

무인지상차량의 안전주행을 고려한 최적경로 생성 방법

An Optimal Path Generation Method considering the Safe Maneuvering of UGV

곽 경 운*	정 해 관**	최 덕 선***	박 용 운***
Kyung Woon Kwak	Hae Kwan Jeong	Tok Son Choe	Yongwoon Park
	곽 윤 근*	김 수 현*	
	Yoon Keun Kwak	Soo Hyun Kim	

Abstract

An optimal path generation method considering the safety of UGV(Unmanned Ground Vehicle) is proposed and demonstrated through examples. Among various functions of UGV, real-time obstacle avoidance is a key issue to realize realistic scenario in FCS(Future Combat Systems). A two-dimensional narrow corridor environment is considered as a test field. For each step of UGV movement, two objectives are considered: One is to minimize the distance to the target and the other to maximize the distance to the nearest point of an obstacle. A weighted objective function is used in the optimization problem. Equality and inequality constraints are taken to secure the UGV's dynamics and safety. The weighting factors are controlled by a fuzzy controller which is constructed by a fuzzy rule set and membership functions. Simulations are performed for two cases. First the weighting factors are considered as constant values to understand the characteristics of the corresponding solutions and then as variables that are adjusted by the fuzzy controller. The results are satisfactory for realistic situations considered. The proposed optimal path generation with the fuzzy control is expected to be well applicable to real environment.

Keywords : Optimal Path(최적경로), Fuzzy Controller(퍼지 제어기), Safety(안전성), Weighting Factor(가중치)

1. 서론

미래 전장에서는 군사용 무인차량 혹은 군사용 로봇

이 전투 및 전투 지원을 수행하게 될 것이며 위험지역을 중심으로 무인 시스템의 활용성이 더욱 커질 것으로 전망된다. 실제로 정보수집, 위험작업 그리고 경계 등의 비전투 분야에서는 이미 군사용 무인 시스템이 활발하게 활용되면서 그 효용성을 입증함에 따라 앞으로 더욱 광범위하게 활용될 것으로 예상된다. 특히 군사용 무인지상차량(Unmanned Ground Vehicle)은 미래 전투체계(Future Combat System)로 대표되는 미래 전장

† 2010년 6월 25일 접수~2010년 10월 22일 게재승인

* 한국과학기술원(KAIST)

** 연구개발인력교육원

*** 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 곽경운(kwakkw@kaist.ac.kr)

의 주도적인 시스템으로 간주되고 있다. 군사용 무인 지상차량은 무선 통신을 통해 관리 감독자에 의한 원격제어가 기본적으로 이루어지지만, 전시와 같은 특수한 상황에서는 그 신뢰성을 항상 보장할 수 없다. 따라서 이러한 제한된 환경에서 주어진 임무를 수행하기 위해서는 자율주행이 필수적이며 이러한 자율주행은 기본적으로 경로계획에 의해 구현된다.

주행로봇의 자율주행기술은 크게 위치인식(Localization), 지도생성(Mapping), 경로계획(Path Planning) 기술로 나뉘고, 위치인식과 지도생성 기술을 통합하여 보통 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)이라고 한다. 이 세 가지 기술 중에 경로계획 기술은 로봇이 장애물을 회피하면서 목표지점(Local Goal)까지 최적의 경로로 도달하게 하는 중요한 기술이라 할 수 있다. 군사용 무인 차량에 필요한 경로계획으로는 기본적으로 임무계획, 전역 경로계획, 지역 경로계획, 긴급 장애물 회피 기능 등이 있다. 전역 경로계획이란 이미 무인차량이 이동할 경로의 정보를 어느 정도 알고 있을 때 자율적으로 경로를 생성하는 것이고, 지역 경로계획과 긴급 장애물 회피란 전역 경로를 추종하면서 지도 정보로부터 나와 있지 않은 예기치 못한 장애물이나 움직이는 장애물에 대해 여러 가지 센서를 이용하여 장애물을 피하며 경로를 재생성하는 것이다.

