실시간 주행성 분석에 기반한 6X6 스키드 차량의 야지 고속 자율주행 방법

A High-Speed Autonomous Navigation Based on Real Time Traversability for 6x6 Skid Vehicle

주 상 현, 이 지 흥*
(Sang Hyun Joo¹ and Jihong Lee²)

¹Agency for Defence Development

²Chungnam National University

Abstract: Unmanned ground vehicles have important military, reconnaissance, and materials handling application. Many of these applications require the UGVs to move at high speeds through uneven, natural terrain with various compositions and physical parameters. This paper presents a framework for high speed autonomous navigation based on the integrated real time traversability. Specifically, the proposed system performs real-time dynamic simulation and calculate maximum traversing velocity guaranteeing safe motion over rough terrain. The architecture of autonomous navigation is firstly presented for high-speed autonomous navigation. Then, the integrated real time traversability, which is composed of initial velocity profiling step, dynamic analysis step, road classification step and stable velocity profiling step, is introduced. Experimental results are presented that demonstrate the method for a 6x6 autonomous vehicle moving on flat terrain with bump.

Keywords: high speed autonomous navigation, real time traversability, unmanned ground vehicle, velocity estimation

I. 서론

최근 정보수집, 위험작업 및 경계 등의 군사적인 목적으로 군사용 무인 시스템의 활용이 점차 증대되고 있다. 또한, 미래의 전장은 전투용 로봇 혹은 무인차량이 추가된 군사용 무인 시스템이 전투 및 전투 지원을 수행하게 될 것이며, 위험지역을 중심으로 군사용 무인 시스템의 활용성이 더욱 커질 것으로 예측된다. 이러한 군사용 무인시스템을 미래전장의 주역으로 발전시키기 위해서는 무인차량의 자율주행기술의 향상이 필수적이다. 자율주행기술이란 무인차량이 스스로 주변을 인식하고 판단하여 스스로 목표점까지 주행하는 기술을 말하며, 주로 현재의 위치를 찾는 항법기술, 지형 및 장애물을 인식하는 지형감지기술, 경로 및 속도를 계획하고 추종하기 위한 플랫폼 구동명령을 생성하는 자율판단기술 및 구동명령으로부터 플랫폼을 제어하는 플랫폼제어기술 등으로 구성된다[1,2].

군사용 로봇은 상황에 따라서 긴급한 임무를 가지고 산악지형이나 건물 잔재가 널려있는 불규칙한 험로를 주행하여야 할 필요가 있다. 그러므로 이러한 목적을 가지고 있는 로봇에게는 달려야 할 노면 상태가 주행에 가장 큰 영향을 끼치므로 노면에 대한 차량의 동역학적 거동을 예측하여 차량의 안정도를 판단할 수 있는 알고리즘이 개발되어야 한다. 또한 무인차량은 예기치 않은 환경에 직면하더라도

목적지까지 가장 안전하고 빠른 경로를 찾아 임무를 수행할 수 있도록 지형환경의 주행성(traversability)을 온라인으로 분석하고 이에 대처할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 탑재된 센서로부터 구축된 월드모델(지형 맵)로부터 지형 정보(terrain information)를 추출하고, 진행방향에 대한 통과 여부 판단과 최적의 주행 가능 속도를 추정할 수 있는 기능이 요구된다.

무인자율주행의 주행성을 분석하여 주행속도를 결정하는 방법은 지금까지 크게 세가지 접근방법으로 연구되었다. 그 첫 번째는 지면의 거칠기에 따른 피치추론에 의한 속도결정 방법으로서 지면을 격자형태로 분할 한 후 각 격자 안의 지형을 거칠기로 분류하고 각 격자에서 주행가능 한 속도를 피치추론에 의해 결정하는 방법이다[3]. 이 방법은 격자 내의 노면의 기울기와 거칠기를 모두 고려할 수 있고 비교적 단순하게 속도를 결정할 수 있으며 저속으로 주행할 경우 거칠기에 따른 안정적인 주행 경로를 추출 할 수 있는 장점이 있으므로 경로계획단계에서 주로 사용된다[4]. 그러나 이 방법은 차량의 동적특성을 고려하지 못할 뿐만 아니라, 차량의 실제 주행제에 따르는 노면의 특성을 고려하기 어렵다. 그리고 경로점에 대한 속도의 프로파일은 비선형적인 속도 테이블형태로 출력하게 되므로 실제 주행을 위해서는 차량가감속 능력을 감안한 추가적 계산이 필요하다.

