 계획을 비교 분석한다.

격자점을 커버리지는 경로는 직선 구간(T), CW 방향 회전 구간(R), CCW 방향 회전 구간(C)으로 이루어지는데, 각 구간에서의 이동은 가속(acceleration), 등속(cruise), 감속(deceleration)을 통해 이루어지고 제안되는 경로는 아래와 같이 5가지 형태이다.

제안된 경로는 정지 후 회전을 이용해 직선구간만으로 이루어진 T 방법(그림 5(a)), 하나의 곡선 회전구간을 이용한 R

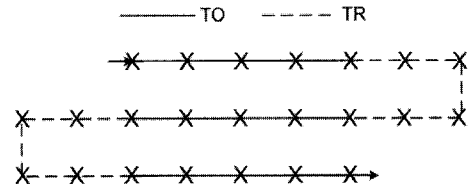


그림 4. 격자 커버리지 환경.

Fig. 4. Grid coverage environment.

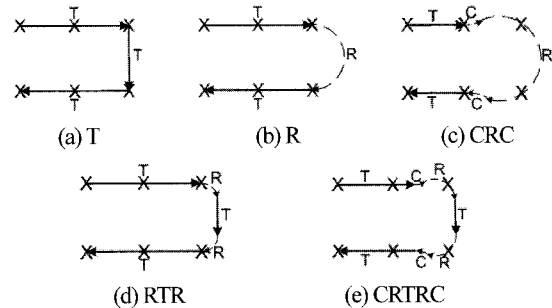


그림 5. 격자 커버리지 경로.

Fig. 5. Grid coverage path.

방법(그림 5(b))이 있다. 그리고, 세 개의 원호로 회전구간이 이루어져 있는 CRC 방법(그림 5(c))은 원호의 조합을 이용해 경로의 회전반경을 크게 하여 선속도를 빠르게 하기 위해 제안되었다. 격자간 거리를  $d$ 로 표현할 때, R 방법의 회전 반경이  $0.5d$ 이라면, CRC 방법의 회전반경은 약  $0.6446d$ 로 약 28.9%만큼 회전반경이 길어질 수 있는 점을 이용한다. 그리고 RTR 방법(그림 5(d))이나 CRTRC 방법(그림 5(e))은 격자간 거리가 긴 영역에 대하여 R 방법이나 CRC 방법이 지나치게 많은 곡선구간을 갖는 점을 보완하기 위해 사이에 직선구간을 추가하여 시간 효율성을 향상 시키기 위해 제안되었다.

2. 오염지역 윤곽 발견 알고리즘

격자 커버리지를 통해 주어진 영역에 대해 구체적인 오염지역에 대한 초기 발견이 이루어졌다면, 오염지역의 윤곽을 발견해야 한다. 현용 오염지역 윤곽 발견 알고리즘(Prev) [1,8]은 위험도가 높은 환경에서 인명 피해를 막기 위해 90도로 정지 후 회전을 하면서 오염지역을 파악한다. 설계된 체계에서는 이동 로봇의 강인한 특성 및 센서의 성능을 이용하여 보다 시간 효율적으로 타원형 오염지역의 윤곽을 발견하는 두 가지 알고리즘으로 BCF와 BCPEP를 제안한다.

2.1 BCF (Bounded Contour Finding) 알고리즘

화학 센서가 고농도의 오염지역에서 성능을 낼 수 없다는

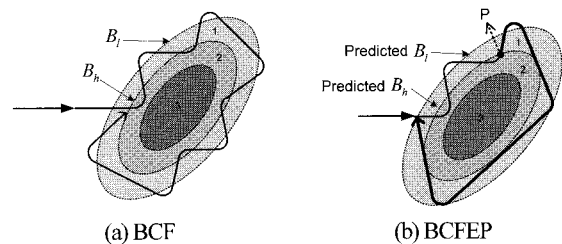


그림 6. 제안된 윤곽 발견 알고리즘.

Fig. 6. Proposed contour finding algorithm.

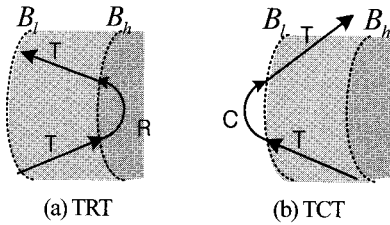


그림 7. TRT, TCT 방법.  
Fig. 7. TRT, TCT method.

점을 고려하면 화방 정찰용 이동 로봇의 오염 농도 허용 범위를 설정할 수 있다. 이로 인해 단순히 오염지역의 안전상의 위험도로 탐측을 하는 기존의 알고리즘보다 고농도의 오염지역을 탐측할 수 있게 되고, 상대적으로 직선구간이 길어지게 되어 시간 효율성을 향상시킬 수 있기 때문에 이를 위해 오염지역의 윤곽을 발견하는 기준농도로 고농도( $B_h$ )와 저농도( $B_l$ )의 오염도 경계값을 설정한다. 회전 구간에서는 기존의 정지 후 회전방법에 비해 시간 효율성을 향상시키기 위하여 곡선회전 방법을 제안하는데, 그림 7과 같은 직진-시계방향 회전-직진(TRT) 또는 직진-반시계방향 회전-직진(TCT)의 로봇 이동 방법이다.

