

무인자율차량을 위한 경로계획 알고리즘 및 시뮬레이터 개발

김 상 겸* · 김 성 균 · 이 용 우

에프엠전자(주) 기술연구소

Developments of a Path Planning Algorithm and Simulator for Unmanned Ground Vehicle

Sanggyum Kim* · Sunggyun Kim · Yongwoo Lee

FM Electronics Tech R&D Center, 562-2 Noeun-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-325, Korea

(Received 16 March 2006 / Accepted 2 January 2007)

Abstract : A major concern for Autonomous Military Robot in the rough terrain is the problem of moving robot from an initial configuration to goal configuration. In this paper, We generate a local path to looking for the best route to move an goal configuration while avoiding known obstacle from world model, not violating the mobility constraints of robot. Trough a Simulator for Unmanned Autonomous Vehicle, We can simulate a traversability of unmanned autonomous vehicle based on steering, acceleration, braking command obtained from local path planning.

Key words : Global path planning(전역경로계획), Local path planning(지역경로계획), Path planning(경로계획), Unmanned ground vehicle(무인자율차량), Local path candidate(후보지역경로)

1. 서 론

최근 몇 년 사이에 무인자율주행 차량의 경로계획에 관한 연구는 대학 및 연구소에서 많은 관심을 가지며 지속적으로 연구하는 분야이다. 특히, 무인자율주행 차량이 경로를 인식하여 스스로 주행할 경로를 생성해야할 조건으로 주행 하고자하는 목표 지점까지 경로를 파악하는 인식성과 주행 중에 인식되는 장애물에 대해 적절한 경로를 스스로 생성하여 이동할 수 있는 유연성 이다.¹⁾ 또한, 다양한 환경에서(산악, 평지, 사막 등) 장애물을 회피하여 강인한 최적 경로를 찾는 문제는 현재 활발히 진행 중이다.^{2,8)} 현재 경로계획에 있어 많이 사용되는 지도 구성 방법은 크게 grid 기반의 지도 구성과 network/graph기반의 지도 구성으로 나눌 수 있다.^{3,9)} 그리고

이러한 무인자율차량이 주행하고자하는 목표점을 향해 이동하기 위하여 경로 계획을 수립하는 방법은 크게 전역경로 계획과 지역경로 계획 두 가지로 분류한다.

첫 번째, 전역경로 계획¹⁾은 시작점부터 최종 목표점까지 DEM(digital elevation map) 등의 주행할 모던 지역의 지형정보를 가지고 지형 경사도 및 장애물 형태 등의 지형의 기하학적 정보를 통해 무인자율차량이 이동할 수 있는 최적의 전역 경로를 생성한다.

두 번째, 지역 경로 계획¹⁾은 무인자율차량에 부착된 탐지센서(쌍안 카메라, 레이저스캐너) 등을 통해 탐지된 한정 공간 내에서 DEM 등의 지형지도에 나타나지 않는 지형지물, 장애물을 회피할 수 있는 최적 지역경로를 생성한다.

따라서 본 논문에서는 주어진 전역경로 계획, 방법 정보 및 다중 센서 기반의 실시간 통합 월드모델

*Corresponding author, E-mail: ssanggyum@hanmail.net

링⁵⁾으로부터 추출된 주변 환경 정보를 기반으로 무인자율차량의 지역 경로 계획을 작성하기 위한 방법과 생성된 지역경로로부터 차량이동을 위한 wrench effort(조향, 가속, 감속)를 생성하는 방법, 그리고 통합 시뮬레이터를 통한 시뮬레이션 방법에 대하여 설명하고자 한다.

2. 경로계획 시스템

2.1 지역 경로 계획

일반적으로 전역 경로 계획으로부터 주어진 전역 경로는 DEM등의 지형지도기반으로 작성되며 실제로 무인자율차량이 시작점에서 목표점까지 주행할 때 주어진 전역 경로 상에 지형지도(DEM)에 존재하지 않는 지형지물 및 장애물 등이 나타나기 마련이다. 이 때, 무인자율차량은 차량에 장착된 센서를 통해 장애물을 회피하면서 전역경로에 수렴하는 방향으로 주행한다. 하지만 경우에 따라 탐지된 장애물의 형태와 크기가 다양하기 때문에 탐지된 장애물만을 회피하는 방식으로 주행한다면 때에 따라서

전역경로에 수렴하지 못하는 경우가 발생한다. 그러므로 다중 센서 기반의 통합 월드모델을 통해 전역경로에 수렴할 수 있는 별도의 경로 계획이 필요하게 되며 이를 지역경로 계획이라고 한다.