정찰 주행무인차량은 주어진 전역 지도를 기반으로 전장에 침투하여 알 수 없었던 유용한 정보를 아군에게 제공하는 역할을 한다. 그러나 전역 지도에서 제공하지 않은 예기치 못한 장애물이 존재할 수 있기에 무인차량은 센서를 이용하여 새로운 경로를 탐색하는 지역 경로계획을 수행해야 한다.

지금까지 지역 경로계획과 긴급 장애물 회피에 대한 알고리즘이 꾸준히 연구가 진행되었다. Virtual Force Field(VFF)^[1]은 포텐셜 필드 방법을 이용하였으며 기본 개념은 가상의 인력을 목표점으로부터 발생시키고 장애물로부터는 가상의 척력을 작용시켜 합력 방향으로 이동하게 하는 것이다. 이 방법은 간단하면서도 구현하기가 쉽지만 좁은 통로에서 발생하는 지그재그 현상이나 지역 국소점(Local Minima)에 빠지는 단점을 가지고 있다. Vector Field Histogram(VFH)^[2]은 VFF를 보완하기위한 방법으로 로봇 주위의 방사형 거리를 추출하여 조향 영역에 대한 장애물 밀도를 Polar Histogram으로 도식화한 다음, 가장 낮은 장애물 밀도를 갖는 방향으로 회피하는 방법이다. 좁은 구역에서도 안정적으로 주행은 할 수 있지만 여전히 U자 형태의 장애물에

대한 지역 국소점 현상은 해결하지 못하였다. Dynamic Window Approach(DWA)^[3]는 로봇의 동역학을 고려하는 속도 기반 장애물 회피 기법이다. DWA는 로봇의 선속도와 각속도를 각각 한 축으로 하는 속도 공간에서 운용 가능 속도의 집합인 Dynamic Window를 정의한 뒤 목표점으로서의 경로 생성, 현재 속도 유지, 장애물과의 여유 거리를 고려한 비용함수(Cost Function)에 대하여 최적의 속도를 추출한다. 따라서 동역학적으로 불가능한 경로를 배제하는 장점이 있는 반면 내부 변수에 대한 민감도가 알고리즘 성능에 직접적인 영향을 미친다는 단점이 있다. 한편 Nearness Diagram(ND)^[4]은 ‘Divide and Conquer’ 개념을 기본으로 하는 규칙 기반 알고리즘으로, 로봇이 주행 중 겪을 수 있는 모든 상황을 총 4개의 판단 기준과 5개의 의사 결정만으로 대처한다. 따라서 로봇은 어떠한 상황에서도 명확하게 의사 결정을 내릴 수 있으므로 매우 협소한 구역에 대해서도 좋은 성능을 낼 수 있다. 그러나 로봇의 기구학이나 동역학을 고려하지 않으므로 전 방향 조향 기반의 원형 로봇 외에는 적용하기 힘들다는 단점이 있다. Table 1에 이들 방법의 개발자와 개념을 요약하였다^[5].

Table 1. 장애물 회피 방법에 대한 선행연구

Algorithm	Year	Developer	Concept
Virtual Force Field	1989	Johann Borenstein et al., University of Michigan, USA	<ul style="list-style-type: none"> • Fusion of potential method and histogram grid • Virtually attractive and repulsive forces considered each for a goal and obstacle
Vector Field Histogram	1991	Johann Borenstein et al., University of Michigan, USA	<ul style="list-style-type: none"> • Extraction of candidate direction based on polar histogram generated from peripheral sensor data
Dynamic Window Approach	1996	Dieter Fox et al., University of Bonn	<ul style="list-style-type: none"> • Path planning based on both translational and rotational velocity to consider dynamics • Choice of best velocities by optimization of an objective function
Nearness Diagram	2000	Javier Minguez et al., University of Zaragoza, Spain	<ul style="list-style-type: none"> • ‘Divide and Conquer’ strategy • Only 5 situations and actions for 4 criterion