이동 로봇의 위치 좌표는  $(x_r, y_r)$ , 처음 탐측된 고농도의 오염경계값의 추정된 위치는  $(x_h, y_h)$ , 저농도의 오염경계값의 추정된 위치는  $(x_l, y_l)$ 로 나타낸다.

BCF 알고리즘의 과정은 다음과 같다.

- Step 1: 고농도와 저농도의 오염 경계값( $B_h, B_l$ )을 설정한다. (현재 운용되는 이동 로봇과 센서의 허용 가능한 탐측 범위 및 일반적인 오염상황에 대해 주어진 알고리즘을 통해 충분한 수의 고농도와 저농도의 오염 경계값이 탐측된다고 가정한다.)

- Step 2: 센서값이 탐측기준보다 높으면, 오염지역 윤곽 발견을 시작하는데, 처음 탐측된 고농도와 저농도의 오염경계값을 통과하는 두 점을 잇는 벡터를  $\overline{HL}(x_h - x_l, y_h - y_l, 0)$ 라고 하고, 저농도의 오염경계값을 통과하는 점과 현재 로봇의 위치를 잇는 벡터를  $\overline{RL}(x_r - x_l, y_r - y_l, 0)$ 라고 한다. 그리고, 두 벡터의 사잇각을  $\theta_l$ 라고 한다(그림 8).

- Step 3: 직진이동하면서 센서값이  $B_h$ 보다 크면 R구간,  $B_l$ 보다 작으면 C구간을 그리며 곡선회전 한다.

Step 3-1: R구간 회전 중에 센서값이  $B_h$ 보다 작거나 시간에 따른 센서값의 변화량이 0보다 작으면 직진이동한다.

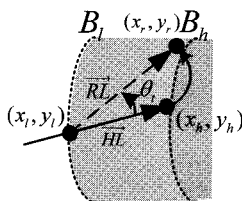


그림 8. BCF 알고리즘 종료 조건.  
Fig. 8. Termination condition of BCF algorithm.

Step 3-2: C구간 회전 중에 센서값이  $B_l$ 보다 크거나 시간에 따른 센서값의 변화량이 0보다 크면 직진이동한다.

- Step 4: 그림 8의  $\theta_l$ 의 부호가 음수(-)에서 양수(+)로 바뀌면 정찰이 완료된다. 이를 위해  $\overline{HL} \times \overline{RL}$ 의 부호를 기준으로 하는데,  $\overline{HL} \times \overline{RL} = |\overline{HL}| \cdot |\overline{RL}| \cdot \sin\theta_l$ , 이므로  $\overline{HL} \times \overline{RL}$ 의 부호와  $\theta_l$ 의 부호가 같기 때문에 판단 기준이 될 수 있다.

- Step 5: 오염 기준 농도에 해당하는 위치는 센서값으로부터 선형 보간법을 이용하여 추정하고, 오염 기준 농도의 위치들로부터 타원형 오염지역의 윤곽을 추정한다.

### 2.2 BCFEP (Bounded Contour Finding with Ellipse Prediction) 알고리즘

BCFEP 알고리즘은 BCF 알고리즘에 오염지역에 대한 예측을 포함한 것이다. 그림 6(b)의 P점까지의 정보로 오염지역을 미리 예측할 수 있다면, 오염지역에 대한 정보를 예상하여  $B_h$ 에 해당하는 타원형 영역과 접하는 경로 계획을 세울 수 있게 되고 이로 인해 시간 효율성의 향상을 기대할 수 있다. 타원형의 오염지역을 결정하거나 예측하기 위해서 오염 기준 농도로 추정된 5개 이상의 점  $P_i$ 가 필요한데, 오염 지역의 지나친 일부분에 의한 예측을 방지하기 위하여 임계값  $\theta_h$ 를 설정하여 오차가 있는 오염 지역을 예측하는 기준으로 이용한다. 그림 9와 같은 타원형의 오염지역에서 n개 점의 농도가 측정되었을 때  $c_n$ 는 식(4)와 같이 정의된다.

$$c_n = \max \left[ \left( \frac{b_i}{a_n} \right), i = 2, \dots, n-1 \right] \quad (4)$$

여기서  $a_n$ 은 선분  $p_i p_n$ 의 길이,  $b_i$ 는  $p_i$ 와  $p_i p_n$ 과의 거리를 나타낸다.  $c_n \geq \theta_h$ 의 조건을 만족하면 획득한 점  $p_i$ 들이 예측하고자 하는 타원의 상당한 부분에 해당한다고 판단되므로, 이 점들을 사용하여 타원 축, 기준 오염 농도 곡선을 예측해 낸다. 이를 이용해 고농도와 저농도의 오염지역 곡선에 대한 타원을 생성한다.

제안된 BCFEP 알고리즘은 다음과 같은 절차로 수행된다.

- Step 1:  $c_n < \theta_h$ 이면 BCF 알고리즘을 이용하여 오염지역의 윤곽을 발견한다.