다음은 자율 주행을 위한 지역 경로 계획에 있어서 어떠한 정보가 필요한지를 알아보하고자 한다. 지역 경로 생성 시 우선적으로 고려해야 할 사항은 장애물이 나타났을 때 장애물을 회피할 수 있어야 하고, 주행 경로의 경사도는 차량의 전복에 대한 안정성을 보장하는 범위 내에 있어야한다. 또한, 주어진 전역 경로에 수렴하기 위해 현재 위치, 차량의 진행 방향에 대한 정보 및 속도정보가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 지역 경로 계획에서 실제 차량이 지나갈 수 있는 후보 지역경로를 생성하고 앞서 언급한 지형 및 위치, 자세, 속도 정보들로부터 후보 지역경로 중 최적의 경로를 선택하여 실제 무인자율차량이 주행해야할 경로를 생성하고 차량 시뮬레이터를 통해 차량의 주행성을 확인하는 방법에 대해 설명하였다. 다음 Fig. 1과 2는 본 논문에서 사용된

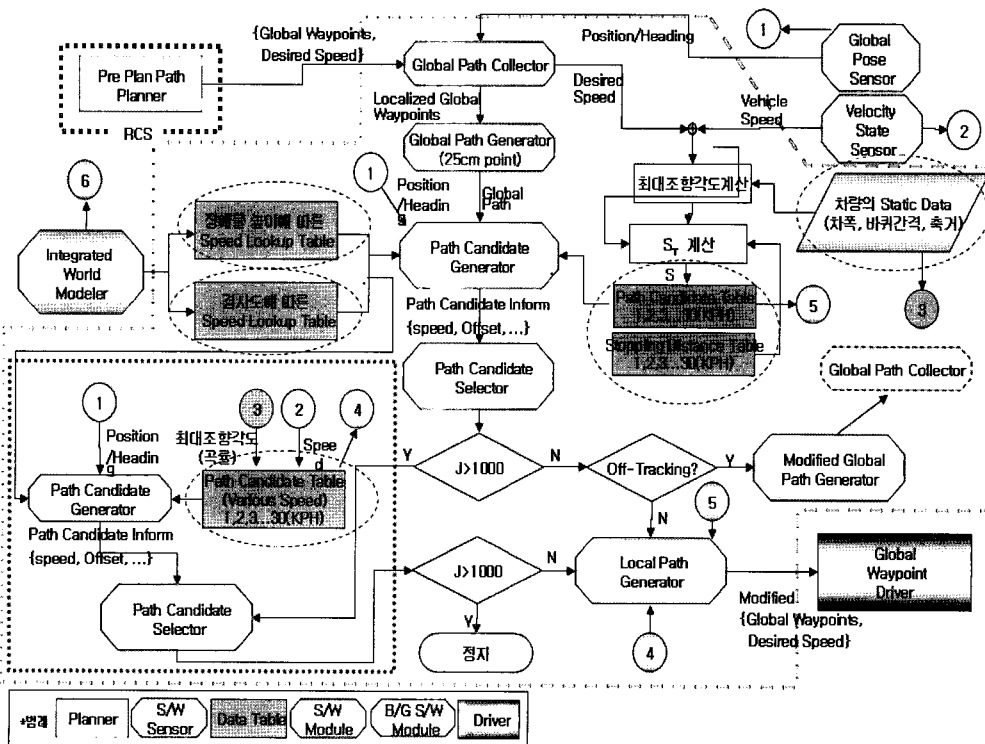


Fig. 1 Software configuration of the local path planning

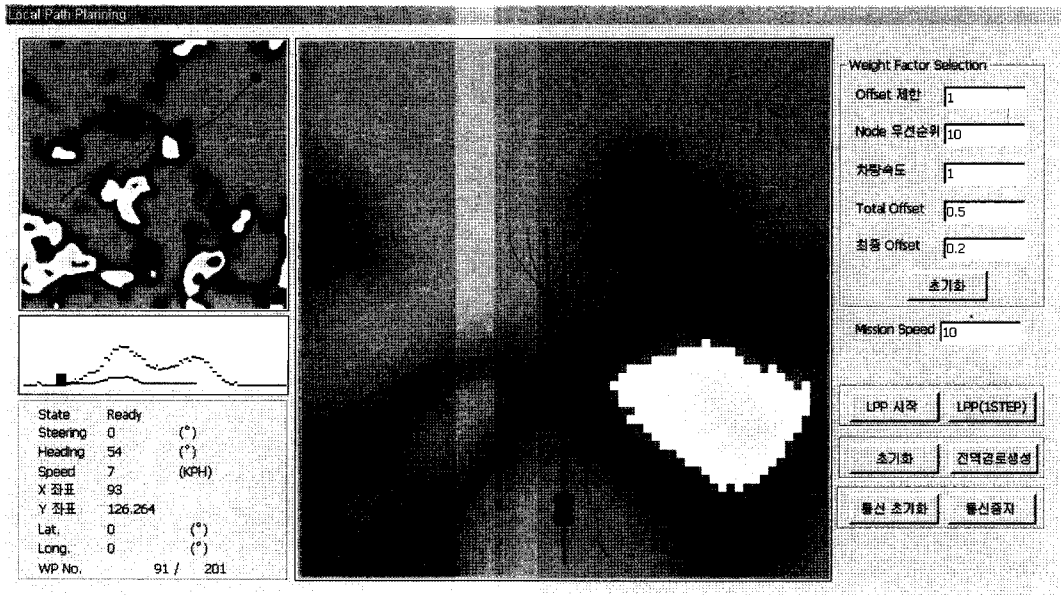


Fig. 2 Software of the local path planning

지역경로 계획 생성에 대한 전체 흐름도와 시뮬레이션 결과를 보여준다. Fig. 2에서 보여주는 것처럼 시작점으로부터 목표점까지 차량이 진행하며 도중에 장애물이 발견 시 전역경로기반으로 지역경로를 생성한다.