앞에서 언급했듯이 지역경로계획 및 긴급 장애물 회피는 많은 응용분야가 있고 우수한 성능을 보이지만 지역 범위에서 군사용 지상무인차량의 안전과 최적화 경로 생성을 고려한 연구가 필요하다. 기존의 연구들과 제안된 알고리즘들은 장애물을 회피하거나 차량이 주행 중 봉착할 수 있는 문제점들을 해결하는 방향으로 연구가 진행되었지만 본 연구에서는 장애물을 회피함과 동시에 무인차량의 안전성 확보 및 최적화 경로를 전역 경로로부터 재생성하는 방법을 제안한다. 2장에서는 연구의 목표가 되는 군사용 무인지상차량과 사용되는 센서 모델에 대해 설명하고 3장에서는 제안하는 지역 경로 최적화 알고리즘을 설명한다. 4장과 5장에서는 모의실험을 통하여 제안된 알고리즘의 성능을 보이고 결론 및 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 차량 및 센서 모델

군사용 무인 지상 차량의 주행 환경으로 실제 전장에서 일어날 수 있는 야지환경 중 나무와 바위 등 여러 가지 복합적인 장애물이 밀집된 지형을 선정하였다. 장애물이 밀집된 환경에서는 좁은 구역을 통과해야 하는 역할이 주어지기 때문에 복잡하게 장애물이 놓여있는 환경뿐만 아니라 좁은 복도 환경도 관련된 환경으로 설정하였다. 여기서 복도 환경의 형상을 장애물이 혼잡하게 정의된 지역과 조건을 같게 하기 위하여 모의 환경을 다음과 같이 정의하였다. 무인차량은 전방 조향이 가능한 Ackermann 차량모델로 가정하고 너비와 길이는 $2m(W) \times 3m(L)$ 로 한 출연 연구소에서 개발되고 있는 건마로봇의 크기와 유사하게 가정하였으며 복도의 폭은 무인 차량이 주행할 수 있을 만큼의 공간만 확보하는 것으로 무인차량의 대각선 길이의 절반 이하인 5m로 선정하였다. 또한 군사용 무인차량에는 위성항법장치(GPS : Global positioning System), IMU(Inertia Measurement Unit), LMS(Laser Measurement System)이 사용되었다. 위성항법장치는 무인 차량의 목표지점의 위치와 현재 위치를 판단하는데 사용이 되고 IMU는 무인차량의 자세를 얻는데 이용된다. 또한 LMS는 현재 자세의 무인차량과 장애물과의 거리 및 위치를 판단하기 위한 센서로서 모의실험에 적용된 사양은 거리 방향으로는 0.1m의 해상도 및 최대 20m 측정가능, 각도방향으로는 0.5도의 해상도 및 최대 240도 스캔 가능한 모델이다. 무인지상차량의 정

가운데에 이 세 가지 센서가 장착되어 있다고 가정하였다.

3. 지역경로 최적화 알고리즘

본 연구에서는 무인차량의 경로생성 기술 중 지역경로계획 및 긴급 장애물 회피가 가능한 방법을 제안하는데 목적을 두고 있다. 지역 환경에서 장애물을 회피하면서 목표지점까지의 최단경로를 생성하면서 무인차량의 안전을 고려한 최적경로 생성 알고리즘을 제안한다. 두 가지 조건을 만족하는 알고리즘을 제안하기 위해 목적함수와 제한조건을 설정하여 최적화 식을 풀고 목적함수가 임의의 환경에 적용하도록 가중치를 능동적으로 조절하는 퍼지 제어기(Fuzzy Controller)^[6,7]를 제안한다.

가. 최적경로 설계

크기가 작지 않은 군사용 무인 지상 차량이 본 논문에서 설정된 좁은 복도 환경에서 주행을 하기 위하여 다음과 같은 목적함수와 제한조건을 제안한다. 각 시간 스텝에서 이 최적화 문제로부터 로봇의 다음 위치인 X_n 을 구하게 된다. 이 식에서 사용된 기호의 정의는 Table 2와 같다.