두 번째 방법은 차량의 주행 경로곡선과 지형에 의한 속도 결정방법이다[5]. 이 방법은 차량의 주행 경로에 대한 곡선을 미리 정의하고 이 곡선의 함수와 단순한 차량동역학 모델을 이용하여 선회 및 가감속 한계속도와 전복 한계 속도결정하고 이러한 여러 가지 한계속도로부터 최종 한계

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 12. 30., 수정: 2012. 1. 11., 채택확정: 2012. 1. 25.

주상현: 국방과학연구소 무인자율화 부(jooshee@gmail.com)

이지흥: 충남대학교 메카트로닉스 공학과(jihong@cnu.ac.kr)

(perception layer), 판단계층(cognition layer), 그리고 동작계층(action layer)로 구성되는데, 감지계층을 통해 입력된 센싱 데이터는 판단계층을 구성하는 다양한 지능 관련 컴포넌트에 의해 의사결정에 활용된다. 여러 의사결정 단계를 거쳐 무인차량의 동작명령이 결정되고 그 명령은 동작계층에 전달되어 최종적으로 플랫폼의 상태를 제어하여 자율주행하게 된다[8]. 본 논문에서 제안하는 RTT 모듈은 무인차량의 주행속도를 계획하는 기능을 하므로 판단계층에 속한다. 주행방향으로의 속도를 계획하기 위해서는 주행경로와 주행경로상의 노면데이터가 필요하며 이를 LPP (Local Path Panning) 모듈로부터 입력받는다. 입력된 경로와 경로상의 노면데이터를 기반으로 동역학 해석을 통하여 최종적으로 주행 시의 안정성이 보장되는 주행최대속도를 산출하여 Path Tracer 모듈에 전달한다.

그림 1은 야지에서 최대속도를 결정하는 RTT 모듈이 포함되어 설계된 자율 주행 아키텍처를 보여준다.

본 자율주행 아키텍처에서는 무인차량에 장착된 센서(LRF, Stereo Camera 등)의 데이터처리를 통한 개별센서의 월드모델을 생성한 후 융합 및 통합 월드모델을 구축하고 그 구축된 월드모델 정보를 DVGM (Directional Velocity Grid Map) 모듈로 전달된다. 전달된 월드모델 정보를 기반으로 방향별 속도격자지도를 생성한 후 사용한 월드모델과 생성한 격자지도를 LPP 모듈로 전달한다.

한편, 사용자는 RMS/ROS (Robot Management System/ Robot Operating System)를 통해서 로봇의 임무점 및 목표점을 입력하게 되며 그 입력된 점을 기반으로 MP (Mission Planning) 모듈에서는 임무를 세분화 한 후 각 로봇에 할당한다.

GPP (Global Path Planning)모듈에서는 할당된 임무 및 목표점 기반으로 광역격자지도를 사용하여 광역경로계획을 한다. 이때 광역격자지도는 기지의 지도데이터를 일정크기의 격자단위로 나눈 후 각 단위격자의 통과성 여부를 결정한 격자지도를 말하며 주로 비 실시간으로 생성하여 관리한다. GPP에서 산출된 격자점들은 광역격자지도 정보의 부정확성 및 실시간 월드모델로부터 새롭게 반영되는 장애물 정보 등을 고려하여 광역경로를 수정해야 할 필요가 생길 수 있으며 이를 위하여 GPR (Global Path Regenerator)모듈에서 실시간으로 광역격자점을 수정한다. 수정된 광역격자점들은 LPP 모듈에 전달되어 LPP 모듈의 지역경로 목표점으로 활용된다.