- Step 2:  $c_n \geq \theta_h$ 이면, 선형 보간법을 이용한 타원 추정 알고리즘을 통해 오차가 있는 타원형 오염지역을 추정한다.

- Step 3: 추정된 대략적인 오염지역의 장축과 단축을 일정한 비율로 축소, 확대시켜 고농도 및 저농도의 오염 기준

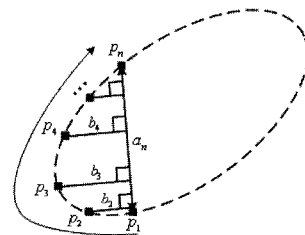


그림 9. 타원 예측 조건.  
Fig. 9. Condition for ellipse prediction.

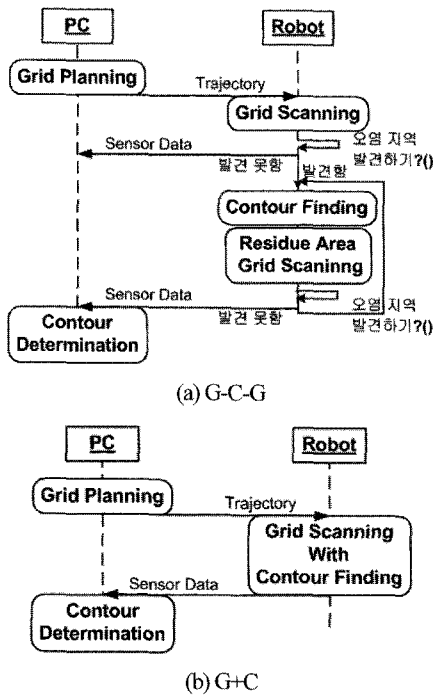


그림 10. 격자 및 윤곽 발견 알고리즘.  
Fig. 10. Grid and contour finding algorithm.

지역을 추정하고, 이를 이용해 고농도의 오염지역을 의미하는 타원과 접하는 이동 경로를 생성한다.

• Step 4: 종료 조건을 만족하면 정찰이 완료된다. (BCF 알고리즘과 동일)

3. 단일 이동 로봇을 위한 격자 및 윤곽 경로 계획 알고리즘

오염도 격자 커버리지와 오염지역 윤곽 발견 방법을 모두 수행함에 있어, 순차적으로 정찰을 수행하는 G-C-G 방법과 두 방법간의 경로의 중복을 줄이기 위한 G+C 방법을 제안한다. 각 방법의 순서 다이어그램은 그림 10과 같이 주어지고, G와 C과정은 앞 절의 알고리즘들 중 하나를 사용한다. 이때 오염지역의 발견을 위해 Morse decomposition[12]로 인헤셀을 분할하고, DFS (Depth-First Search) algorithm[13]에 의한 순서로 셀의 커버리지를 수행한다.

이동 로봇을 이용해 화방 정찰을 신속하게 수행하기 위해서는 앞서 설명한 격자 커버리지 방법이나 윤곽 발견 알고리즘을 효과적으로 이용해야 한다. 실제로 정찰이 수행될 때, 화학병이 초기 위치로 돌아오기 때문에 초기 위치와 최종 위치가 같아야 한다. 이 때 이동 로봇이 초기 위치로부터 초기 격자점까지로 이동하거나 격자 커버리지를 완료하고 최종 위치로 돌아오게 되는 상황에서는 Dubins' curve[14]의 곡선 회전을 이용해 시간 효율성을 향상시킬 수 있다.

4. 두 대 및 네 대의 이동 로봇을 위한 격자 및 윤곽 경로 계획 알고리즘

설계된 화방 정찰 로봇 체계는 화생방 정찰차에 탑승한 두 명의 조작병과 조정되는 최대 네 대의 이동 로봇을 포함하고 있다. 한 명의 조작병이 한 대의 로봇을 조작할 경우를 포함한다면, 두 대 및 네 대의 이동 로봇을 위한 경로 계획도 필요하다. 이를 위해 본 절에서는 두 대 및 네 대의 이동 로봇을 운용하여 정찰을 수행할 때, 각 로봇들이 협력적인 커버

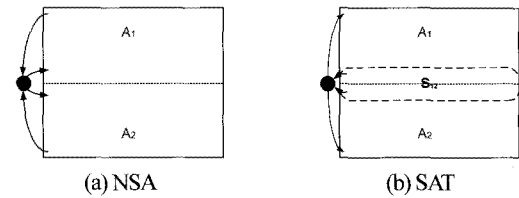


그림 11. 두 대의 이동 로봇을 위한 공유 영역 설정.  
Fig. 11. Shared area selection for two mobile robots.

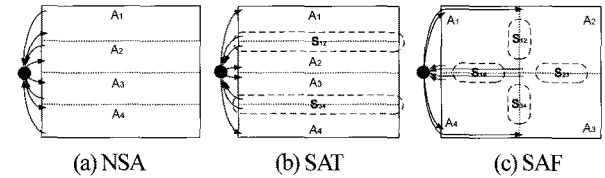


그림 12. 네 대의 이동 로봇을 위한 공유 영역 설정.  
Fig. 12. Shared area selection for four mobile robots.