Table 2. 기호 정의

변수	정의
$x_{vehicle}$	Current vehicle position, x-coordinate
$y_{vehicle}$	Current vehicle position, -coordinate
x_{goal}	Target position, x-coordinate
y_{goal}	Target position, y-coordinate
α, β	Weighting factors for the two objectives
δ, δ_{max}	Distance to the nearest point of an obstacle from the next robot position, maximum safe distance
γ, γ_{max}	Orientation angle, maximum orientation angle
V, V_{max}	Vehicle speed, maximum speed
n	The n-th time step
N	The number of time steps to the target

$$f = \min [J(X_n)] \tag{1}$$

$$\text{subject to } g_i(X_n) \leq 0, \quad i = 1, 2 \tag{2}$$

$$\text{and } h(X_n) = 0 \tag{3}$$

$$\text{where } X_n = [x_{vehicle(n)}, y_{vehicle(n)}]^T, \tag{4}$$

$$J(X_n) = \Psi(\tilde{\eta}_n) + \Omega(\tilde{\zeta}_n), \tag{5}$$

$$\Psi(\tilde{\eta}_n) = \frac{1}{2} \tilde{\eta}_n^T \alpha \tilde{\eta}_n, \tag{6}$$

$$\Omega(\tilde{\zeta}_n) = \frac{1}{1/2(\tilde{\zeta}_n^T \beta \tilde{\zeta}_n)}, \tag{7}$$

$$g_1 = \delta_{\max} - |\delta_n|, \tag{8}$$

$$g_2 = |\gamma_n| - \gamma_{\max}, \tag{9}$$

$$h = V_n - V_{\max}, \quad n = 1, \dots, N \tag{10}$$

무인 차량이 주행을 할 때 가장 중요하게 고려되는 요소는 얼마만큼 빨리 그리고 짧은 거리로 목표점까지 도달하는가와 장애물과 충돌을 피하기 위해 안전거리를 확보하는 것이다. 이 두 가지 요소는 상충되는 것으로 장애물과의 충돌을 피하기 위해 무작정 장애물과 멀리 가려고 하면 목표지점까지 도달 시간과 거리는 길어질 것이고, 목표지점에 도달하는 시간과 거리를 최대한 단축하게 되면 장애물과의 거리를 확보하지 못하게 된다. 이 두 가지 상충되는 요소를 제어하기 위한 가중치를 목적함수 각 항에 부여한다. 무인차량을 Ackermann 차량으로 가정하고 조향할 수 있는 최대 조향각을 제한하기 위하여 식 (9)와 같이 제한조건을 주었으며 차량은 V_{\max} 로 등속 주행을 한다고 가정하였다(식 2, 3). 또한 식 (2)와 같이 무인차량이 장애물로부터 안전성을 확보하기 위해 최소 근접거리가 일정한 거리 이상이 되도록 제한조건으로 설정하였다. 목적함수와 제한조건에 대한 수식을 확장하면 다음과 같다.

$$\tilde{\eta}_n = [x_{goal}, y_{goal}]^T - X_n, \tag{11}$$

$$\tilde{\zeta}_n = |\zeta_{obs(n)} - X_n|, \tag{12}$$

식 (5)에서 목적함수는 두 개의 항으로 구성이 되어 있는데 첫 번째 항(Ψ)은 무인 차량이 목표지점에 빠르고 짧은 거리로 도달하게 하기 위한 것(식 11)이고 두 번째 항(Ω)은 장애물과의 거리를 확보하여 안전하게 주행하도록 하는 의미(식 12)를 가지고 있다. 여기서 ζ_{obs} 은 가장 가까운 장애물이 감지되는 점의 절대 좌표이다. 제한조건 요소인 식 (8)은 장애물과 무인차량의 최소 안전거리를 지정해 놓은 것으로, δ_n 은 현재차량의 위치로부터 LMS로 측정된 장애물의 최소 거리와 방향으로부터 얻어지는 장애물의 최소거리 점까지의 거리를 나타내고, 최대 안전거리인 δ_{\max} 는 0.2m로 설정하였다. 또한 식 (9)에서 무인차량의 기구학적인 제한조건을 반영하기 위하여 최대 조향각 γ_{\max} 을 30도로 설정하였다. 식 (10)은 무인 차량의 속력(V_{\max})을 1m/s로 가정하여 모의실험에 반영하였다.