2.1.1 지역경로 계획을 위해 필요한 요소

앞 절에서 설명한 바와 같이 지역 경로를 생성하기 위하여 크게 3가지의 요소를 고려해야 한다. 첫 번째, 회피해야 할 장애물 및 주행해야 할 실제 지형의 경사도를 계산하기 위한 레이저스캐너, 쌍안카메라와 같은 다중 센서로부터 탐지된 실제계 센서 데이터를 기반으로 생성된 실시간 월드모델을 필요로 하며, 두 번째로는 목표점 및 전역 경로 수렴 확인을 위하여 DGPS, INS 등의 항법 센서로부터 무인자율차량의 위치 및 주행방향(heading)에 대한 정보를 필요로 한다. 세 번째로는 후보 지역경로 중 최적 경로를 선택하기 위한 요소로써 무인자율차량의 자세 및 속도에 대한 정보와 최대 조향 각도에 대한 정보를 필요로 한다.

본 논문에서는 가상으로 지형지물을 생성하고 주어진 전역 경로를 기준으로 후보 지역경로를 생성하였으며, 이들 후보 지역경로 중 지형지물의 경사

도 및 주행 속도에 따라 최적 경로를 선택함으로써 실제 무인자율차량이 이동해야 할 지역 경로를 생성하는 방법을 기술하였다.

2.1.2 후보 지역경로 생성

다음 Fig. 3은 후보 지역경로를 생성하기 위한 흐름도를 보여준다. 그리고 Fig. 4는 후보 지역경로를 보여준다. 후보 지역경로는 실제 무인자율차량이 주행할 수 있는 경로로 주행 중 로봇의 안정성이 유지 범위 내에서 생성한다. 후보 지역 경로는 여러 가지가 있으나 아래의 식 (1)과 같은 5차 함수로 작성된 차선변경 곡선식(lane changing curve)³⁾으로 얻을 수 있다.

$$d(s) = d_T \times \left(10 \left(\frac{s}{s_T} \right)^3 - 15 \left(\frac{s}{s_T} \right)^4 + 6 \left(\frac{s}{s_T} \right)^5 \right) \quad (1)$$

여기서, d(s)는 s위치에서 중심 경로로부터 떨어진 거리, s_T는 시작점으로부터 최종점까지의 직선 거리, d_T는 중심 경로로부터 벗어난 거리이다.

후보 지역경로의 생성 조건은 다음과 같다. 첫 번째, 후보 지역경로의 최종점에서의 진행 방향(heading)은 출발점에서의 차량의 진행 방향과 같아야 한다. 두 번째, 각 곡선의 폭(d_T)은 차량의 폭에 맞추어 일정하게 생성한다.

