

# 비평지 및 먼지 환경에서 1차원 가상힘장 알고리즘의 실험적 검증

최덕선<sup>\*1)</sup> · 주상현<sup>1)</sup> · 박용운<sup>1)</sup> · 박진배<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제5기술연구본부

<sup>2)</sup> 연세대학교 전기전자공학과

## Experimental Verification of 1D Virtual Force Field Algorithm on Uneven and Dusty Environment

Tok Son Choe<sup>\*1)</sup> · Sang-Hyun Joo<sup>1)</sup> · Yong-Woon Park<sup>1)</sup> · Jin-Bae Park<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> *The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

<sup>2)</sup> *Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Korea*

(Received 3 February 2017 / Revised 11 July 2017 / Accepted 22 September 2017)

### ABSTRACT

In this paper, we deal with the experimental verification of 1D virtual force field algorithm based reflexive local path planning on uneven and dusty environment. The existing obstacle detection method on uneven and dusty environment and 1D virtual force field based reflexive local path planning algorithm simply are introduced. Although the 1D virtual force field algorithm is verified by various simulations, additional efforts are needed to verify this algorithm in the real-world. The introduced methods are combined with each other, installed to real mobile platforms and verified by various real experiments.

Key Words : 1D Virtual Force Field, Reflexive Local Path Planning, Uneven and Dusty Environment

### 1. 서론

실외환경에서 주행하는 무인차량은 자동차 제조사, IT 업체, 학교, 연구소 및 방산업체 등 많은 기관들이 연구 및 개발을 수행하고 있다<sup>1-3)</sup>. 일부 민수용 무인차량의 경우 수 년 내에 양산 직전 단계의 기술을 보

유하고 있으며(구글 등)<sup>4)</sup>, 군수용 무인차량의 경우 배치되어 활용되고 있는 경우(이스라엘 Guardium 등)<sup>5)</sup>도 다수 존재한다.

실외환경에서 자율주행하는 무인차량의 핵심 기술은 크게 인식, 판단, 작동 계층들로 분류할 수 있다. 인식 계층은 다양한 센서(CCD/IR Camera, Stereo Camera, 2D/3D LIDAR, Radar 등)를 활용하여 3차원으로 형상을 재구성하거나 장애물을 탐지하는 등 무인차량이 주행할 수 있는 주행환경 정보를 제공하는 계층이다. 판

\* Corresponding author, E-mail: tschoe@add.re.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

단 계층은 기 획득된 정보(지도 등)와 인식 계층에서 제공되는 정보(3차원 월드모델 등)를 활용하여 무인차량이 추종해야할 경로점들이나 제어 명령을 생성하는 계층이다. 작동 계층은 판단 계층에서 생성된 경로점이나 제어 명령을 추종하기 위한 무인차량의 모터나 제어기에 직접적인 제어 명령을 생성하는 계층이다.

본 논문에서는 실외환경에서 자율주행을 수행하는 무인차량의 핵심 기술들 중에서 비평지 및 먼지환경에서의 장애물 탐지와 반응적인 지역경로계획 기술을 다룬다. 본 논문은 관련 연구들인 비평지 및 먼지환경에서의 무인지상차량을 위한 장애물 탐지<sup>[6]</sup>과 이동로봇의 반응적인 지역경로계획을 위한 1차원 가상힘장 알고리즘<sup>[7]</sup>을 기반으로 한다. 평지를 가정하고 다양한 시뮬레이션들을 통해 검증된 1차원 가상힘장 알고리즘과 비평지 및 먼지환경의 장애물 탐지방법을 적용하여 시뮬레이션 상으로만 검증된 1차원 가상힘장 알고리즘을 비평지 및 먼지 환경에서 다양한 시험을 통해 그 실용성을 검증한다.