리지를 수행하여 정찰의 최종 완료 시간을 최소화할 수 있는 방법으로 공유 영역을 설정하는 방법을 제안한다.

각각의 로봇에 동일한 영역을 할당하고 정찰을 수행해도 오염지역의 유무에 따라 정찰 완료 시간에 격차가 생기므로, 이를 최소화하기 위해 정찰완료에 앞서 공유영역(shared area)을 설정하고 협력적인 커버리지를 수행할 수 있도록 한다. 그림 11은 초기 위치와 최종 위치가 같은 화방 정찰 상황에서 공유영역이 없는 방법인 NSA (No Shared Area)와 두 로봇의 운용을 위하여 할당영역(A)과 공유영역(S)을 이용한 SAT (Shared Area for Two robots) 방법을 나타낸 것이다.

하지만 네 대의 로봇을 운용하는 경우는 SAT방법만으로는 그림 12(b)와 같이 모든 로봇이 영역을 공유할 수 없다. 따라서, 그림 12(c)와 같이 모든 로봇이 서로 공유영역을 이용할 수 있는 방법으로 SAF (Shared Area for Four robots)를 제안한다.

IV. 시뮬레이션 및 실험

본 장에서는 컴퓨터 시뮬레이션과 간단한 실험 수행을 통해 화방 정찰 로봇 체계를 위한 경로 계획 알고리즘의 시간 효율성을 검증해 보았다. 속도와 가속도의 제한조건 내에서 시뮬레이션을 수행하였고, 간단한 환경에서 실제 이동 로봇을 이용하여 제안된 윤곽 발견 방법에 대해 실험하였다.

1. 시뮬레이션

시뮬레이션 수행은 MATLAB을 통해 이루어졌고, 적분을 위한 ode45 함수와 least square fit을 통한 타원 추정을 위한 ellipsefit 함수[15]를 이용하였고, search algorithm으로 Netwon-Raphson method와 binary search method를 사용하였다. 시뮬레이션에 이용되는 이동 로봇은 선속도 1500 mm/s, 선가속도 2000 mm/s<sup>2</sup>, 각가속도 300 deg/s<sup>2</sup>의 제한조건을 적용하였다.

1.1 격자 커버리지 알고리즘

Configuration  $z = (x, y, \theta, v, w)$  를 의미하고, 격자점간의 거리를 d라고 하면, 커버리지를 할 격자점 6개가 (0,0), (d,0), (2d,0), (2d,d), (d,d), (0,d)일 때, 초기와 최종 configuration이  $z_s = (0, 0, 0^\circ, 0, 0)$ ,  $z_f = (0, d, 180^\circ, 0, 0)$  인 조건을 이용한다. 그리고 격자 거리를 화방 정찰 시 운용되는 2~50m의 범위 내

표 1. 격자 커버리지 소요시간 (단위: 초).

Table 1. Time consumption of grid coverage (unit: sec).

d	T	R	CRC	RTR	CRTRC
2	10.3576	8.4886 (18.0%)	8.3598 (19.3%)	8.5405 (17.6%)	<b>8.3172 (19.7%)</b>
5	20.3576	19.4813 (4.3%)	18.9317 (7.0%)	18.5405 (8.9%)	<b>18.3671 (9.8%)</b>
10	37.0242	37.9956 (-2.6%)	36.2992 (2.0%)	35.2061 (4.9%)	<b>35.0338 (5.4%)</b>
20	70.3576	75.1059 (-6.7%)	71.4214 (-1.5%)	68.5405 (2.6%)	<b>68.3671 (2.8%)</b>
50	170.3576	186.5047 (-9.5%)	177.3068 (-4.1%)	168.5405 (1.1%)	<b>168.3671 (1.2%)</b>

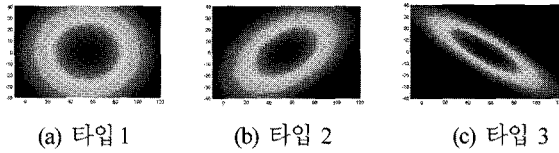


그림 13. 오염지역의 예.

Fig. 13. Example of contaminated area.

에서 격자 커버리지 알고리즘에 대한 시뮬레이션을 수행하면, 소요시간은 표 1과 같이 나타난다. 격자간의 거리가 길어질수록 최대속도로 유지되는 직선구간의 비율이 늘어나기 때문에, 방법에 따른 시간 효율성의 향상도는 줄어들게 된다. 실험 결과, 다섯 가지 제안된 격자 커버리지 방법들 중 격자 점간의 거리가 실제 화방 정찰 시 운용되는 범위에 대해서는 CRTRC 방법이 가장 시간 효율적으로 격자를 커버리지할 수 있는 방법임을 확인하였다.

1.2 윤곽 발견 알고리즘

오염지역을 그림 13과 같은 타원 형태로 설정하고, 기존의 방법(Prev), BCF 알고리즘, BCFEP 알고리즘을 시뮬레이션하였다. 오염지역은 확산 법칙에 의거한 가우시안 분포의 타원 형태로 모델링하였다.