LPP 모듈에서는 DVGM모듈에서 전달받은 격자지도 기반위에 경로계획 알고리즘(A*, Modified A*, RANGE 등)을 수행하여 지역경로 목표점에 도달하기 위한 최적의 주행경로를 산출하며, 산출된 주행경로와 전달받은 월드모델(노면 데이터)을 RTT 모듈에 전달한다. 이와 동시에 LPP 모듈은 Path Tracer 모듈과 Waypoint Trace 모듈에 주행경로를 전달한다. 이상의 경로계획 모듈에서는 경로계획 매니저와 지역 경로 매니저를 두어 로봇이 상황별 혹은 시간별 변동사항을 실시간으로 반영하도록 한다.

RTT 모듈은 앞서 설명한 바와 같이 주행경로와 월드모델을 기반으로 동역학 해석 및 기 구축된 동역학 해석기반

의 데이터베이스를 이용하여 주행경로 상에서 안정성을 보장하면서 최대로 주행할 수 있는 속도를 산출하여 Path Tracer 모듈에 전달한다.

Path Tracer 모듈은 LPP 모듈로부터 주행경로와 RTT 모듈로부터 속도계획정보를 전달받아 항법정보로 부터의 현재의 위치를 기반으로 최적의 Way point를 선정하여 Waypoint Tracer에 전달한다.

Waypoint Tracer 모듈은 전달받은 주행경로와, 속도계획 및 선정된 Way point를 기반으로 하여 최적의 조향명령을 산출한다. Reflective Driver 모듈과 Primitive Driver 모듈에서는 산출된 조향명령과 속도계획정보를 무인차량의 구동부에 전달하도록 함으로서 무인차량은 주행경로와 계획된 속도에 맞추어 주행하게 된다

III. 동역학 기반 실시간 주행성 분석

야지에서의 속도결정은 안정적으로 주행할 수 있는 최대 주행가능 속도를 판단하는 것이 목표이다. 즉, 야지에서 주어진 경로를 빠른 속도로 주행하기 위해서는 차량의 주행 안정성에 영향을 미치는 인자인 경로의 곡률, 바퀴의 성능, 차량의 동특성 및 노면 거칠기를 고려하여 주행속도를 결정하여야 한다. 본 논문에서 제안하는 속도 결정방법은 주행경로와 주행노면의 특성에 따른 차량동역학 해석을 통하여 속도를 결정하는 방법이다. 속도결정프로그램의 각 단계별 수행순서와 내용을 표 1에 나타내었다.

무인 자율주행 차량은 Radar나 Laser scanner와 같은 각종 측정장비를 이용하여 주변 지형 및 장애물에 대한 정보를 추출한다. 그리고 이러한 정보는 지형에 대한 수학적 모델링을 수행한 후 다양한 정보처리모듈 및 판단모듈을 거치게 된다. 여러 가지 판단모듈 중 Path Planner는 주행해야 할 경로를 생성하는 것으로서 차량이 장애물을 회피하여 목적지로 갈 수 있는 최적의 경로를 생성한다. Path Planner

표 1. 실시간 주행성 분석 알고리즘 세부 수행단계.

Table 1. Specific step of real time traversability analysis.

수행 순서	알고리즘 세부 수행단계
1	초기속도 프로파일 산출 단계 - 입력: 지역경로점 - 지역경로점으로부터 B-spline 곡선 생성 - 주행경로에 따른 초기속도 프로파일 산출
2	실시간 동역학 해석 단계 - 입력: 초기속도 프로파일, 노면 프로파일 - 실시간 동역학 해석으로부터 임계 상태변수의 최대값 구하기
3	노면 분류단계 - 입력: 임계상태 변수의 최대값 - 노면분류 DB와 임계상태 변수의 최대값과 비교하여 노면분류하기
4	최대 안정속도 프로파일 산출 단계 - 입력: 노면분류값 - 속도결정DB와 노면분류값을 비교하여 최대안정속도 구하기 - 현재속도와 최대가감속 성능을 고려하여 최대안정속도 프로파일 생성

는 주행해야 할 경로점을 RTT (Real Time Traversability) 프로그램으로 전달하며 동시에 지형의 수학적 모델을 3차원 좌표데이터의 행태로 RTT에 전달 된다. 통합속도 결정알고리즘은 이 두 가지 정보를 바탕으로 진행한다.