나. 가중치 제어 방법

군사용 무인지상 차량이 임의의 환경에서 장애물을 안전하고 빠르게 회피하여 목표지점에 도달하게 하기 위하여 퍼지 제어기(Fuzzy Controller)를 이용한 가중치 제어 기술을 제안한다. 목적함수의 요소인 식 (6)과 (7)에서 비중을 조절할 수 있도록 가중치 α 와 β 가 설정되어 있다. 앞 절에서 언급했듯이 식 (6)은 목표 지점에 단거리로 빠르게 도달하게 하기 위한 함수로 가중치 α 를 적절히 선정하여 비중을 조절할 수 있다. 또한 식 (7)은 무인차량의 안전을 위해 장애물로부터의 거리를 확보하는 함수로 마찬가지로 가중치 β 을 적절히 선정하여 비중을 높이거나 줄이 수 있다.

이에 본 연구에서는 목적함수의 가중치를 제어하는 방법으로 소속 함수(Membership Function)와 규칙 집합(Rule Set) 기반의 퍼지 제어기를 설계하였다. 가중치 α 을 제어하기 위한 퍼지 제어기로 LMS로부터 탐지되는 데이터로부터 무인차량과 장애물과의 가장 가까운 거리를 추출하여 제어기의 입력 값으로 사용한다. 퍼지 제어기의 출력 값은 가중치 α 이며 β 값은 식 (13)에 의해 자연스럽게 얻게 된다.

$$\alpha + \beta = 1 \tag{13}$$

입력과 출력에 해당하는 변수를 각각 7개의 소속 함

수로 정의하였고 이는 Fig. 1, 2와 같다. 입력의 최소 값과 최대 값은 0.2m와 20m로 정하였다. 이는 무인지량이 최소 0.2m 이상으로 장애물과 떨어져 있게 하는 제한조건과 LMS의 사양인 최대 측정 가능 거리를 반영한 것이다. 또한 출력 값 α 의 범위는 '0'부터 '1' 사이의 값으로 식 (13)을 반영한다. 퍼지 제어기 설계 시 규칙 집합을 정하는 과정은 매우 중요하다. 따라서 퍼지 규칙 집합은 숙련된 경험자나 전문가의 경험으로 정하는 것이 바람직하다. 무인지량이 복잡한 환경에서 주행하는데 적합한 규칙을 정하기 위해 장애물에 가까워질수록 장애물과의 거리가 더욱 멀어지도록 즉, 가중치 α 가 작아지도록 기준을 정하고 Table 3과 같이 7개의 규칙 집합을 구성하였다.

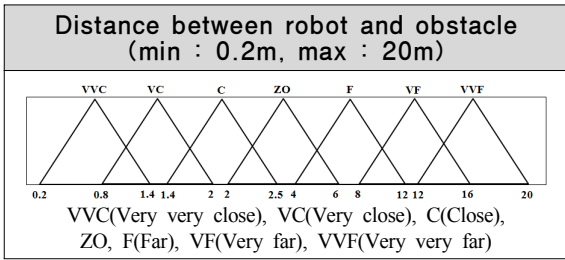


Fig. 1. 퍼지 입력

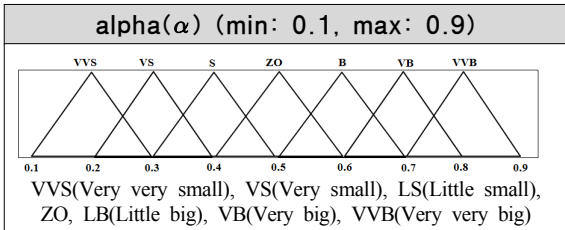


Fig. 2. 퍼지 출력(α)

Table 3. Input : distance(A), output : α

Selected 7 rules	Output(speed)
If input A is VVC	VVS
If input A is VC	VS
If input A is C	LS
If input A is ZO	ZO
If input A is F	LB
If input A is VF	VB
If input A is VVF	VVB