시뮬레이션 결과, 표 2를 통해 오염 지역 윤곽 발견 알고리즘에 대한 소요시간을 비교해보면 BCF와 BCFEP 두 방법 모두 기존의 방법(Prev)에 비해 시간 효율성이 향상되었고 이 가운데 BCFEP 알고리즘이 가장 시간 효율적으로 오염지역의 윤곽을 발견하는 방법임을 보였다. 이 중 그림 14에서는 타입 2에 대한 각 알고리즘이 적용된 이동 경로를 보여주고 있다. 단, 이 때 현용 화방 정찰 방법(Prev)은 90도의 고정된 각으로 정지후 회전하는 방법으로 허용 농도의 범위( $B_r, B_l$ )는 동일하게 적용하였고, BCF와 BCFEP 알고리즘은 TCT, TRT 방법을 이용한 곡선회전을 이용하였다.

그림 15에서는 BCFEP 알고리즘을 통해 탐측된 센서 데이

표 2. 윤곽 발견 방법 소요시간 (단위: 초).

Table 2. Time consumption of contour finding algorithms (unit: sec).

오염 형태	Prev	BCF	BCFEP
타입 1	310.5	194.7 (37.3%)	<b>181.7 (41.5%)</b>
타입 2	290.4	176.1 (39.4%)	<b>167.8 (42.2%)</b>
타입 3	360.9	191.5 (46.9%)	<b>170.8 (52.7%)</b>

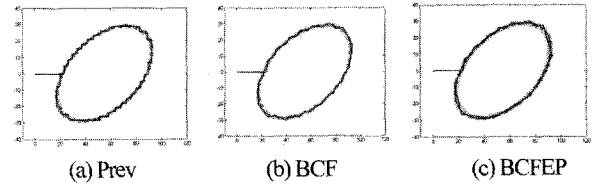


그림 14. 윤곽 발견 알고리즘을 이용한 경로.

Fig. 14. Trajectory using contour finding algorithm.

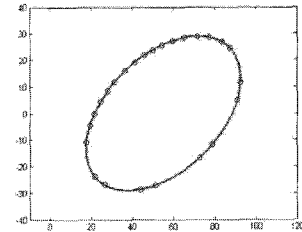


그림 15. 오염지역 윤곽 결정.

Fig. 15. Determination of contaminated area.

터를 기반으로 선형 보간법을 이용하여 오염지역의 윤곽을 결정한 결과이다. 이를 통해 오염도 윤곽 발견 알고리즘 및 윤곽 결정 알고리즘이 신뢰성 있게 오염지역 윤곽을 결정할 수 있음을 확인하였다.

1.3 단일 로봇을 위한 격자 및 윤곽 경로 계획 알고리즘

그림 16의 타원형 오염지역을 포함한 영역에 대해서  $z_x = (0, 0, 0, 0, 0)$ ,  $z_y = (0, 0, 180^\circ, 0, 0)$  과 같이 이동 로봇의 초기 및 최종 configuration이 주어지고,  $d=50m$ 일 때 격자 및 윤곽 경로 계획 알고리즘으로 제안된 G-C-G 방법과 G+C 방법에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 격자의 회전 구간에서 CRTRC 방법을 이용하였지만, 그림에서는 로봇의 경로를 지나가는 격자의 연결로 간략하게 표현하였다. 그 결과 표 3과 같이 경로의 중복을 피할 수 있는 G+C 방법이 시간 효율성이 더 우수함을 확인할 수 있었다.

1.4 두 대, 네 대의 이동 로봇을 위한 격자 및 윤곽 경로 계획 알고리즘

같은 크기의 영역이 주어져도, 표 3과 같이 오염영역의 유

표 3. 단일 로봇을 위한 경로 계획의 소요시간 (단위: 초).

Table 3. Time consumption of trajectory planning for single robot (unit: sec).

	Clean	G-C-G	G+C
소요시간	2544.5	2686.6 (-5.6%)	<b>2414.4 (5.1%)</b>

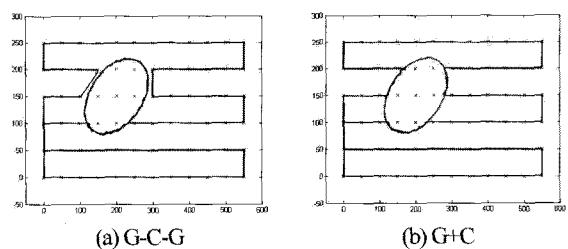


그림 16. 단일 로봇을 위한 경로 계획.

Fig. 16. Trajectory planning for single robot.

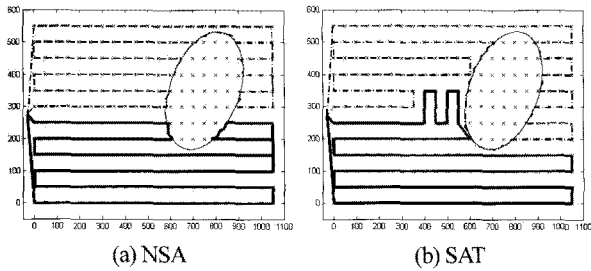


그림 17. 두 대의 로봇을 위한 경로 계획.

