

무인차량의 주행성분석을 위한 방향별 속도지도 생성

The Generation of Directional Velocity Grid Map for Traversability Analysis of Unmanned Ground Vehicle

이 영 일* 이 호 주* 지 태 영*
Young-il Lee Ho-Joo Lee Tae-Young Jee

Abstract

One of the basic technology for implementing the autonomy of UGV(Unmanned Ground Vehicle) is a path planning algorithm using obstacle and raw terrain information which are gathered from perception sensors such as stereo camera and laser scanner. In this paper, we propose a generation method of DVGM(Directional Velocity Grid Map) which have traverse speed of UGV for the five heading directions except the rear one. The fuzzy system is designed to generate a reasonable traveling speed for DVGM from current patch to the next one by using terrain slope, roughness and obstacle information extracted from raw world model data. A simulation is conducted with world model data sampled from real terrain so as to verify the performance of proposed fuzzy inference system.

Keywords : DVGM(Directional Velocity Grid Map), Traversability Analysis, Local Path-Planning, Fuzzy Inference, UGV (Unmanned Ground Vehicle)

1. 서론

근래에 들어 험지 및 야지와 같은 거친 외부환경에서 운용되는 무인차량(Unmanned Ground Vehicle)의 필요성이 증가함에 따라 무인차량의 자율주행 기술에 대한 관심 및 연구가 집중되어지고 있다. 무인차량이 알려지지 않은 외부 환경에서 임무를 수행하며 기동하기 위해 필요로 하는 가장 근본적인 기술 중 하나는 지형 감지용 센서로부터 획득한 실시간 데이터를 활용하여

경로계획(Path Planning) 컴포넌트에서 필요로 하는 주행성분석용 정보를 생성하는 것이다. 이러한 기술에 내재하는 센서의 측정오차 및 데이터 처리의 불명확성으로 인해 인공적으로 만들어진 구조물로 구성된 실내 환경에서의 자율주행기술보다 외부 환경에서 이루어지는 자율주행기술이 더욱 높은 복잡도를 보인다.

외부환경에서 운행하는 무인차량의 주행성 분석용 정보생성과 관련된 기존 방법으로는 점유격자(Occupancy Grid) 지도^[1]와 주행성격자(Traversability Grid) 지도^[2~5]가 있다. 점유격자 지도는 장애물에 대한 공간적 정보를 격자지도에 확률적으로 표현하는 방법이며, 주행성격자 지도는 다양한 센서들을 활용하여 주행환경에 대한 고도자료가 포함된 3차원 지형지도를 생성하고 이

† 2009년 6월 17일 접수~2009년 9월 11일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 이호주(hojoolee@yahoo.com)

지형지도를 기반으로 주행성 분석을 통해 주행성 지도를 생성하는 방법이다. 점유격자 지도의 경우 주행성 분석의 주요 인자인 장애물 검출 및 표현에 있어 빠른 계산시간을 보여주나, 주행성 분석의 또 다른 주요 결정인자인 경사도나 지형의 거칠기와 같은 지리학적 특성을 반영할 수 없다는 단점이 존재한다. 반면, 주행성 격자 지도는 장애물 및 지리적 정보를 반영하여 주행성 분석을 수행할 수 있으나 특정격자에서 수행되는 주행성 분석에 방향성을 고려할 수 없다는 문제점이 있다. 특정 격자 $G(x, y)$ 에서의 주행성 분석은 해당 격자 지형의 방향별 기하학적 특성 및 무인차량이 주행하게 되는 방향과도 밀접한 관계를 가지게 되는데 점유격자 지도 방법에서는 이러한 상관관계를 고려하여 주행성 분석을 할 수 없다는 의미이다.