1차원 가상힘장 알고리즘<sup>[7]</sup>은 태생적으로 평지 환경에서 동작되게 설계되었다. 1차원 가상힘장 알고리즘을 야지 환경에 적용하기 위해서는 3차원의 장애물 정보를 1차원 가상힘장 알고리즘이 처리할 수 있는 1차원 장애물 정보로 변환해야만 가능하다. 3차원 장애물 정보를 1차원 장애물 정보로 변환하는 연구는 비평지 및 먼지환경에서의 무인지상차량을 위한 장애물 탐지<sup>[6]</sup> 결과를 활용한다. 따라서, 본 논문이 기여하는 바는 평지 및 먼지환경에서의 무인지상차량을 위한 장애물 탐지의 연구결과를 1차원 가상힘장 알고리즘에 적용하여 시뮬레이션 환경 뿐만 아니라 실제 야지 환경에서도 1차원 가상힘장 알고리즘이 실용성이 있음을 입증한 것이다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 관련 연구 2가지에 대해 간략히 설명한다. 우선 이동로봇의 반응적인 지역경로계획을 위한 1차원 가상힘장 알고리즘을 설명하고 다음으로 비평지 및 먼지환경에서의 무인지상차량을 위한 장애물 탐지에 대해 설명한다. 3장에서는 장애물 탐지와 반응적인 경로계획을 위해 구현된 시스템 및 설정 파라미터들에 대해 간략히 설명한다. 4장에서는 관련 연구들을 결합하여 1차원 가상힘장 알고리즘이 비평지 및 먼지 환경의 고정 및 이동 장애물들이 존재하는 복잡한 환경에서도 유효한지를 검증하기 위한 실험환경, 실험결과 및 분석내용을 소개한다. 마지막으로 5장에서 결론을 기술한다.

## 2. 관련 연구

### 2.1 1차원 가상힘장 알고리즘<sup>[7]</sup>

반응적인 경로계획 알고리즘 연구에 있어서 잠재장 방법(Potential Field Method)<sup>[8-10]</sup>와 벡터장 히스토그램(Vector Field Histogram)<sup>[11-13]</sup>이 대표적인 방법이다. 잠재장 방법은 가상의 척력과 인력을 사용한다. 이 힘들은 목표점과 장애물들에 의해 생성된다. 두 힘이 겹쳐진 지도 상에서 이동로봇은 지도의 경사도를 활용하여 시작점으로부터 목적지까지 경로를 생성한다. 벡터장 히스토그램은 월드모델로서 2차원의 히스토그램 격자(Histogram Grid)를 사용한다. 이 월드모델은 이동로봇에 장착된 거리센서에 의해 갱신된다. 충돌을 피하기 위해 벡터장 히스토그램은 2 단계를 거쳐 작동한다. 첫 번째 단계에서는 히스토그램 격자가 극 히스토그램(Polar Histogram)으로 변환된다. 극 히스토그램의 각각의 섹터는 극 장애물 밀도(Polar Obstacle Density)로 대표되는 값을 가진다. 두 번째 단계에서는 원하는 조향방향에 가깝고 일정 경계값 아래의 값을 가지는 극 히스토그램의 섹터를 선택하여 조향명령을 생성한다. 이 두 가지 방법들은 일종의 2차원 가상힘장(Virtual Force Field) 방법으로 다음과 같은 한계점<sup>[9]</sup>을 가진다. 1) 지역 극소점에 의한 함정, 2) 가깝게 배치된 장애물 사이는 통과하지 못함, 3) 장애물들에 의해 흔들림이 발생함, 4) 좁은 통로에서 흔들림이 발생함. 이를 극복하기 위해 1차원 가상힘장 알고리즘<sup>[7]</sup>이 제안되었다. 1차원 가상힘장 알고리즘은 위의 2가지 대표적인 반응적인 경로계획 알고리즘의 장점들을 고려하여 제안되었다. 1차원 가상힘장의 특징은 거리센서로부터 획득되는 각도별 거리값들을 장애물 확장 및 평활화(smoothing)을 통해 연속적인 1차원 장애물장과 목표점에 의해 생성되는 조향명령에 대해 간단한 가우시안 분포를 활용한 조향장을 활용하여 1차원 상에서 장애물을 회피하고 목표점을 추종하는 조향명령을 생성하는 것이다. 연속적인 1차원 힘장을 사용함으로써 인해 흔들림(Oscillation) 발생이 상대적으로 적어지고 목표점이 센서 인지범위 밖에 있더라도 조향장이 생김으로 인해 지역 극소점 문제가 해소 되는 등 기존의 한계점을 일부 극복한 결과를 보여주었다. 자세한 내용은 1차원 가상힘장 알고리즘<sup>[7]</sup> 관련 논문에서 자세한 설명이 있고 본 논문은 1차원 가상힘장 알고리즘을 실험적으로 검증하는 논문으로 자세한 설명은 생략한다.