Fig. 17. Trajectory planning for two robots.

표 4. 두 대의 이동 로봇을 위한 경로 계획의 소요시간 (단위: 초).

Table 4. Time consumption of trajectory planning for two robots (unit: sec).

소요 시간	NSA	SAT
Robot 1(Upper)	4479.1	<b>4242.7</b>
Robot 2(Lower)	4130.4	<b>4275.9</b>
완료 시간	4479.1	<b>4275.9 (4.5%)</b>

무나 정찰 방법에 따라 정찰 완료시간에 차이가 있다.  $d=50m$ , 초기 및 최종 configuration은  $z_s = (-30, 275, 0^\circ, 0, 0)$ ,  $z_f = (-30, 275, 180^\circ, 0, 0)$  이고, 그림 17과 같은 영역이 주어졌을 때, 공유 영역의 유무에 따른 시간 효율성의 차이를 확인하기 위해 NSA, SAT 방법으로 시뮬레이션을 수행하여 아래와 같이 두 대의 이동 로봇을 위해 공유 영역을 설정한 경우와 하지 않은 경우의 시간 효율성을 비교하였다. 격자의 회전 구간에서 CRIRC 방법을 이용하였지만 그림 17과 18에서도 마찬가지로 로봇의 경로를 지나가는 격자의 연결로 간략하게 표현하였다.

그리고, 네 대의 이동 로봇을 위한 공유영역에 대한 비교를 위해서  $d=50m$ , 초기 및 최종 configuration은  $z_s = (-50,$

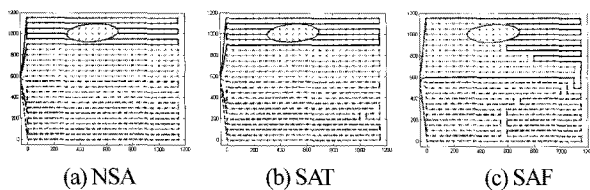


그림 18. 네 대의 로봇을 위한 경로 계획.

Fig. 18. Trajectory planning for four robots.

표 5. 네 대의 이동 로봇을 위한 경로 계획의 소요시간 (단위: 초).

Table 5. Time consumption of trajectory planning for four robots (unit: sec).

	NSA	SAT	SAF
Robot 1	5189.4	5403.0	<b>5101.7</b>
Robot 2	5001.7	5001.7	<b>5106.7</b>
Robot 3	5001.7	5206.2	<b>5130.6</b>
Robot 4	5382.9	5206.2	<b>5142.6</b>
완료 시간	5382.9	5206.2	<b>5142.6 (4.5%)</b>

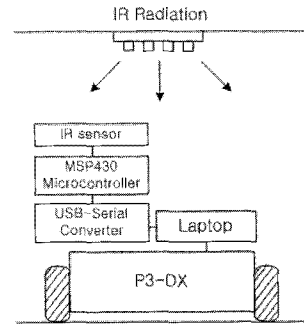


그림 19. 실험 환경.

Fig. 19. Experiment environment.

$575, 0^\circ, 0, 0)$ ,  $z_f = (-50, 575, 180^\circ, 0, 0)$  이고, 그림 18과 같은 영역이 주어졌을 때, NSA, SAT, SAF의 각 방법에 대해 시뮬레이션을 수행하여 공유 영역의 유무에 따른 시간 효율성의 차이를 비교하였다.

시뮬레이션 결과, 두 대의 로봇을 운용할 때는 SAT를 이용하는 것이, 네 대의 로봇을 운용할 때는 SAF를 이용하는 것이 가장 시간 효율적이었다. 따라서, 화방 정찰 시에 각각의 로봇들이 서로 모두 공유 영역을 갖고 최종 정찰 시간의 차이를 줄일 수 있는 경로 계획이 가장 시간 효율성을 향상시키는 방법이라는 것을 확인할 수 있다.

2. 실험

실제로 화방 정찰 실험을 하기 위해서는 화학 물질이나 방사능 물질을 투하한 후, 실제 방사능 센서와 화학 센서를 이용한 실험이 필요하다. 하지만 물질의 위험성과 센서의 고비용 등의 제한으로 인해 본 연구에서는 적외선을 이용한 실험 환경을 구성하였다. 천장에 적외선 발광부를 설치하여 오염 영역을 형성하고, 이를 이동로봇에 장착된 센서부를 통해 검출하는 방식을 이용하였다(그림 19).

2.1 실험 환경

상용화된 이동 로봇인 Pioneer 3-DX[16]를 이동 로봇으로, 노트북 컴퓨터를 OCU로 이용하였다. P3-DX는 충전 가능한 12V 배터리를 전원으로 이용하여 동작되며, 엔코더를 포함한 2개의 DC 모터에 의해 구동된다. Renesas SH2-7144 RISC microcontroller가 모터를 제어하고, 노트북 컴퓨터와의 통신은 RS-232 시리얼 통신을 통해 이루어진다. 이 microcontroller는 ARCOS (Advanced Robot Control and Operations Software)에 의해 관리된다.