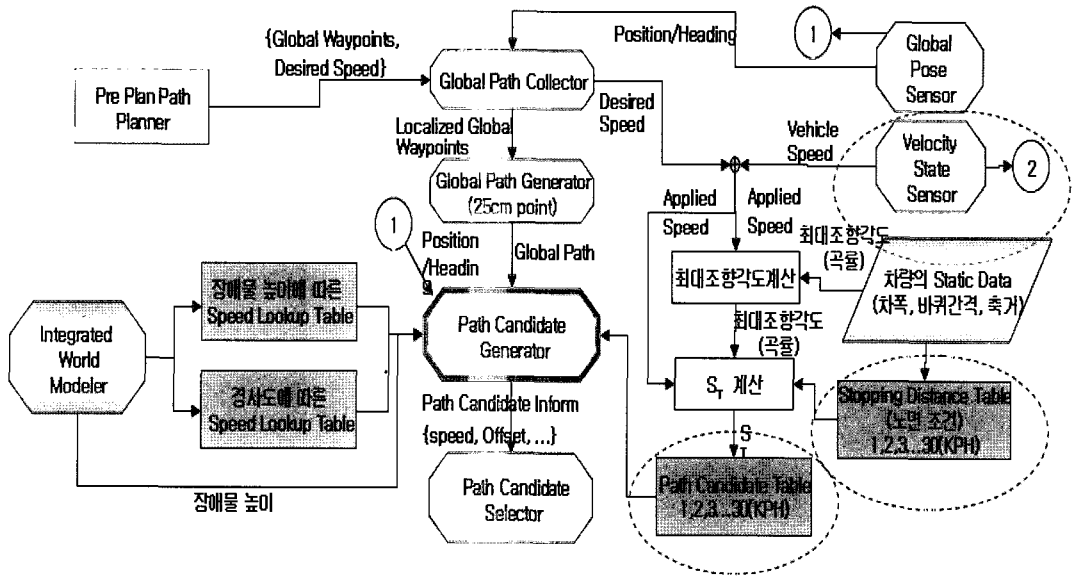


Fig. 3 The flowchart of the local path candidate

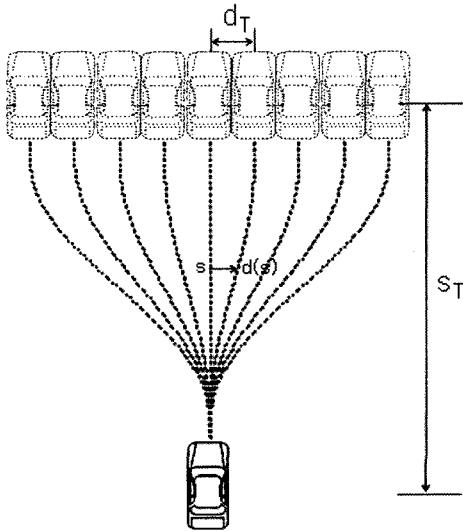


Fig. 4 Local path candidate

위와 같이 후보 지역 경로 생성 시 전복에 대한 안정성을 유지할 수 있는 최대 조향각도의 곡률 범위 내에서 생성한다. 즉, 차량의 속도에 따라 곡률에 제약 조건을 준다. 무인자율차량의 최대 조향각도(θ)가 주어졌을 때 Ackerman 차량 동역학 모델에 의해 최소 회전 반경(R) 및 최대 곡률(Cv)을 얻을 수 있고 그 식은 다음 식 (2)와 같다.

$$R = \frac{L}{\sin\theta}, Cv = \frac{1}{R} \quad (2)$$

여기서, L 은 차량의 축거(軸距 : wheelbase)이다. 차량의 속도에 따른 최대 곡률(C_{max})를 얻는 식은 다음 식 (3)으로 유도된다.

$$C_{max} = \frac{0.5 \times g}{v^2} \quad (3)$$

식 (3)에서 보는 바와 같이 차량의 속도가 증가할수록 최대곡률 값은 작아진다. 식 (2)와 식 (3)으로부터 얻은 최대 곡률 값 중 적은 값을 차량의 최대 곡률 값으로 정하면 앞서 언급한 바와 같이 차량의 속도에 따라 곡률에 제약 조건을 줄 수 있다. 속도에 따른 최대 곡률 값과 차선변경 곡선식 각 점에서의 곡률 값을 비교하여 최대 곡률 값을 넘지 않는 곡선을 후보 지역 경로 곡선으로 선택한다.

속도가 증가하면 식 (3)에서 보는 바와 같이 최대 곡률 값이 작아지는데 이 경우 생성할 수 있는 후보 경로의 개수가 줄어들게 된다. 후보 지역 경로의 개수를 적절하게 유지하기 위해서 속도에 따라 식 (1)의 차선 곡선 변경식의 S_T 를 증가시킨다.

2.1.3 후보 경로 선택 및 지역 경로 생성

Fig. 5는 앞서 생성한 후보 지역 경로들은 Tree 구조로 서로 연결한 그림이다. 먼저 10(KPH)에서의

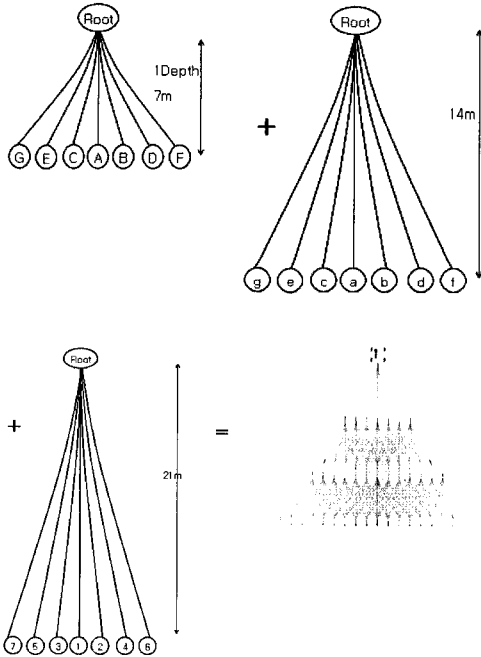
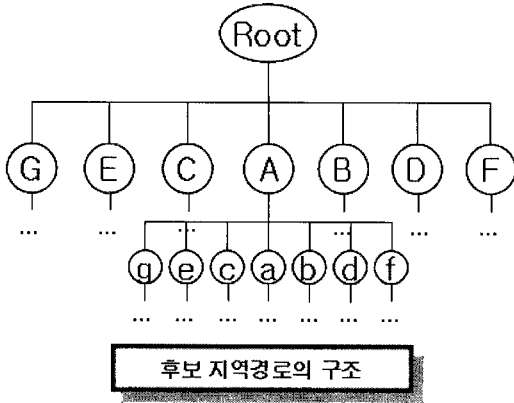