2.2 비평지 및 먼지 환경의 장애물 탐지<sup>[6]</sup>

1차원 가상힘장 알고리즘은<sup>[7]</sup>은 태생적으로 평평한 환경을 가정하고 설계된 알고리즘이다. 1차원 가상힘장 알고리즘의 장애물장은 이동로봇에 장착된 1 레이어(Layer)만 스캔할 수 있는 2D 거리센서를 기반으로 생성된다. 따라서, 평평하지 않은 야지에서는 1차원 가상힘장 알고리즘의 적용이 제한된다. 1차원 가상힘장 알고리즘을 비평지 환경에 적용하기 위해서는 3차원의 장애물 정보를 1차원 가상힘장 알고리즘의 장애물장에 적용할 수 있는 방법이 필요하고 이는 관련 연구인 비평지 및 먼지 환경의 장애물 탐지<sup>[6]</sup> 논문에서 제안하고 실험환경에서 검증되었다.

실외, 특히 야지에서 운용되는 이동로봇의 경우 대부분 2D/3D 라이다, 카메라 등을 활용하여 상세한 3차원 월드모델을 구성하고 이를 분석하여 주행 가능한 영역과 장애물을 탐지한다<sup>[14-16]</sup>. 이런 방법은 정밀하게 장애물을 탐지할 수 있으나 많은 계산량을 요구하여 1차원 가상힘장 알고리즘과 같은 반응적인 경로 계획 방법에는 적절하지 않다. 이를 극복하기 위해 제안된 비평지 환경의 장애물 탐지<sup>[6]</sup> 방법은 최소 2 레이어 이상의 3D 라이다 또는 2대 이상의 2D 라이다를 기반으로 전방 환경의 경사도를 계산하고 계산된 경사도를 기준으로 지면과 장애물을 판단하여 지면 정보를 제거하고 장애물 정보만을 평지에 수평으로 장착된 가상의 2D 라이다 정보로 변환하여 장애물 정보를 제공하는 특징을 가진다.

부가적으로, 먼지 환경의 장애물 탐지<sup>[6]</sup> 방법은 라이다의 수평 감지범위와 증폭되도록 배치된 레이더를 활용하여 간단하게 동일 수평각도에서 획득되는 라이다와 레이더의 거리값의 차이를 기준으로 먼지 유무를 판단하고 먼지 환경일 경우 레이더 데이터를 기준으로 가상의 2D 라이다 정보를 생성하고 먼지 환경이 아닐 경우 라이다를 기준으로 가상의 2D 라이다 정보를 생성하여 장애물 정보를 제공하는 특징을 가진다.

결론적으로, 비평지 및 먼지 환경의 장애물 탐지<sup>[6]</sup> 방법은 비평지 및 먼지 환경의 야지에서 지면과 먼지가 제외된 장애물 정보를 가상의 2D 라이다의 거리정보로 변환하여 실시간으로 제공함으로써 1차원 가상힘장 알고리즘이 평지가 아닌 야지에서도 동작할 수 있도록 한다. 비평지 및 먼지 환경의 장애물 탐지에 대한 자세한 설명은 관련 논문에 있고 본 논문은 1차원 가상힘장 알고리즘을 실험적으로 검증하는 논문으로 자세한 설명은 생략한다.

3. 시스템 구현 및 파라미터 설정

비평지 및 먼지 환경에서 1차원 가상힘장 알고리즘을 검증하기 위해 다음 그림과 같은 H/W 및 S/W를 구현하였다.