속도 결정을 위해 가장 먼저 수행하는 것은 경로곡선을 이용한 선회속도를 결정하는 것이다. 차량은 주행 중 선회 성능의 한계를 가지므로 경로곡선에 따른 속도를 제한 할 필요가 있다. 입력된 경로는 2차원 B-spline 곡선의 함수로 표현하고 이 곡선의 함수로부터 경로에 따른 곡률을 구할 수 있으며 차량의 선회특성 시험으로부터 주행 가능한 최대 속도를 결정 할 수 있다. 그리고 차량의 가감속 한계속도와 함께 선회가능속도에 따른 경로점의 속도프로파일을 생성한다[5]. 생성한 속도 프로파일을 이용하여 실시간 동역학 시뮬레이션을 수행한다. 그리고 동역학 해석을 통한 결과는 미리 Simulation을 통해 생성한 차량 상태에 대한 ISO 노면 class의 DB를 이용하여 노면의 거칠기 정도를 분류한다. 그리고 계산된 노면의 거칠기 분류값을 이용하여 주행 가능최대속도 테이블을 이용하여 거칠기에 따른 주행 안정속도를 계산하게 된다[9]. 이미 계산된 선회가능속도와 주행한정속도를 경로점에 대해 중첩하여 나타낸 후 각 경로점에서 최대주행 가능속도를 결정할 수 있다. 그리고 최종적으로 차량의 가감속 한계에 따른 각 경로점의 속도 프로파일을 생성하면 최종적으로 주행가능속도가 만들어진다. 이 최종주행가능 속도는 무인주행차량의 임무 특성에 따라 최종 주행가능 속도보다 낮거나 같은 속도로 주행제어시스템에 입력되고 주행 제어시스템은 경로와 주행속도를 바탕으로 차량을 제어하게 된다.

1. 초기속도 선정

실시간 주행성 분석을 위한 초기속도로 본 절에서는 미끄럼 안정성을 만족하는 궤적주행 최대속도를 사용한다.

주행중인 차량은 지면과 마찰력에 의해 조향력을 발생시킨다. 이때 차량의 질량과 중력가속도에 비례하는 힘을 수직력으로 받게 되며 타이어와 지면의 마찰력(F_{μ})은 이 수직력과 마찰계수에 함수로 나타낼 수 있다. 따라서 타이어가 지면에 대해 낼 수 있는 힘의 크기는 차량의 질량(m)과 마찰계수(μ) 그리고 중력(g)에 비례하며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$F_{\mu} = \mu m g \quad (1)$$

그런데 이러한 마찰력은 차량의 조향을 발생시키는 힘으로 쓰이게 되므로 차량의 횡가속도와 질량과의 관계식으로 나타내면 차량이 만들어 낼 수 있는 최대횡가속도($a_{y\max}$)는 마찰계수와 중력의 함수가 되는 것을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} m a_{y\max} &= F_{\mu} \\ a_{y\max} &= \mu g \end{aligned} \quad (2)$$

만약 노면의 마찰계수를 알고 있다면 최대횡가속도는 결정되며 만약 궤적 주행하는 차량이 이러한 가속도를 받게 되면 궤적을 추종하지 못하고 미끄러지게 된다. 미끄럼 안정성을 만족하기 위한 속도는 이 최대횡가속도와 주행 궤적의 곡률로부터 계산할 수 있다. 우선 곡률 반경(R)과 횡

그림 2. 궤적주행시 곡률반경과 횡가속도.

Fig. 2. Path curvature and lateral acceleration in curved path driving.

가속도(a_y)와의 관계를 그림으로 나타내면 그림 2와 같다. 차량의 최대속도는 곡률의 함수가 되므로 주행궤적의 곡을 알 수 있으면 궤적상 한 지점에서 주행 가능한 최대 속도를 계산할 수 있다.