Fig. 5 Local path candidate of the total

후보 지역경로들의 구조를 살펴보면 7(m)길이의 후보 지역경로들이 3 depth로 연결되어 있고, 7(m) 후보 지역경로의 자식노드로 14(m) 후보 지역경로들이 연결되어 있으며, 21(m)의 후보 지역경로로 구성되어 있다. 이들 후보 지역경로의 각 노드에는 해당 후보 지역경로의 상세 정보가 담겨져 있다. 즉, 무인 자율차량이 후보 지역경로 중 어느 하나의 경로를 통해 가상으로 이동한다고 가정 했을 때, 지형의 경사도에 따라 차량의 자세(roll, pitch)가 달라지며 이러한 차량의 자세에 따라 안정성을 유지하면서 주

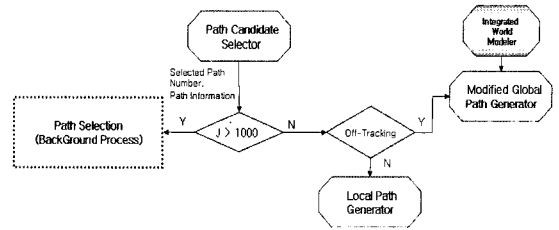


Fig. 6 Flowchart of path selection

행할 수 있는 최대 속도가 존재한다. 또한, 이동 후 전역 경로로부터 얼마만큼 떨어져 있는지를 알 수 있다. 다음 Fig. 6은 경로선택 흐름도를 보여준다.

Fig. 5에서 언급한 각 노드에 담긴 상세 정보를 통해 최적 경로를 선택한다.

최적 경로 시 우선적으로 고려해야할 사항은 무인자율차량의 안정성이고 그 다음으로는 후보 지역 경로의 속도와 전역 경로로부터 떨어진 거리이다. 즉, 지형의 경사도에 따라 속도가 정해지므로 속도가 빠른 후보 지역경로는 경사가 완만하다는 것을 뜻한다. 또한, 궁극적으로 지역경로 계획은 전역 경로를 수립하는 방향으로 경로 계획을 수립해야 하기 때문에 주행 속도가 빠르면서, 전역경로에서 가까운 최적 경로를 선택해야 한다. 아래의 식 (4)와 같이 속도와 전역경로로부터 떨어진 거리의 합의 최소값을 가지는 후보 지역경로를 최적 경로로 선택한다.

$$\min_{i=1 \sim 453} (J_i) = w_\phi v_\phi + w_\theta v_\theta + w_g \Delta d \quad (4)$$

여기서, v_ϕ 는 roll방향의 최대 속도, w_ϕ 는 pitch 방향의 최대 속도, Δd 는 전역경로로부터 떨어진 거리이고, w_θ , v_θ , w_g 는 각 항목의 조정 계수이다. Fig. 7은 무인주행차량이 이동시 장애물, 전역경로, 지역 경로 및 후보지역 경로를 보여준다.

2.1.4 긴급 장애물 회피를 위한 프로세스

주행하고 있는 무인자율차량 앞으로 갑작스럽게 사람이나 동물 등의 장애물이 출현할 경우 후보 지역경로로는 주행할 수 없는 경우가 발생한다. 이 때 주행 속도를 줄이면서 차량의 안정성이 유지되는 범위 내에서 앞서 구한 무인자율차량의 최대 곡률까지의 background 후보 지역경로를 생성하여 긴급 장애물을 회피할 수 있도록 한다. 이 프로세스는 담

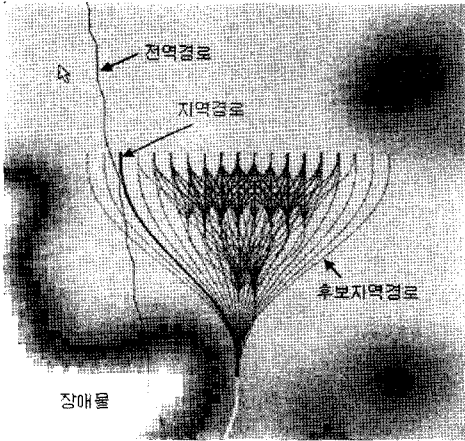


Fig. 7 Local path planning

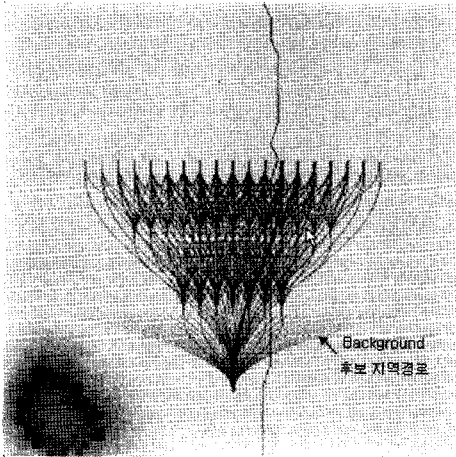


Fig. 8 Local path candidate of the background

지된 전방 장애물까지의 거리가 매우 근접한 경우에 실행된다.