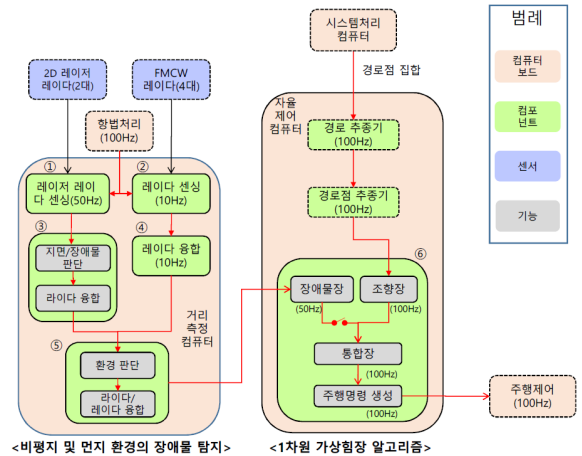


Fig. 1. H/W and S/W implementation

Fig. 1에서 보는 바와 같이 비평지 및 먼지 환경에서 1차원 가상힘장 알고리즘을 검증하기 위해 총 2D 라이다 2대, 4대의 FMCW 레이더, 2대의 SBC(Single Board Computer)를 사용하여 구현하였다. 이를 2 종류의 무인차량 플랫폼에 탑재하여 실험을 수행하였다. S/W는 총 6개의 CSC(Computer Software Component)들로 구현되었다. 2대의 2D 라이다는 다중 레이어를 가지는 라이다로 대체될 수 있다. 원격제어 및 경로점 추종을 수행할 수 있는 무인차량 플랫폼에 비평지 및 먼지 환경의 장애물 탐지와 1차원 가상힘장 알고리즘을 위한 H/W 및 S/W를 추가적으로 탑재하여 실험을 수행하였다. 구현된 S/W를 컴포넌트별로 간략히 설명하면 다음과 같다. ①과 ② 컴포넌트들은 각각 레이저 레이더(라이다) 및 레이더와 인터페이스되어 항법정보가 포함된 라이다 및 레이더의 거리정보를 생성하는 컴포넌트이다. ③ 컴포넌트는 비평지 환경의 장애물 탐지<sup>[6]</sup> 알고리즘이 포함된 컴포넌트로 라이다로부터 획득된 거리정보를 바탕으로 전방 환경의 경사도를 계산하고 계산된 경사도를 기준으로 지면과 장애물을 판단한다. 지면 정보는 제외되고 장애물 정보만을 플랫폼 정면 중앙 부분에 수평으로 배치된 가상의 2D 라이다의 거리정보로 변환하는 기능을 수행한다. ④ 컴

포넌트는 4대의 레이더를 융합하는 컴포넌트로 각각의 레이더 배치 위치와 방향을 기준으로 차량 전방 중앙에 배치된 가상의 2D 라이더의 거리데이터로 변환하는 기능을 수행한다. 이는 동일 각도에서 융합된 라이더의 거리데이터와 레이더의 거리데이터를 비교하기 위함이다. ⑤ 컴포넌트는 먼지 환경을 판단하고 라이더의 거리데이터와 레이더의 거리데이터를 융합하는 기능을 수행한다. 동일 각도에서 획득된 라이더 및 레이더의 거리데이터들의 차를 활용하여 먼지 환경인지 판단하고 먼지 환경일 경우 레이더의 거리데이터를 활용하고 먼지 환경이 아닐 경우 라이더의 거리데이터를 활용하여 차량 전방 중앙에 배치된 가상의 2D 라이더의 거리데이터를 생성한다. ⑥ 컴포넌트는 1차원 가상힘장 알고리즘이 포함되는 컴포넌트므로 ⑤ 컴포넌트로부터 획득되는 거리정보를 바탕으로 장애물장을 생성하고 시스템처리컴퓨터로부터 획득되는 경로점 집합을 기반으로 현재 위치를 고려하여 추종할 경로점을 선택하는 경로 추종기 컴포넌트와 선택된 경로점을 추종하기 위해 조향/속도명령을 생성하는 경로점 추종기의 조향명령을 기준으로 조향장을 생성하고 조향장과 장애물장이 중첩된 통합장을 통해 장애물을 회피하고 목표점을 추종하는 새로운 조향명령을 생성하는 기능을 수행한다. 생성된 주행명령은 주행제어 컴포넌트로 전송되고 실제 플랫폼의 모터를 제어한다.

1차원 가상힘장 알고리즘의 파라미터는 총 6개이다. 실험에 사용된 파라미터들의 설정값은 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Parameters for 1D virtual force field algorithm

구분	파라미터	설정값
1	조향장 분산/장애물 확장폭	30 / 1.5[m]
2	관심 거리/관심 수평범위	10[m] / 180°
3	평활화율/통합장 가중치	15[%] / 0.17

조향장 분산은 조향범위와 장애물 확장폭에 의해 설정되었다. 장애물 확장폭은 무인차량 플랫폼의 크기를 고려하여 설정하였고 관심 거리와 수평범위는 목표주행속도와 센서인지 범위를 기준으로 설정하였다. 평활화율은 장애물장의 평활화할 정도를 나타내는 파라미터이고, 통합장 가중치는 조향장과 장애물장 영향의 정도를 나타내는 가중치로 경험적으로 설정하였다.