본 논문에서는 자율주행시스템을 위한 지역경로계획 컴포넌트에서 공통으로 소요되는 탐지 영역에 대한 방향별 적정 주행속도 정보 생성에 대해 논한다. 무인차량에 장착된 쌍안 카메라 및 레이저거리측정기와 같은 지형감지용 센서로부터 탐지한 영역을 특정 크기의 패치로 나누고 각 패치에서 무인차량이 주행 가능한 속도를 지형 경사도 및 거칠기 그리고 장애물 정보를 반영하여 퍼지추론 방법을 통해 산출한다. 특히, 이러한 주행속도는 해당 격자 지형의 기하학적 특성뿐만 아니라 로봇이 주행하게 되는 방향과도 밀접한 관계를 가지게 되므로 후진을 제외한 전방 다섯 방향에 대한 주행가능 속도를 산출하여 속도지도를 생성하는데 이를 방향별 속도지도(DVGM : Directional Velocity Grid Map)라 한다. 제안된 알고리즘은 Fig. 1의 무인자율차량을 통해 획득한 실제 지형의 월드모델(World Model) 정보를 이용한 시험을 통해 그 특징과 성능을 분석한다.



Fig. 1. 월드모델 획득용 무인자율차량

2. 주행성 분석을 위한 지형의 특성 추출

무인차량이 험지 및 야지를 포함하는 거친 환경을 자율적으로 주행하기 위한 첫 단계는 지형감지 센서로부터 탐지한 특정 영역에 대해 주행성 분석을 수행하는 것이다. 지역경로계획에 필요한 기반정보를 제공하는 주행성 분석 단계에서는 후보경로들의 안정성 및 효율성을 평가할 수 있는 지형 특성 및 장애물에 대한 정보를 필요로 한다. Fig. 2에서처럼 무인차량의 크기와 근사한 특정영역을 패치라 하고 한 단위시간에 감지된 영역은 패치 크기를 기준으로 격자단위로 분할된다. 각 패치는 9시부터 3시까지 45도 단위로 무인차량이 놓이는 다섯 방향에 대해 Fig. 3의 과정을 통해 경사도 및 거칠기 정보와 같은 지형 정보 그리고 장애물 정보를 추출하게 된다. 이러한 정보들은 해당 패치의 해당 방향에 대한 퍼지추론 기반 주행속도 산출에 활용된다.

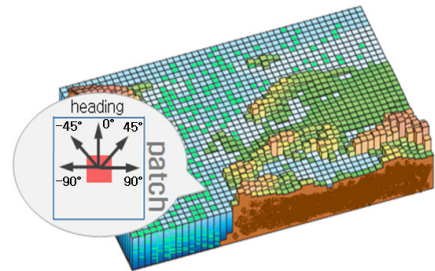


Fig. 2. DVGM을 구성하는 패치

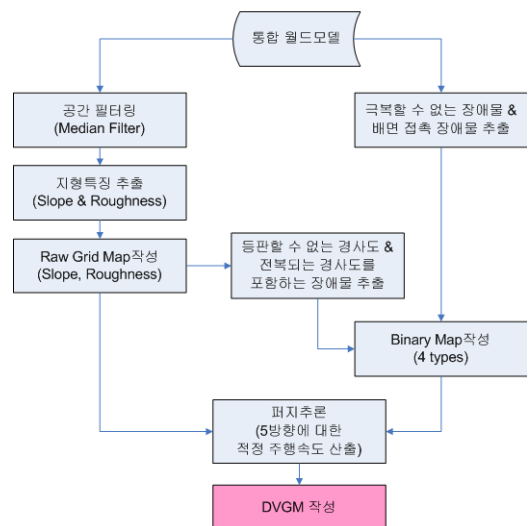


Fig. 3. 무인차량의 주행성 분석 단계

가. 지형의 경사도(Slope) 추출

지형의 경사도는 무인차량의 주행가능 속도를 저하시키는 지형적 요소 중 하나로 특정 방향으로의 고도의 구배(Gradient)를 나타내는 값이다. 상승지형인 경우에는 양의 값, 하강 지형의 경우에는 음의 값으로 표시된다. 일반적으로 기울기는 영상정보로부터 추출하거나 구축된 지형 맵으로부터 계산될 수 있으며 그 방법으로는 신경회로망을 이용하는 법^[6], 해석적인 계산 법^[7,8] 등이 있으며 본 연구에서는 쌍안 카메라와 레이저거리측정기로부터 생성된 월드모델링 정보를 기반으로 최소자승법을 이용하여 Fig. 2에서와 같이 특정 패치에서 다섯 방향에 대한 기울기를 추출한다^[9].