4. 모의실험

제안된 알고리즘을 검증하기 위해 Matlab을 이용하였으며 모의실험 환경을 실제와 유사하게 구성하기 위해 센서 모델의 사양과 차량 모델을 이용하였다. 가중치 제어 알고리즘의 성능을 보이기 위하여 모의실험을 가중치 고정 모델과 가중치 가변 모델로 나누어 실험을 하고 차이점을 비교 분석하였다. 주행 환경으로는 두 가지 종류의 좁은 복도 환경으로 설정하였다. 2장에서 언급 했듯이 복도의 폭은 무인지량 크기의 2 배 이하인 5m로 하고 첫 번째 실험은 일방통행만 있는 환경이고 두 번째 실험은 바둑판 모양의 환경으로 장애물을 만났을 때 선택할 수 있는 경로가 여러 가지인 경우이다. 두 번째 실험 환경결과로 무인지량이 최적의 경로를 선택했는지를 확인할 수 있다. Fig. 3은 모의실험 구축환경에 대한 전체 시스템을 보여주고 있다.

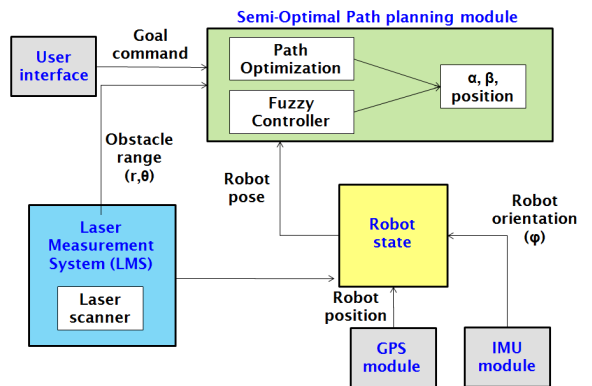


Fig. 3. 전체 시스템 구성도

가. 가중치 고정 모델

가중치 고정 모델은 목적함수의 가중치 α 와 β 을 퍼지 제어를 통해 제어하지 않고 사용자가 주어진 환경에 따라 가중치를 조절하여 무인지량이 주행하는 방법이다. Fig. 4는 가중치 고정 알고리즘을 적용하였을 때의 모의실험 결과이다. 두 가지 실험 환경에 대하여 가중치 α 와 β 을 {0.7, 0.3}, {0.4, 0.6}인 경우에 대하여 실험을 하였다. 각 모의실험 결과에서 오른쪽 위에 표기되어있는 포인트가 설정된 목표지점이다.

첫 번째 환경에서 가중치가 {0.7, 0.3}인 경우 무인지량이 주행도중 장애물과 충돌하는 현상이 발생하였다. 이는 주어진 환경에 대하여 사용자가 가중치 값을

잘못 선택한 경우이다. 충돌이 발생한 이유는 목표지점으로 단거리로 도달하려는 성질이 강한 가중치 α 가 크고 반면에 장애물로부터의 거리를 확보하려는 함수에 대한 가중치 β 가 작기 때문이다. 따라서 가중치를 {0.4, 0.6}으로 장애물로부터의 거리를 확보하려는 성질의 가중치를 상대적으로 크게 한 후 실험한 결과를 보면 목표지점까지 장애물과 충돌하지 않고 도달하는 것을 확인할 수 있었다.