2.1.5 무인차량 이동을 위한 JAUS 기반의 Wrench Effort 생성

최적 경로로 선택된 후보 지역경로는 실제 무인 자율차량이 이동할 수 있는 경로이다. 지역경로계획으로부터 생성된 경로는 이동점 데이터와 속도정보를 가지고 있다. JAUS(joint architecture for unmanned system)⁴⁾의 정의에 의하면 실제 차량의 이동은 조향, 가속, 감속 명령에 의해 이루어진다. 지역 경로 계획의 이동점 데이터와 속도로부터 JAUS에서 정의된 조향, 가속, 감속 값으로 변환한다.

즉, 지역경로계획자로부터 생성된 이동하고자하

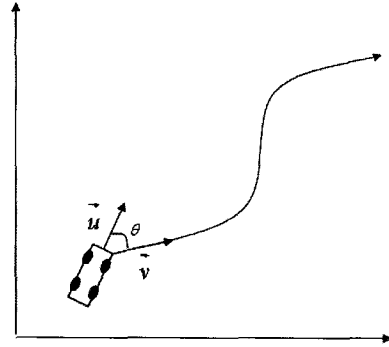


Fig. 9 The creation of steering command

는 경로이동점과 속도로부터 \vec{u} 를 생성한다. 또한 항법센서로부터 얻어진 현재 차량의 속도와 진행방향(heading)으로부터 \vec{v} 를 알 수 있다.

\vec{v} 의 방향이 \vec{u} 의 방향과 일치하지 않을 경우 일치되도록 해야 한다. Fig. 9에서 보는 차량 좌표계에서 \vec{v} 의 방향이 \vec{u} 의 방향보다 클 때는 좌조향하고, \vec{v} 의 방향이 \vec{u} 의 방향보다 작을 때는 우조향해야 한다. 따라서 이동해야 할 \vec{u} 의 방향과 현재 차량의 \vec{v} 의 방향을 일치시켜야 하므로 계산된 ϵ 값을 적절한 제어기의 이득을 곱하여 보내면 같은 방향으로 향하게 된다. 또 다른 방법으로는 지역경로 계획으로부터 생성된 이동점 데이터를 기준으로 각 데이터간의 회전하는 곡률을 계산하고 이로부터 나온 순간 곡률을 기반으로 조향각도를 얻을 수 있다.

$$\theta_s \cong 2\cos^{-1}\left(\frac{Rh}{2}\right) \tag{5}$$

가속, 감속은 현재 속도와 지역경로 계획으로부터 생성된 주행속도의 속도차를 비교하여 특정 값의 가감속 명령을 발생시켜 피드백 제어 루프(feed-back control loop)로부터 오차를 줄여가는 방법을 사용한다.

2.2 전역 경로 계획

2.2.1 전역경로 수집 및 분리

다음 그림 Fig. 10은 전역경로계획을 위한 경로 수집 및 분리의 흐름도를 보여준다. 전역경로계획자(global path planner 혹은 pre plan path planner)로부터 받은 전역 경로 좌표 체계는 DGPS에서 정해준

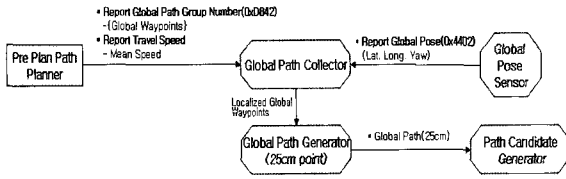


Fig. 10 Flowchart collection and separation of global path planning

WGS84 좌표체계로 되어 있다. 이 좌표계는 월드 모델의 좌표계와 일치시킨다. 즉, 항법 데이터로부터 받은 무인자율차량의 중심 위치를 기준으로 전역 경로 좌표계를 변환하여 차량 좌표계에 일치시킨다. 이 때, 변환해야 할 전역 경로 좌표의 범위는 월드 모델 지역 내에 존재하는 전역경로의 좌표에 해당되며 이 월드모델상의 전역경로(전체 전역경로로부터 분리한 전역경로의 좌표이므로 localized global waypoint라고 한다)는 후보 지역 경로를 생성하는 기준이 된다.

2.2.2 전역경로 재생성

전역 경로 상에 큰 장애물이 있어서 전역 경로를 따라 주행할 수 없을 경우 혹은 월드모델 범위 안에 전역 경로가 없을 경우 무인 자율 차량은 더 이상 전역 경로를 따라 경로 계획을 세울 수가 없다(Fig. 11). 이 경우 무인자율차량은 더 이상 주행 불가능하며 목표점까지 이동하기 위해서 새로운 전역 경로 계획을 수립(Fig. 12)해야 한다. 전역 경로 재생성 방법에는 두 가지가 있는데 첫째로 무인자율 차량 감시자가 수동으로 전역경로를 재 생성⁶⁾하거나 두 번째는 지역 경로 계획 안에서 전역경로를 자동으로 재생성하는 방법이 있다.

Fig. 11, 12는 전역 경로 상에 큰 장애물이 존재하여 더 이상 진행할 수 없는 경우 지역 경로 계획 내에서 별도의 전역경로를 자동으로 생성하여 주행하는 것을 보여주고 있다.