나. 지형의 거칠기(Roughness) 추출

거칠기는 특정 패치에서 측정되는 노면의 지질학적 불규칙성, 즉 요철의 빈도로서 주행가능 속도를 저하시키는 또 다른 요소가 된다. 거칠기를 얻는 방법으로 영상 데이터에서 추출되는 장애물의 크기와 집적도를 입력으로 하여 퍼지추론하는 법^[10], 프랙탈 기법을 이용하는 법^[6,11], 지형 맵을 기초로 Fourier 변환을 이용하는 법^[8], 평균고도에 대한 RMS를 이용하는 법^[12] 등이 제안되고 있다. 최근에는 프랙탈 이론과 RMS 측도를 지형의 거칠기 정보 추출에 많이 활용하고 있으며 본 연구에서도 이 방법을 채택하였다. 자연지형의 거칠기 정보 추정에 프랙탈 이론을 적용하고 있는 대표적인 방법으로는 box-counting법, ε-blanket법, spectral 해석법과 프랙탈 브라운 함수(Fractal Brown Function)이 있으며, 본 연구에서는 프랙탈 브라운 함수를 이용하여 특정 패치에서 다섯 방향에 대한 거칠기를 추출한다^[9].

다. 장애물 정보 추출

무인차량의 방향별 주행가능 속도정보를 포함하는 DVGM을 생성하는 과정에서, 장애물이 존재하는 패치를 미리 추출하게 되면 해당 패치에 대한 속도 추출 과정을 생략할 수 있어 성능향상을 기대할 수 있다. 또한 장애물 주변에 배치된 패치들의 주행가능 속도를 추정함에 있어 해당 장애물의 정보가 활용되어진다. WM의 고도정보를 활용하여 각 패치에서 추출 가능한 장애물 종류로는 극복할 수 없는 장애물, 로봇 배면에 접촉되는 장애물, 등판할 수 없는 경사도 그리고 전복되는 경사도와 같은 네 가지 형태로 구분된다

^[13]. 여기서 극복할 수 없는 장애물이란 무인차량의 자체적인 주행능력으로 넘어갈 수 없는 높이, 즉 앞바퀴가 타고 넘어갈 수 없는 높이를 의미하며 타이어의 직경을 D_t 라 하면 그 절반인 $D_t/2$ 로 정의되었다. 로봇 배면에 접촉되는 장애물은 진행방향으로의 고도차는 작지만 바퀴 사이의 지면이 로봇의 배면에 접촉되는 장애물을 의미한다. 추출된 장애물 정보는 이진장애물 지도(Binary Map) 생성에 이용되며 이는 A*나 Range 알고리즘^[14]과 같은 지역경로계획 컴포넌트에서 활용된다.

3. 퍼지추론을 활용한 DVGM 생성

본 장에서는 지형감지센서부터 탐지된 로컬 영역을 구성하는 DVGM의 패치에 저장될 무인차량의 방향별 적정 주행속도를 추정하는 퍼지시스템을 설계한다. Fig. 4에 보이듯 퍼지시스템의 출력결과인 특정 패치 $G_{(x,y)}$ 의 특정방향에 대한 추정 주행속도 \bar{v} 산출에 영향을 미치는 입력 인자는 경사도 및 거칠기와 같은 지형적 특성, 그리고 네 가지 종류의 장애물 정보로 구성된다. 퍼지시스템은 해당 패치 및 진행방향에 놓인 경사도 및 거칠기 정보를 반영하여 각각의 인자에 대한 퍼지집합의 단일값 및 단일값에 대한 소속함수 값을 산출하며, 최종적으로 무게중심법을 이용한 비퍼지화를 통해 무인차량의 적정 주행속도를 계산한다. DVGM 생성은 안전우선/속도우선 모드와 같은 무인차량의 운용모드에 따라 차별화되는데, 이를 위해 본 논문에서는 차별화된 퍼지규칙 테이블 및 속도통합 방법을 적용한다.