#### 4. 실험적 검증

다양한 시뮬레이션을 통해서만 입증된 1차원 가상힘장 알고리즘을 실제 야지의 비평지 및 먼지 환경에서 유효성을 입증하기 위해 다양한 실험을 수행하였다. 본 장에서는 실험 환경 및 실험 결과를 자세히 설명하고 분석을 수행한다.

##### 4.1 비평지 환경의 1차원 가상힘장 알고리즘 검증 및 분석

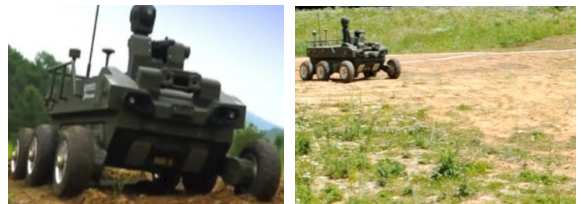


Fig. 2. Experimental setup 1

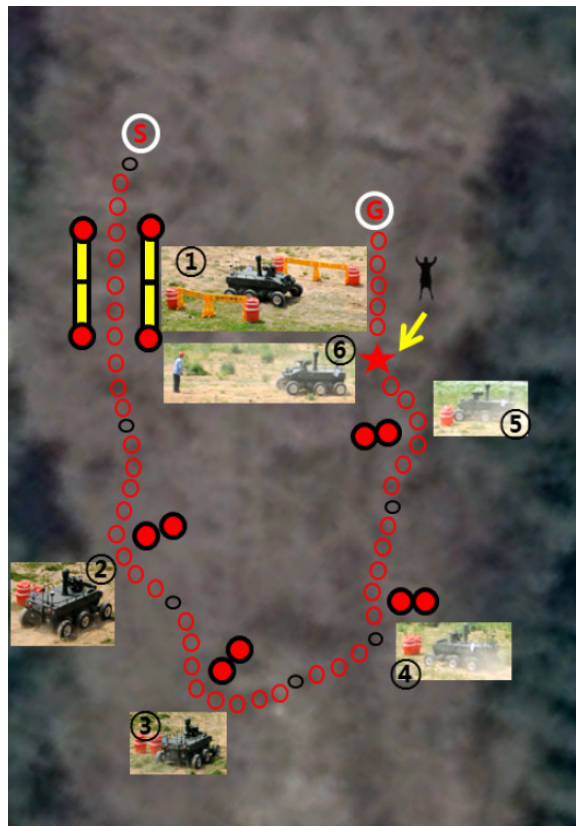


Fig. 3. Experimental result 1 on uneven terrain



Fig. 2는 비평지 환경의 1차원 가상힘장 알고리즘의 실험적 검증을 위한 실험 환경을 보여준다. Fig. 2의 왼쪽 그림과 같이 비평지 환경의 야지를 주행하기 위해 6개의 바퀴를 가지는 차량을 활용하였고 사용된 센서는 4 레이어를 가지는 110도의 수평 시야각을 가지는 LD-MRS를 사용하였다. 이를 활용하여 비평지 환경의 장애물 탐지방법과 1차원 가상힘장 알고리즘이 포함된 소프트웨어를 실제로 차량에 탑재하고 실험을 수행하였다. 실험이 수행된 지면 환경은 Fig. 2의 오른쪽 그림과 같이 흙이 상당 부분 노출되고 풀이 듬성듬성 있고 굴곡이 있는 환경이다. 실험 시 차량은 평균 10KPH로 기동하였다.