3. 무인 자율 차량 통합 시뮬레이터

Figs. 13과 14는 본 연구에서 무인자율차량을 가상으로 운용하기위한 통합 시뮬레이터를 보여준다. 본 시뮬레이터를 통한 DEM을 통해 가상으로 지형을 생성하고 다양한 환경조건에서의 전역경로 및 지역경로를 통해 차량의 주행성(traversability) 및 안

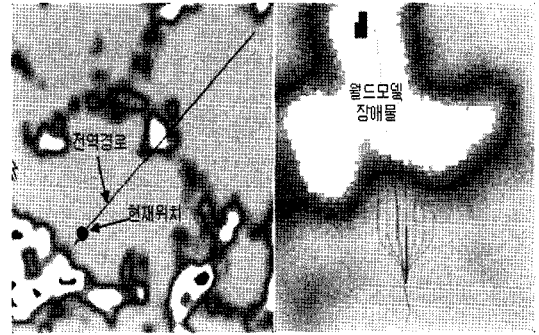


Fig. 11 Re-creation of global path(1)

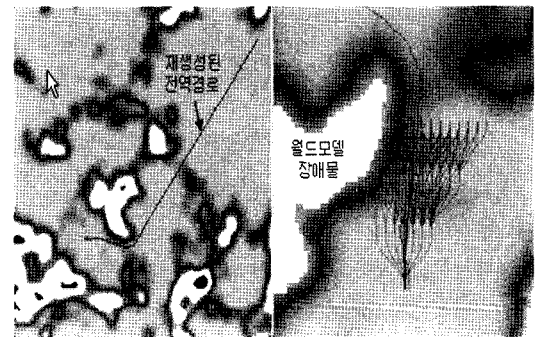


Fig. 12 Re-creation of global path(2)

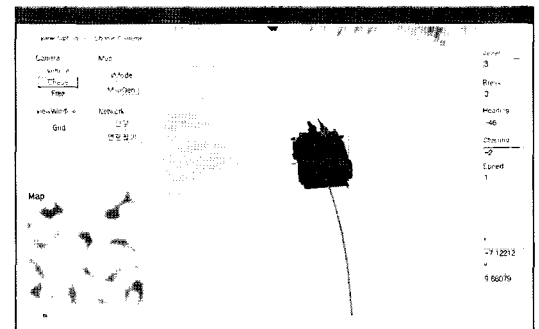


Fig. 13 Integration simulator (vehicle tracking mode)

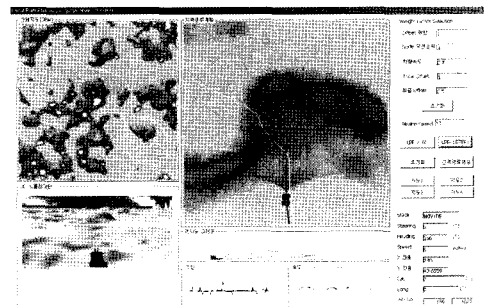


Fig. 14 Integration simulator (total mode)

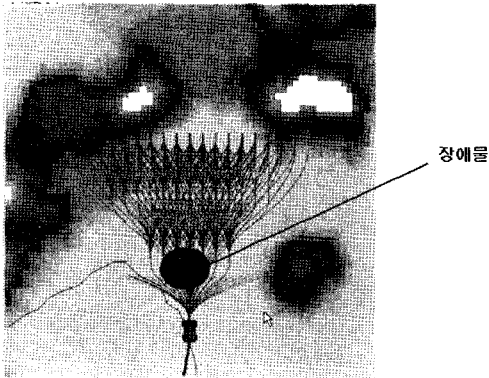


Fig. 15 Local path candidate of background

전성(safety)을 시험하였다.

Figs. 15와 16은 본 연구에서 사용한 A*알고리즘을 통하여 얻어진 결과를 보여준다. 만약 무인자율차량이 주어진 후보지역경로로 장애물을 회피할 수 없을 경우 또 다른 별도의 후보지역경로를 생성하여 장애물을 회피할 수 있으며, 주어진 전역경로를 생성된 후보지역경로를 통해 따라갈 수 없을 때 별도의 후보지역 경로를 생성한다. 그 경로는 현재로

봇의 Heading 방향을 따라 결정된다. 특히, Fig. 16은 통합 시뮬레이터의 전체화면을 보여주며 그림에서 보여주는 바와 같이 무인자율차량이 진행함에 따라 지형의 경사도 및 차량의 조향, 속도 등을 확인할 수 있으며 DEM 지도를 통하여 현재 차량의 진행 위치를 확인할 수 있다. 또한 이와 같은 결과는 항법 (waypoint)기반으로 주행하였다.