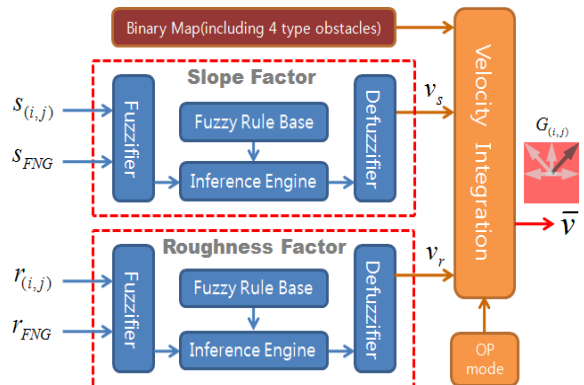


Fig. 4. DVGM 생성을 위한 퍼지추론 단계

가. 전방이웃격자(FNG)

특정 패치에서의 주행속도를 산출하기 위해서는 해당패치의 WM 데이터로부터 추출되는 경사도 및 거칠기와 같은 지리학적 정보를 필요로 한다. 그러나 해당패치의 정보만을 고려할 경우 진행방향에 놓인 이웃 패치들의 정보를 활용할 수 없어 현실적인 주행속도 산출이 어려워진다. Fig. 5의 ①, ②번 패치와 같이 동일한 경사도와 거칠기 정보를 가지는 경우, 해당패치의 지리학적 정보만으로 산출한 9시방향의 주행속도는 동일하게 된다. 이런 경우 주행속도 산출에 해당 격자의 정보뿐만 아니라 진행방향에 놓인 패치들의 정보를 반영할 경우 ①번 패치의 추정속도는 ②번 패치의 추정속도보다 적게 산출되어져, 보다 사실적인 주행속도 산출이 가능해진다. 이러한 예측된 전방 패치의 정보를 FNG(Front Neighborhood Grids)라 하며 FNG를 구성하는 격자들의 대푯값은 식 (1)과 같이 계산되어진다.

$$FNG = \frac{\sum_{i=1}^{num(G_{FNG})} w_{G_i} \times g_{G_i}}{num(G_{FNG})} \quad (1)$$

$$d_s = (v \times 0.1)^2 \quad (2)$$

$$num(G_{FNG}) = \min(\text{int}(\frac{d_s}{\Delta G}) + 1, FNG_{max}) \quad (3)$$

where d_s : minimum braking distance, ΔG : the size of patch, FNG_{max} : the max number of FNG, w_{G_i} : weighting factor of grid G_i , g_{G_i} : geographic data of grid G_i