Fig. 3은 비평지 환경에서 수행된 실험 결과를 보여준다. ‘S’와 ‘G’는 시작 위치와 최종 목표점 위치를 의미한다. 속이 채워져 있는 원은 원통형 장애물을 나타내고 직사각형은 장벽형 장애물을 의미한다. 속이 빈 작은 원은 사전에 계획된 전역경로점들이고 속이 빈 큰 원이 1차원 가상힘장 알고리즘으로 지나간 경로점들을 의미한다. 실험은 6가지의 고정 및 이동 장애물이 존재하는 시나리오를 설정하여 수행하였다. Fig. 3의 ①에서는 시작점을 출발하여 첫 번째로 장벽형 장애물을 통과하는 것을 보여준다. 장벽형 고정 장애물의 가운데로 안정적으로 통과함을 확인할 수 있었다. Fig. 3의 ②부터 ⑤까지는 원통형 장애물 두 개가 인접한 장애물 지대를 통과하는 시나리오이다. 굴곡이 있지만 장애물을 잘 인식해서 장애물을 회피하며 전역경로점들을 추종함을 확인할 수 있다. Fig. 3의 ⑥은 사람이 이동하면서 차량에 접근하는 시나리오이다. 사람이 접근함에 따라 회피를 수행하지만 근접할 경우 정지를 수행함을 확인할 수 있다.

Fig. 3의 실험으로부터 굴곡이 있는 비평지 환경에서 지면이 오탐지되지 않고 장애물만 탐지됨을 확인할 수 있고 지면이 제거된 장애물 탐지 정보를 활용하여 1차원 가상힘장 알고리즘이 정상적으로 동작함을 확인할 수 있다. 본 실험으로부터 1차원 가상힘장 알고리즘이 시뮬레이션 상에서 검증된 평평한 환경뿐만 아니라 굴곡이 있는 비평지 환경에서도 유효함이 증명되었다. 또한, 1차원 가상힘장 알고리즘이 정적 장애물 뿐만 아니라 동적 장애물에도 유효하게 동작함을 확인되었다. 하지만, 실험 간 차량 뒤쪽으로부터 먼지가 많이 발생함을 확인할 수 있었으며, 다수의 차량이 주행함으로써 앞의 차량에 의해 뒤의 차량이 먼지에 의해 영향받을 수 있음을 확인하였다.