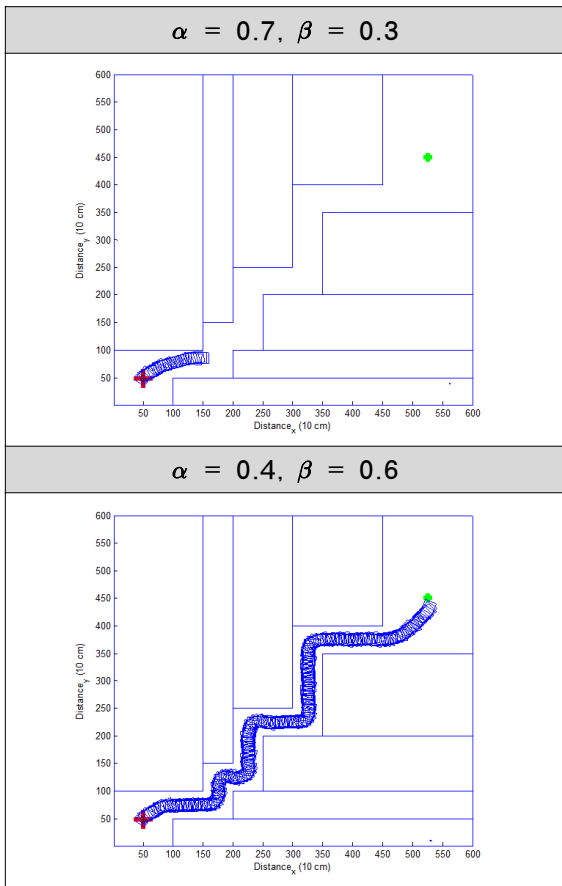


Fig. 4. 가중치 고정 모델(환경 1)

두 번째 환경에서 첫 번째 환경과 마찬가지로 가중치를 {0.7, 0.3}, {0.4, 0.6}으로 선정하여 실험을 수행한 결과 β 가 상대적으로 작은 경우는 장애물과 충돌을 하였고 큰 경우($\beta = 0.6$)는 장애물과의 거리를 너무 확보하다보니 무인차량이 통로 속으로 진입하지 못하고 장애물이 없는 방향으로만 주행하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 5).

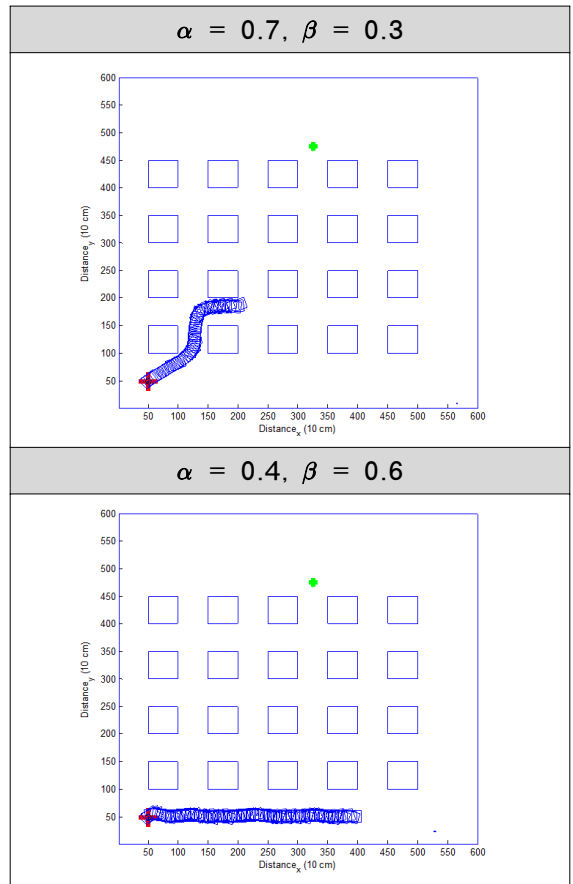


Fig. 5. 가중치 고정 모델(환경 2)

나. 가중치 가변 모델

가중치 가변 알고리즘은 목적함수 가중치 α 와 β 을 퍼지 제어를 통해 제어하는 방법으로 임의의 환경에 대하여 적용이 가능하다. 가중치 고정 모델과 같이 두 가지 환경에서 가중치를 사용자가 지정하지 않고 실험을 하였다. 실험 결과 가중치가 장애물의 거리와 환경에 따라 실시간으로 제어되어 Fig. 6과 같이 두 가지 환경에 대하여 장애물과 충돌하지 않고 목표지점에 도달하는 것을 확인할 수 있었다.

다. 비교 분석

가중치 고정 모델과 가변 모델의 실험 결과 목표지점까지 무인 차량이 도달한 경우 모든 제한조건을 만족하는 것을 확인할 수 있었다. 가중치 고정 모델의 경우 사용자가 환경에 따라 가중치를 적합하게 설정하더라도 최단경로로 주행하지는 못했다. 하지만 가중

치 가변 모델은 환경에 따라 가중치를 변화시킴으로써 센서를 통해 보이는 환경에 대해서 최적의 경로를 생성하였다. 또한 두 번째 환경인 바둑판 모양의 환경에서는 무인 차량이 방향 선택에 있어서 빠르게 목표지점에 도달하는 방향으로 주행하였다.