노트북 컴퓨터는 이동 로봇을 제어하고, 센서부의 신호를 받아들이는 데에 이용된다. 이동 로봇은 선속도와 각속도 프로파일에 의해 제어되며, piecewise linear한 속도 프로파일을 이용해 10ms 주기로 제어가 이루어진다. 노트북 컴퓨터와 이동 로봇과의 통신은 시리얼 포트를 통해 115Kbps 보드레이트로 연결되어 이루어지는데, Windows나 Linux의 일반적인 환경에서는 정확한 10ms 제어가 어렵기 때문에 Real-Time Application Interface (RTAI)[17]를 이용하여 제어를 수행하였으며, 구성된 실험환경은 아래와 같다.

• 발광부: 하나의 발광단은 IRED (SI5315-H)와 저항 1개씩으로 이루어져 있으며, 이러한 발광단 8개를 일렬로 조합하여 발광부를 구성하였다. 이렇게 일렬로 배열된 발광부

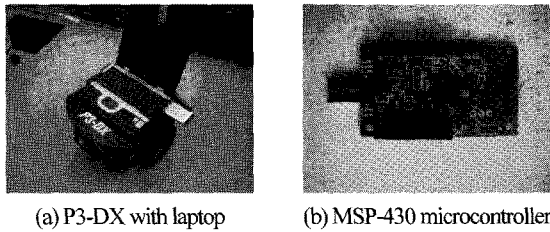


그림 20. P3-DX와 MSP430 microcontroller.  
Fig. 20. P3-DX and MSP430 microcontroller.

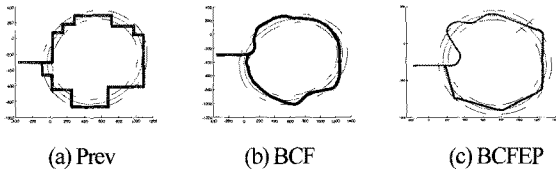


그림 21. 윤곽 발견 방법 실험 결과.  
Fig. 21. Experiment result of contour finding algorithm.

표 6. 실험 결과 소요 시간 (단위: 초).  
Table 6. Time consumption of experiment (unit: sec).

	Prev	BCF	BCFEP
소요시간	138.8314	75.0641 (45.9%)	72.985 (47.4%)

로 인해 가로축이 세로축보다 긴 타원형 오염지역을 형성할 수 있다.

- 센서부: 발광부에 의해 발광된 적외선은 센서부의 포토 트랜지스터에 의해 흡수된다. 그런데 거리가 멀면 적외선의 흡수량이 너무 작아서 센서로서의 역할이 어렵기 때문에 신호의 증폭이 필요하다. 이를 위해 npn 트랜지스터와 포토 트랜지스터를 조합한 달링턴 포토 트랜지스터를 구성했다. 구성된 트랜지스터를 통해 빛의 세기에 의해 출력 전압의 세기가 변하는 점을 이용하여 MSP microcontroller의 12-bit ADC를 이용하여 전압 값을 디지털 값으로 변환하고, 그 값을 노트북 컴퓨터로 보내어 센서 데이터로 이용하였다.

2.2 윤곽 발견 실험

구축된 실험 환경에서 제안된 윤곽 발견 알고리즘에 대한 실험을 수행하였다. 실험을 위한 이동 로봇의 선속도 200 mm/s, 선가속도 1000 mm/s<sup>2</sup>, 각가속도 200 deg/s<sup>2</sup> 같은 속도 제한조건을 갖고, 현용 윤곽 발견 방법(Prev)과 제안된 BCF 및 BCFEP 알고리즘을 이용하여 적외선 방출 지역의 윤곽을 발견하였고, 그 결과는 그림 21과 같다.

실험을 수행하면 각 알고리즘 별로 시뮬레이션과 유사한 경향을 갖는 경로를 생성하고 따라감을 확인할 수 있다. 그리고, 시간 소모량을 비교해 보면, 표 6과 같이 시뮬레이션과 마찬가지로 제안된 BCFEP 알고리즘이 다소간의 오차가 발생하였지만, 가장 시간 효율적으로 정찰을 수행할 수 있고, 오염지역의 윤곽을 발견해 내는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론 및 추후 과제

본 연구에서는 안전성 및 신속성 향상을 위한 화방 정찰의 부분적인 무인화를 위하여 화방 정찰 로봇 체계 및 임무를

설계하고, 신속한 정찰을 위하여 오염도 격자 커버리지와 오염 지역 윤곽 발견 방법을 포함한 경로 계획 알고리즘을 연구하였다.

격자 커버리지를 위해 5가지 경로 패턴을, 오염지역 윤곽 발견을 위해 BCF 알고리즘과 BCFEP 알고리즘을 제안하였다. 그리고 두 가지 알고리즘을 이용하여 단일 로봇을 위한 경로 계획으로 G-C-G 방법과 G+C 방법을, 두 대 또는 네 대의 로봇 이용 시 협력적인 커버리지를 위한 공유 영역을 설정하는 방법을 제안하고 각 방법에 대한 시간 소모량을 분석하였다.