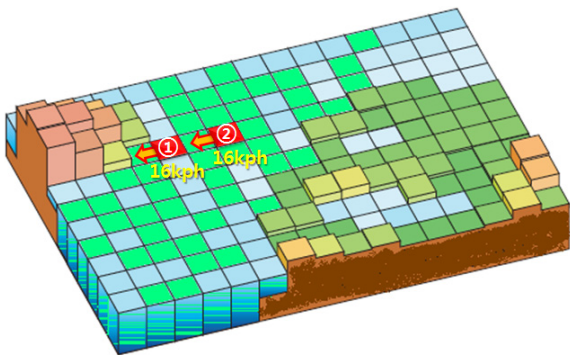


Fig. 5. FNG의 필요성 도해

나. 경사도 인자에 의한 속도 추정

로봇의 다음 이동경로와 속도를 결정하는 지역경로 설정을 수행하기 위해서는 로봇이 탐지한 영역에 대한 주행성 분석을 필요로 한다. 이를 위해서는 영역에 대한 다수의 지리학적 특성이 반영되어야 하는데, 그 중 가장 많은 영향을 미치는 인자중 하나는 지형의 경사도이다. 본 논문에서 제안하는 퍼지시스템에서 특정 패치의 특정 방향에 대한 주행속도를 산출하기 위해 지형에 존재하는 경사도를 반영하는데 해당 패치의 특정방향 경사도 $s_{(i,j)}$ 와 특정방향의 FNG 경사도 s_f 를 입력으로 준다. $s_{(i,j)}$ 와 s_f 는 정규화된 영역 [0, 1]에서 각각 3개의 퍼지집합 {FLAT, SLOPED, STEEP}으로 분할된다. FLAT는 평평한 지형을, SLOPED는 약간 기울어진 지형을 그리고 STEEP는 가파른 지형을 의미하며 Fig. 6은 두 입력의 소속함수를 보여주고 있다. 하강 경사도도 상승 경사도와 같이 경사도가 클수록 주행이 더 어려우므로 경사도가 음일 경우에는 절대치를 취하고 Fig. 6을 적용한다.

출력 변수인 v_s 는 4개의 퍼지집합 {VERY-SLOW, SLOW, FAST, VERY-FAST}로 분할되며 Fig. 8은 이를 보여준다. 경사도를 반영한 주행성 속도를 추정함에 있어 무인차량에 부여된 임무에 따라 식별되는 운용모드별로 차별화된 방법을 적용할 필요가 있다. 본 논문에서는 Table 1~2와 같이 안전우선 모드 및 속도우선 모드에 따라 차별화된 퍼지규칙을 적용한다. 퍼지규칙은 운용모드별로 각각 9개의 규칙으로 구성되며 경사도가 클수록 주행속도를 줄이는 방향으로 설정하였다.

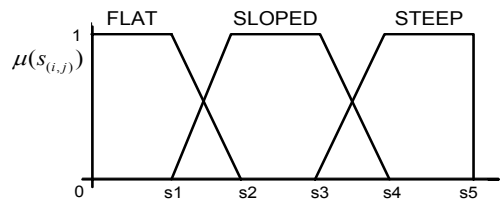


Fig. 6a. 경사도 $s_{(i,j)}$ 에 대한 소속함수

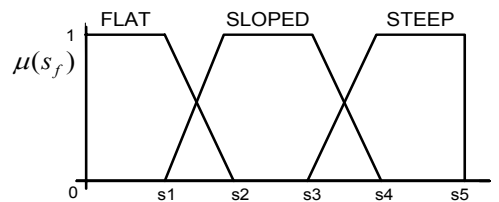


Fig. 6b. FNG s_f 에 대한 소속함수

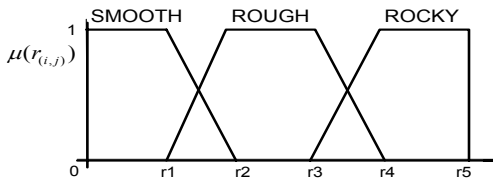


Fig. 7a. 거칠기 $r_{(i,j)}$ 에 대한 소속함수

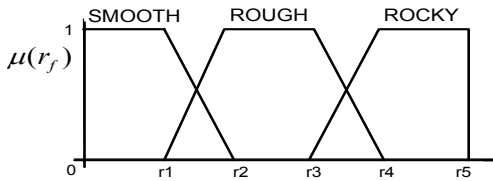


Fig. 7b. FNG r_f 에 대한 소속함수

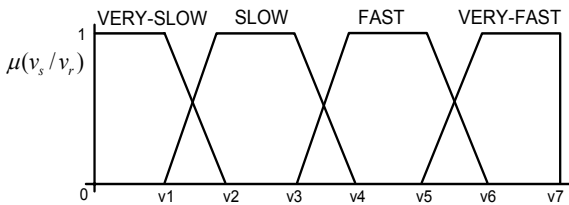


Fig. 8. 주행속도 v_s 및 v_r 에 대한 소속함수

Table 1a. 안전우선 모드에서의 경사도 퍼지 규칙

		Current Slope, $s_{(i,j)}$			
		FLAT	SLOPED	STEEP	
Slope of FNG s_f	FLAT	V-FAST	FAST	V-SLOW	
	SLOPED	FAST	SLOW	V-SLOW	
	STEEP	SLOW	SLOW	V-SLOW	