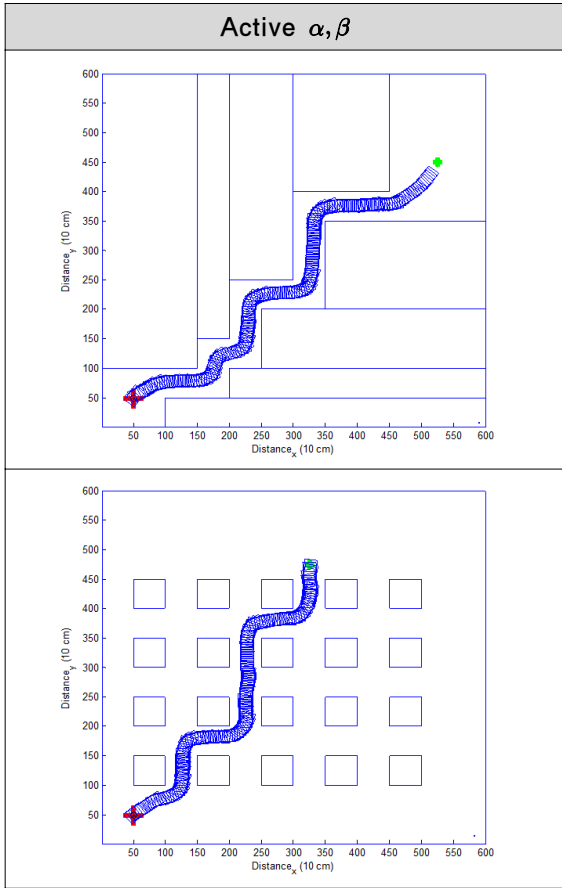


Fig. 6. 가중치 가변 모델

5. 결론

본 연구에서는 무인지상차량이 목표지점을 향해 장애물과 충돌하지 않고 최적의 경로로 주행하는 목적함수와 제한조건을 제안하고 퍼지 제어를 통한 가중치 가변 모델을 설계하였다. 제안된 알고리즘은 모의실험을 통하여 검증하고 가변 가중치 알고리즘을 적용하였을 때 무인지상차량의 모든 상태에서 장애물과의 최단거리 데이

터가 0.2m 보다 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 무인지상차량이 제한조건을 만족하면서 목표지점에 도달하고 무인지상차량과 장애물의 거리에 따라 가중치 값들이 퍼지 제어를 통해 제어가 된다는 것을 의미한다. 향후에는 본 연구에서 개발/검증된 알고리즘을 이용하여 무인지상차량의 자율주행을 좁은 복도 환경과 장애물이 많은 복잡한 환경에서 실험적으로 검증하는 연구가 수반되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원 국방무인화기술 특화연구센터를 통한 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었다.

Reference

- [1] J. Borenstein, "Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 19, No. 5, pp. 1179~1187, Sept./Oct. 1989.
- [2] J. Borenstein, Y. Koren, "The Vector Field Histogram-fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots", IEEE Journal of Robotics and Automation Vol. 7, No. 3, pp. 278~288, June 1991.
- [3] Dieter Foxy, Wolfram Bardy, Sebastian Thrunyz, "The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance", IAI-TR-95-13, August 1995.
- [4] J. Minguez, "Nearness Diagram(ND) Navigation : Collision Avoidance in Troublesome Scenarios", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 20, No. 1, pp. 45~59, 2004.
- [5] 정해관, 현경학, 김수현, 박윤근, "구조로봇에 적합한 장애물 회피 알고리즘 ELA의 실험적 검증", 한국로봇공학회 논문지, 제4권, 제2호, pp. 105~111, 2009.
- [6] 변중남, "퍼지논리 제어(Fuzzy-Logic Control)", 홍릉과학 출판사, 1997.
- [7] Driankov, Hellendoorn, Reinfrank, "An Intro. to Fuzzy Control", Springer-Verlag, 1993.