시뮬레이션 및 실험을 통해 CRTRC 방법이 격자 거리가 2m일 때 최대 19%까지, BCFEP 알고리즘은 최대 52.7%까지 시간효율성을 향상시키는 것을 확인하였다. 그리고 G+C 방법이 G-C-G 방법에 비해 10%, 공유영역을 설정하는 SAT, SAF 방법도 각 경우에 대해 NSA방법에 비해 4.5%씩 시간 효율성을 향상시킴을 확인하였다. 오염 지역 윤곽 발견 알고리즘 중에서는 BCFEP 알고리즘이 실험 결과, 현용 알고리즘에 비해 47.4%나 효율성이 향상시켰음을 확인하였다.

결론적으로 본 논문에서는 이동 로봇을 포함한 화방 정찰 체계 및 임무를 설계함으로써, 안전성 보장을 위한 화방 정찰의 부분적인 무인화를 제안하고, 시간 효율적인 경로 계획 알고리즘들을 통해 화방 정찰 임무를 신속하게 수행할 수 있게 하였다.

추후과제로는 이동 로봇의 동역학에 기반하고 경로 제어 문제 등을 고려하여 문제를 풀이하는 것이다. 복잡한 알고리즘의 전개가 예상되지만, 최소시간 문제에 대한 최적의 해를 얻을 수 있으리라고 생각된다. 그리고, 임의의 다수의 이동 로봇에 대한 고려, 장애물이 있는 환경에서의 장애물 회피, 그리고 언덕이 있는 지형에서의 탐지 등 보다 일반적인 상황을 가정하여 운용 범위를 확장하고, 획득한 화방 정보 및 다른 센서 정보(기상, 지형, 온도)를 이용하여 시간에 따른 화방 오염도를 예측하는 연구 등이 있다.

참고문헌

- [1] 육군 본부, 화생방 정찰, 야전교범 no. 3-30, 1990.
- [2] Department of the Army, NBC Reconnaissance, Field Manual no. 3-19, 1993.
- [3] 육군 본부, 화생방 정찰장비 운용, 야전교범 no. 37-7, 2006.
- [4] PackBot, iRobot Co. <http://www.irobot.com/sp.cfm?pageid=109>
- [5] Woo Sub Lee, "ROBHAZ-DT3: teleoperated mobile platform with passively adaptive double-track for hazardous environment applications," Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, 2004.
- [6] 김병국, "화생방 정찰과 매설물 탐지의 무인화 기법," 기계저널, 제47권 제11호, pp. 62-67, 2007.
- [7] 김재성, "무인 화방 정찰 체계에서 이동 로봇을 위한 시간 효율적인 격자 커버리지와 윤곽 발견방식에 대한 연구," ADD-KAIST 제 3회 군사용 로봇 워크샵, 창원, 한국, pp. 215-218, Oct. 2008.
- [8] M. Fields, "Developing a chemical reconnaissance behavior for unmanned ground vehicles using the OneSAF battlefield simulation tool," ARL-TR-2972, Army Research Laboratory,



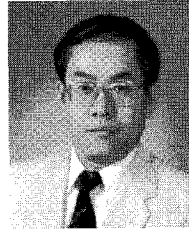
May 2003.

- [9] J. C. Alexander and J. H. Maddocks, "On the kinematics of wheeled mobile robots," *International Journal of Robotics Research*, vol. 8, pp. 15-27, 1989.
- [10] E. L. Cussler, *Diffusion, Mass Transfer in Fluid Systems*, Cambridge University Press, NY, 1986.
- [11] SCIPUFF. <http://www.titan.com/products-services/abstract.html?docID=336>.
- [12] E. U. Acar, "Morse decomposition for coverage tasks," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 21, no. 4, pp. 331-344, April 2002.
- [13] R. Tarjan, "Depth-first search and linear graph algorithms," *SIAM Journal on Computing*, pp. 146-160, June 1972.
- [14] L. E. Dubins, "On curves of minimal length with a constraint on a average curvature and with prescribed initial and terminal positions and tangents," *American Journal of Mathematics*, vol. 79, pp. 497-516, 1957.
- [15] R. Halif and J. Flusser, "Numerically stable direct least squares fitting of ellipses," Department of Software Engineering, Charles University, Czech Republic, Technical Report, 2000.
- [16] ActivMedia Robotics, *Pioneer 2 General Purpose Robot*.
- [17] Lineo, Inc, *DIAPM RTAI Programming Guide 1.0*, Sep. 2000.



### 김재성

1984년 7월 31일생. 2007년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 2009년 KAIST 전기 및 전자공학과 석사. 2009년~현재 동 대학원 전기 및 전자공학과 박사과정 재학 중. 관심분야는 이동 로봇, 최적 시간 경로 계획.



### 김병국

1952년 10월 5일생. 1975년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1975년 KAIST 전기 및 전자 공학과 석사. 1981년 동 대학원 박사. 1981년~1986년 우진계기(주) 연구실장. 1982년~1984년 University of Michigan 방문연구. 1986년~현재 KAIST 전기 및 전자공학과 교수. 관심분야는 실시간 시스템, 로보틱스, 임베디드 제어.