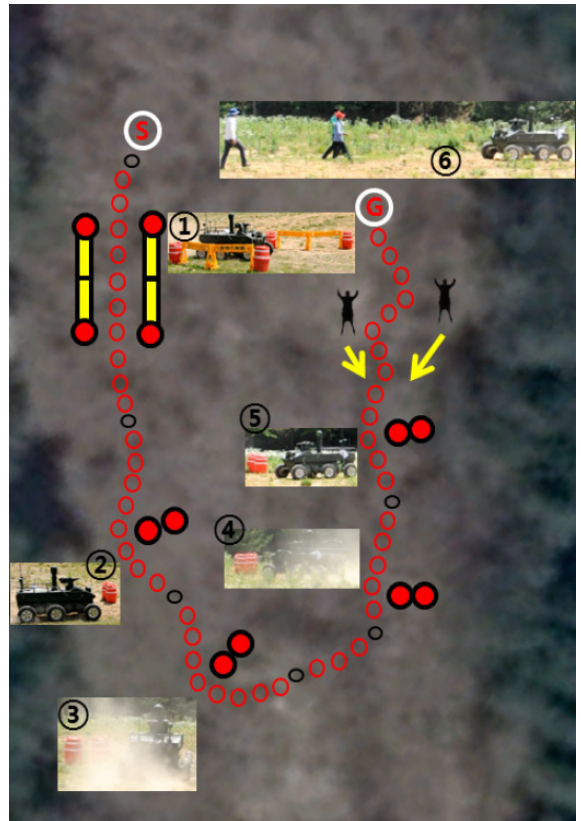


Fig. 4. Experimental result 2 on uneven terrain

Fig. 4가 Fig. 3과 다른 부분은 다중 이동 장애물에 대해 유효성을 검증하는 부분이다. Fig. 3에서는 한명의 사람에 대해 회피 및 긴급정지를 확인한 실험이고 Fig. 4에서는 두 명의 사람에 대해 적절히 회피를 하는지 확인하는 실험이다. 고정 장애물 뿐만 아니라 2명의 이동 장애물 환경에서도 비평지 환경에서 장애물이 인식되고 인식된 장애물을 기반으로 1차원 가상힘장 알고리즘이 정상적으로 동작함을 확인하였다. Fig. 3과 Fig. 4의 실험 결과들을 통해 굴곡이 있는 비평지 환경에서 지면이 장애물로 오인되지 않고 다수의 원통형 및 장벽형 고정 장애물과 사람과 같은 이동 장애물이 포함된 복잡한 환경에서 각 장애물들이 정상적으로 탐지되었다. 탐지된 장애물 정보를 활용한 1차원 가상힘장 알고리즘이 유효하게 고정 및 이동 장애물들을 회피하고 회피할 수 없을 정도로 근접할 경우 긴급정지 기능이 수행됨을 확인하였다. 먼지 환경에서의 1차원 가상힘장 알고리즘의 실험적 검증은 다음 장에서 다뤄진다.

4.2 비평지 및 먼지 환경의 1차원 가상힘장 알고리즘 검증 및 분석



Fig. 5. Experimental setup 2



Fig. 6. Experimental result 3 on uneven and dusty environment

Fig. 5는 비평지 및 먼지 환경의 1차원 가상힘장 알고리즘의 실험적 검증을 위한 실험 환경을 보여준다. Fig. 5의 왼쪽 그림은 6개의 바퀴를 가지는 차량을 활용하였고 사용된 센서는 다중스캔 라이다와 4대의 레이다를 사용하였다. 사용된 레이다는 최대 23미터의 측정거리를 가지고 있고 수평측 시야각이 80도 수직

측 시야각이 30도인 상용 레이다를 사용하였다. 차량 전면부에 다중스캔 라이다 좌우에 2대씩 배치하여 전방 180도 이상을 감지할 수 있도록 하였고 배치된 레이다들을 라이다가 장착된 위치에 있는 가상 2D 라이다의 거리데이터로 변환하여 먼지 환경에서의 장애물 탐지에 활용되었다. 이를 활용하여 비평지 및 먼지 환경의 장애물 탐지방법과 1차원 가상힘장 알고리즘이 포함된 소프트웨어를 차량에 탑재하고 실험을 수행하였다. 실험이 수행된 지면 환경은 Fig. 5의 오른쪽 그림과 같이 먼지가 많이 발생하는 흙이 상당 부분 노출되고 굴곡이 있는 환경이다. 실험 시 차량은 약 평균 10KPH로 기동하였다.

Fig. 6은 비평지 및 먼지 환경에서 수행된 실험 결과를 보여준다. 'S'와 'G'는 시작 위치와 최종 목표점 위치를 의미한다. 속이 채워져 있는 원은 원통형 장애물을 의미한다. 속이 빈 작은 원은 사전에 계획된 전역경로점들이고 속이 빈 큰 원이 1차원 가상힘장 알고리즘으로 지나간 경로점들을 의미한다. 실험은 3가지의 고정 및 이동 장애물이 존재하는 시나리오를 설정하여 수행하였다. Fig. 6의 ①은 시작점을 출발하여 첫 번째로 원통형 장애물 인근으로 차량이 지나갈 때 차량 전면부에 직접 흙을 뿌려서 농도가 짙은 형태의 먼지 환경을 인공으로 만든 부분을 보여준다. 짙은 농도의 먼지 환경을 인식하고 레이다의 거리 데이터를 활용하여 장애물을 회피하고 기 설정된 전역경로점을 추종하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6의 ②에서는 사람이 차량에 접근하는 시나리오이다. 사람이 접근함에 따라 차량이 회피 기동하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6의 ③은 추가로 흙을 넓게 살포하여 옅은 먼지 환경을 만든 시나리오이다. 옅은 먼지 환경에서도 먼지 환경을 인식하여 전역경로점을 잘 추종함을 확인할 수 있다.

Fig. 6의 실험으로부터 굴곡이 있는 비평지 환경 뿐만 아니라 먼지 환경에서도 먼지가 오인되지 않고 장애물만 탐지됨을 확인할 수 있고 지면이 제거되고 먼지 환경이 처리된 장애물 탐지 정보를 활용하여 1차원 가상힘장 알고리즘이 정상적으로 동작함을 확인할 수 있다. 본 실험으로부터 1차원 가상힘장 알고리즘이 시뮬레이션 상에서 검증된 평평한 환경 뿐만 아니라 굴곡이 있는 비평지 및 먼지 환경에서도 유효함이 증명되었다. 추가적으로 1차원 가상힘장 알고리즘이 정적 장애물 뿐만 아니라 동적 장애물에도 유효하게 동작함을 확인하였다.