Table 1b. 속도우선 모드에서의 경사도 퍼지 규칙

		Current Slope, $s_{(i,j)}$			
		FLAT	SLOPED	STEEP	
Slope of FNG s_f	FLAT	V-FAST	FAST	SLOW	
	SLOPED	V-FAST	FAST	V-SLOW	
	STEEP	SLOW	SLOW	V-SLOW	

Table 2a. 안전우선 모드에서의 거칠기 퍼지 규칙

		Current Roughness, $r_{(i,j)}$			
		FLAT	SLOPED	STEEP	
Roughness of FNG r_f	FLAT	V-FAST	FAST	V-SLOW	
	SLOPED	FAST	SLOW	V-SLOW	
	STEEP	SLOW	SLOW	V-SLOW	

Table 2b. 속도우선 모드에서의 거칠기 퍼지 규칙

		Current Roughness, $r_{(i,j)}$			
		FLAT	SLOPED	STEEP	
Roughness of FNG r_f	FLAT	V-FAST	FAST	SLOW	
	SLOPED	V-FAST	FAST	V-SLOW	
	STEEP	FAST	SLOW	V-SLOW	

다. 거칠기 인자에 의한 속도 추정

노면의 지질학적 불규칙성을 의미하는 지형의 거칠기 또한 특정 패치의 주행속도를 산출하기 위해 반영되는 중요한 지형정보이다. 본 논문에서 제안하는 퍼지시스템에서는 해당 패치의 특정방향 거칠기 $r_{(i,j)}$ 와 특정방향의 FNG 거칠기 r_f 를 입력으로 준다. $r_{(i,j)}$ 와 r_f 는 정규화된 영역 $[0, 1]$ 에서 각각 3개의 퍼지집합 {SMOOTH, ROUGH, ROCKY}으로 분할된다. SMOOTH는 요철이 없는 지형을, ROUGH는 약간 요철이 포함된 지형을 그리고 ROCKY는 아주심한 요철을 포함하는 지형을 의미한다. Fig. 7은 이러한 두 입력들의 소속함수를 보여주고 있다.

출력 변수인 v_r 은 경사도에 의한 산출된 주행속도 v_s 와 동일한 소속함수를 가지며, 퍼지규칙 역시 경사도 입력 인자에 의한 추론과 같이 안전우선 모드 및 속도우선 모드에 따라 차별화된 퍼지규칙을 적용한다. 퍼지규칙은 Table1, Table 2와 같이 운용모드별로 각각 9개의 규칙으로 구성되며 거칠기가 심할수록 주행속도를 줄이는 방향으로 설정하였다.

라. 운용모드에 따른 최종 주행속도 통합

퍼지시스템의 입력은 DVGM 생성을 위해 반영되는 경사도 정보와 거칠기 정보로 나뉘며 각 입력인자에 해당하는 정보를 반영한 적정 주행속도를 무게중심법(COG)을 이용한 비퍼지화를 통해 산출하고 이를 무인차량의 다양한 임무모드에 특성화된 방법으로 통합한 후 무인차량의 최종 주행속도를 추론해 낸다. 긴급복귀 임무, 감시/경계 임무, 이동 임무, 지피탐지 임무와 같은 무인차량의 다양한 임무모드는 지역경로계획 분야로 전파되어 속도우선 모드 및 안전우선 모드로 귀결되어진다. 속도우선 모드는 가장 기본적인 모드로 무인차량이 가장 빠르게 이동할 수 있는 지역경로설정을 위한 DVGM 생성 모드로 식 (4)와 같이 최종속도를 추정한다. 안전우선 모드는 야지나 험지와 같은