4. 결론

본 연구에서는 DEM(digital elevation map)을 기반으로 작성된 전역경로 및 지역경로 생성 알고리즘을 검증하고 다양한 환경(야지/평지)에서의 경로계획 실험을 위한 가상 통합 시뮬레이터를 개발하였다. 특히, 통합 시뮬레이터를 통하여 다양한 조건에서의 자율주행차량의 주행안전성을 확인 하였으며 이러한 확인은 가상의 Waypoint 기반의 항법 시스템을 통하여 수행하였다. 즉, 임의의 주행경로를 주어진 후 정확하게 경로를 추종하는지를 시뮬레이터를 통하여 검증하였다. 또한, 무인자율차량이 이동

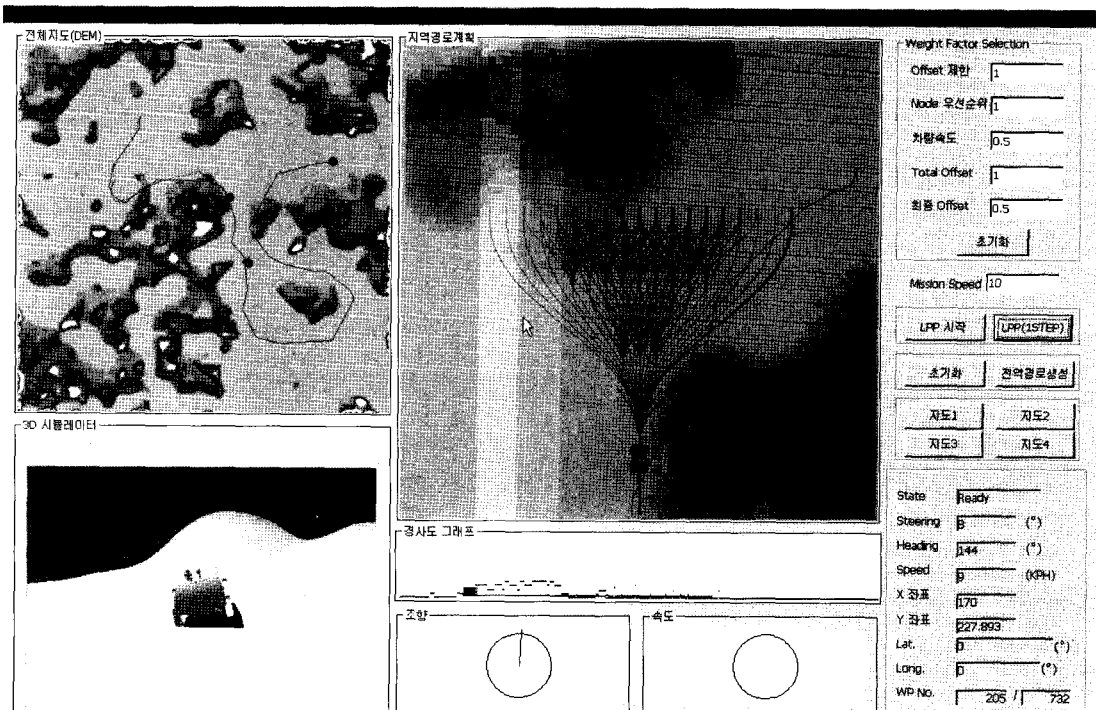


Fig. 16 The result of simulator

시 지형 및 장애물에 대한 정보를 획득하고 얻어진 정보를 이용하여 최적의 주행경로를 생성하였고. 선택된 최적경로 주행을 통하여 경로계획 알고리즘에 대한 검증을 수행하였다.

References

- 1) T. J. Park, B. G. Ryu, C. S. Han, J. K. Park, J. Y. Lee and S. H. Back, "Development of the Path Algorithm for an Unmanned Ground Vehicle," Proceeding of KIMST, pp.895-898, 2005.
- 2) T. S. Choe, J. Kim, Y. W. Park and T. Y. Ji, "Global Path Planning for Unmanned Autonomous Vehicles on Rough Terrain," Proceeding of KIMST, pp.883-886, 2005.
- 3) A. Zelinsky, "A Mobile Robot Exploration Algorithm," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.8, No.6, pp.707-717, 1992.
- 4) G. Sarah, What is Path Planning, Autonomous Solutions Inc, pp.1-4, 2003.
- 5) Y. W. Lee, M. G. Kim, S. G. Kim and H. Y. Park, "Real-time Integrate World Modeling based on Multi Sensor Fusion for Autonomous Navigation in the Field Terrain," Proceeding of KIMST, pp.879-882, 2005.
- 6) P. Garnier, T. Fraicheard, C. Laugier, I. Paromtichik and A. Scheuer, "Motion Autonomy Through Sensor-Guided Manoeuvres," Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique, pp.4-5, 1997.
- 7) Joint Architecture for Unmanned Systems (JAUS) Reference Architecture, Version 3.0, <http://www.jauswg.org/>.
- 8) S. G. Kim and J. H. Kim, "Research of the Unmanned Vehicle Control and Modeling for Obstacle Detection and Avoidance," Transactions of KSAE, Vol.11, No.5, pp.183-192, 2003.
- 9) S. G. Kim, T. Galluzzo, D. Macarthur, S. Solank, E. Zawodny, D. Kent, J. H. Kim and C. D. Crane, "Design of an Unmanned Ground Vehicle, Tailgator Theory and Practice," Int. J. Automotive Technology, Vol.7, No.1, pp.83-90, 2006.