## 5. 결론

본 논문은 기 입증된 비평지 및 먼지 환경에서의 장애물 탐지 방법과 다양한 시뮬레이션을 통해 입증된 1차원 가상힘장 알고리즘을 기반으로 실제 비평지 및 먼지 환경에서 1차원 가상힘장 알고리즘이 유효한 지 실험적으로 검증하였다. 다양한 실험들을 통해 1차원 가상힘장 알고리즘은 비평지 및 먼지 환경에서 처리된 장애물 탐지 정보를 활용하여 다수의 정적 및 동적 장애물들이 존재하는 복잡한 환경에서 유효하게 동작함을 확인하였다.

## References

- [1] K. Bimraw, "Autonomous Cars: Past, Present and Future a Review of the Developments in the Last Century, the Present Scenario and the Expected Future of Autonomous Vehicle Technology," 12<sup>th</sup> International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Vol. 1, pp. 191-198, 2015.
- [2] M. Hebert, C. Thorpe, and A. Stentz, "Intelligent Unmanned Ground Vehicles: Autonomous Navigation Research at Carnegie Mellon," Springer Science and Business Media, 2012.
- [3] C. Berger and B. Rumpe, "Autonomous Driving-5 Years After the Urban Challenge: The Anticipatory Vehicle as a Cyber-Physical System," 10<sup>th</sup> Workshop on Automotive Software Engineering, pp. 789-798, September 2012.
- [4] J. Markoff, "At High Speed, on the Road to a Driverless Future," New York Times, 2013.
- [5] Zhang, T., "UGV Developments in 2020-2030 in Terms of Technologies," Digital Infantry Battlefield Solution, 2016.
- [6] T. Choe, J. Park, S. Joo, and Y. Park, "1D Virtual Force Field Algorithm for Reflexive Local Path Planning of Mobile Robots," Electronics Letters, Vol. 50, No. 20, pp. 1429-1430, 2014.
- [7] T. Choe, J. Park, S. Joo, and Y. Park., "Obstacle Detection for Unmanned Ground Vehicle on Uneven and Dusty Environment," Proc. SPIE 9474, Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXIV, 94741D, May 21, 2015.
- [8] Koren, Y. and Borenstein, J., "Potential Field Methods and Their Limitations for Mobile Robot Navigation", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1398-1404, April 1991.
- [9] Veelaert, P. and Bogaerts, W., "Ultrasonic Potential Field Sensor for Obstacle Avoidance," IEEE transactions on Robotics and Automation, Vol. 15, No. 4, pp. 774-779, 1999.
- [10] Kim, D. H. and Shin, S., "Local Path Planning using a New Artificial Potential Function Composition and its Analytical Design Guidelines," Advanced Robotics, Vol. 20, No. 1, pp. 115-135, 2006.
- [11] J. Borenstein and Y. Koren, "The Vector Field Histogram - Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 3, pp. 278-288, 1991.
- [12] Ulrich, I. and Borenstein, J., "VFH\*: Local Obstacle Avoidance with Look-Ahead Verification," International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 572-577, 24-28 April 2000.
- [13] Kazem, B. I., Hamad, A. H. and Mozael, M. M., "Modified Vector Field Histogram with a Neural Network Learning Model for Mobile Robot Path Planning and Obstacle Avoidance," International Journal of Advanced Computer Technology, Vol. 2, No. 5, pp. 166-173, 2010.
- [14] Moghadam, P., Wijesoma, W. S. and Feng, D. J., "Improving Path Planning and Mapping based on Stereo Vision and Lidar," IEEE 10<sup>th</sup> International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, pp. 384-389, Dec. 2008.
- [15] Manz, M., Himmelsbach M., Luettel T. and Wuensche, H. J., "Detection and Tracking of Road Networks in Rural Terrain by Fusing Vision and Lidar," International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4562-4568, 2011.
- [16] Shang, E., An, X., Li, J. and He, H., "A Novel Setup Method of 3D Lidar for Negative Obstacle Detection in Field Environment," International Conference on Intelligent Transportation Systems, pp. 1436-1441, 2014.