무인차량의 주행속도 산출에는 해당 격자의 특정방향 정보뿐만 아니라 진행방향에 놓인 패치들의 정보인 FNG를 반영할 필요성이 있음을 이전 장에서 언급하였다. DVGM의 패치 G(5, 4)에 위치하는 높이 장애물을 향하는 패치 G(2, 4), G(3, 4) 그리고 G(4, 4)의 3시 방향 주행속도가 Fig. 11에서 보인다. 방향별 주행속도는 현재 패치에서 특정방향에 위치한 다음 패치로 이동할 경우 추정되는 주행속도를 의미하므로, 패치 G(4, 4)의 3시 방향 속도는 '0'로 산출된다. 또한 패치 G(2, 4) 및 G(3, 4)의 3시 방향 속도는 전방의 높이장애물로 인해 장애물에 가까이 위치할수록 높은 s_f 값 및 r_f 값을 가지게 되므로, 주행속도는 '59'와 '34'로 점점 낮게 산출되어 진행 방향의 장애물을 반영한 보다 사실적인 주행속도 추정 결과를 보여준다.

Fig. 12는 패치 G(9, 4)의 실제 WM 데이터와 이로 부터 추출한 방향별 경사도 및 거칠기 정보, 그리고 이 두 입력을 활용한 모드에 따른 방향별 주행 속도값을 보여준다. 해당 패치의 경사도는 1시 방향으로 가파르게 형성되어 있으며 거칠기는 모든 방향에서 약간 요철진 형태를 보이는데, 이로 인해 타 방향의 주행속도보다 12시 및 1시 30분 방향의 주행속도가 현저히 낮음을 확인할 수 있다. 그리고 10시 30분 방향의 속도가 '0'로 산출된 이유는 FNG중 하나인 패치 G(8, 3)의 1시 30분 방향에 전복되는 경사도가 존재하기 때문이다.

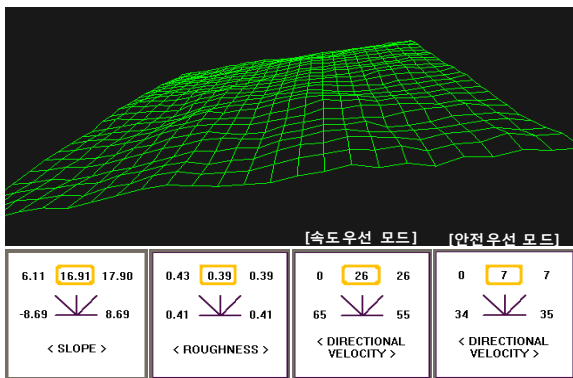


Fig. 12. 패치 G(9,4)의 WM Data 및 주행속도

Table 3은 패치 G(9, 4)의 12시 방향에 대한 운용모드별 주행속도 산출 과정 및 결과를 보여준다. 동일한 경사도와 거칠기를 가지는 패치라 하여도 속도우선 및 안전우선과 같은 운용모드에 따라 산출되는 주행속도

는 크게 달라짐을 확인할 수 있다. 표에서 경사도 및 거칠기의 값은 0과 1사이로 정규화 시킨 값이며, 속도는 무인차량의 최고속도에 대한 백분율 값을 의미한다. FNG를 의미하는 s_f 및 r_f 가 높게 나온 것은 G(9, 2)에 위치한 높이장애물의 영향을 받았기 때문이며, 이로 인해 12시방향의 통합 주행속도가 전반적으로 낮게 추정되었음을 확인할 수 있다.

Table 3. G(9, 4)의 12시 방향 DVGM 산출결과

Slope	속도우선 Mode		안전우선 Mode	
	$s_{(i,j)}$	s_f	$s_{(i,j)}$	s_f
	0.56	0.75	0.56	0.75
v_s	7.5		7.5	
Roughness	$r_{(i,j)}$	r_f	$r_{(i,j)}$	r_f
	0.39	0.66	0.39	0.66
v_r	36.0		35.0	
\bar{v}	26.4		7.5	

5. 결론

본 논문에서는 쌍안 카메라 및 레이저스캐너와 같은 지형감지센서로부터 획득한 월드모델 데이터를 이용하여 지형의 경사도 및 거칠기와 같은 기하학적 정보를 추출하고, 이를 활용하여 무인차량의 다섯 방향에 대한 주행속도를 저장한 격자기반의 DVGM을 생성하는 퍼지시스템을 제안하였다. 특히 DVGM을 생성함에 있어 진행방향에 놓인 이웃패치들의 정보인 FNG를 활용하여 보다 사실적인 속도추정을 가능하게 하였으며, 또한 무인차량의 운용모드 개념을 적용함으로써 지형의 기하학적 정보뿐만 아니라 주어진 임무에 따라 속도우선모드 및 안전우선모드로 구분된 적절한 속도추정이 가능하다는 특징을 지닌다. 제안된 DVGM 생성 퍼지시스템의 성능은 무인자율차량에 탑재된 지형감지용 센서로부터 획득한 월드모델 데이터를 이용하여 실시간으로 방향별 주행성속도지도를 생성하는 시험을 통해 검증하였으며, 지형의 기하학적 정보와 임무의 운용 특성이 반영된 합리적인 DVGM이 생성됨을 확인하였다. 무인차량의 이동환경에 대한 주행성분석 결과인 DVGM은 무인차량이 주어진 목표점을 지향하며 안정성과 최적화 관점에서 지역경로계획을 수행하기

위한 정보제공자 역할을 수행한다. 후속연구에서는 방향별 주행속도 정보를 담고 있는 DVGM을 활용한 지역경로계획 알고리즘을 개발이 수행되어야 한다.

Reference

- [1] Elfes, A., "Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation", IEEE Computer Magazine, 1989.
- [2] Ye, C., & Borenstein, J., "T-transformation: Traversability Analysis for Navigation on Rugged Terrain", the Defense and Security Symposium, 2004.
- [3] H. Seraji and A. Howard, E. Tunstel, "Safe Navigation on Hazardous Terrain", Proc. of the 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3084~3091, 2001.
- [4] A. Howard, H. Seraji and E. Tunstel, "A Rule-based Fuzzy Traversability Index for Mobile Robot Navigation", Proc. of the 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2001.
- [5] H. Seraji and B. Bon, "Multi-range Traversability Indices for Terrain-Based Navigation", Proc. of the 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2674~2681, 2002.
- [6] N. Yokoya and K. Yamamoto, "Fractal-Based Analysis and Interpolation of 3D Natural Surfaces and Their Application to Terrain Modeling", Computer Vision, Graphic, and Image Processing, Vol. 46, pp. 284~302, 1989.
- [7] D. Langer, J. K. Rosenblatt and M. Hebert, "A Behavior-Based System for Off-Road Navigation", IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 10, No. 6, pp. 776~783, 1994.
- [8] R. Hoffman and E. Krotkov, "Terrain Roughness Measurements from Elevation Maps", SPIE Mobile Robots, Vol. 1195, 1989.
- [9] 진강규, 이현식, 이윤형, 소명옥, 신옥근, 채정숙, 이영일, "지형 고도 맵으로부터 기울기와 거칠기 추출 방법", 제어로봇시스템학회, Vol. 14, pp. 909~915, 2008.
- [10] H. Seraji, "Traversability Index : A New Concept for Planetary Robers", Proc. of the 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2006~2013, 1999.
- [11] L. Huajun, Y. Jingyu and Z. Chunxia, "A Generic Approach to Rugged Terrain Analysis Based on Fuzzy Inference", Proc. of the 8th Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision, pp. 1108~1113, 2004.
- [12] M. Castelnovi, R. C. Arkin and T. R. Collins, "Reactive Speed Control System Based on Terrain Roughness Detection", <http://smartech.gatech.edu/handle/1853/20784>
- [13] 진강규, 이현식, 이윤형, 이영일, "지형 고도 맵으로부터 Binary 장애물 탐지", 2008년도 한국군사과학기술학회 종합학술대회논문집, pp. 1081~1084, 2008. 8.
- [14] Bryan Nage and Alonzo Kelly, "Trajectory Generation for Car-like Robots Using Cubic Curvature Polynomials", Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 2001.