그러므로 횡방향으로 미끄러지지 않는 최대 직진속도는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} a_y &= v \dot{\phi} = \frac{1}{R} v^2 = k v^2 \left(R \dot{\phi} = v, k = \frac{1}{R} \right) \\ v_{\max} &= \sqrt{a_{y\max} / k} \end{aligned} \quad (4)$$

2. 동역학해석

본 연구에서 사용한 6x6 차량의 운동방정식은 차체좌표계(vehicle coordinate)를 기준으로 구성하였으며 각 압과 휠에 대해서는 상대좌표 운동방정식(relative coordinate equation of motion)을 구성하였다[9,13]. 상대좌표 운동방정식은 조인트의 자유도에 해당하는 상태변수만을 이용해 상미분방정식을 구성할 수 있으므로 운동방정식을 간소화 할 수 있다. 본 연구에서는 속도변환법(velocity transformation technique)을 사용하여 상대좌표 운동방정식을 구성하였다[10].

식 (5)는 속도변환법을 이용한 운동방정식의 구성을 나타내며 여기서 M 은 차체좌표계기준의 질량행렬이며 B 는 속도변환 행렬이고 q 는 상대좌표를 의미한다.

$$\begin{aligned} \overline{M} \ddot{q} &= \overline{F} \\ \overline{M} &= B^T M B, \overline{F} = B^T (F - M \dot{B} \dot{q} - h) \end{aligned} \quad (5)$$

차량모델은 그림 4와 같이 암(arm)타입의 서스펜션을 가진 6x6 차량으로서 차체의 6자유도와 각 암의 6자유도 휠의 6자유도를 포함하며 총 18자유도를 가진다[14]. 그리고 각 암에는 회전 스프링과 댐퍼가 장착되어 있으며 스프링

그림 3. 6×6 차량 동역학 모델 토폴로지.

Fig. 3. Topology of 6×6 vehicle dynamic model.

은 각도에 따라 강성이 증가하는 비선형특성을 가지며 뎀퍼는 각속도에 따른 선형감쇠와 마찰감쇠특성을 공히 가지고 있다. 스프링 특성은 3차 다항식(polynomial)을 이용하여 모델링 하였으며 뎀퍼의 마찰특성은 Arctangent 함수를 이용하여 모델링 하였다. 상대좌표운동방정식은 가장 최소의 연산을 수행하는 방법이지만 본 연구에서 구현하고자 하는 실시간성은 물리시간보다 단순히 빠르기만 해서는 안 된다. 다시 말해, 노면이 입력되는 순간 수십 ms내에 수행되어야 한다. 이러한 실시간성은 상대좌표 운동방정식만으로 부족하다. 다물체동역학 해석에서 많은 시간이 소요되는 부분은 선형대수 방정식을 계산하는 시간 보다 운동방정식 구성을 위해 수행하는 여러 가지 위치 및 속도벡터의 계산과 속도 변환 행렬을 구성하는 과정에서 발생하는 많은 행렬 연산이다. 이러한 많은 행렬연산으로 인한 해석속도의 효율성을 높이기 위해 기호연산식(symbolic equation)을 이용하여 상태변수만으로 구성된 완전한 운동방정식을 구성하였다. 기호연산은 여러 가지 벡터연산과 행렬 연산을 미리 수행하여 수식을 구성하기 때문에 행렬연산에 따른 반복문(for loop)이 없이 운동방정식을 구성할 수 있다[12]. 본 연구에서 구현한 동역학 해석은 이처럼 반복문 제거되고 0이 곱해지는 연산이 모두 사라지는 효과로 인해 매우빠른 해석을 수행할 수 있다[6,11].

3. 노면분류 및 최대 안정속도결정

UGV가 야지를 주행하기 위해서는 주행경로곡선에 따른 선회특성뿐만 아니라 야지의 노면에 대한 응답특성을 고려하여 주행속도를 결정하여야 한다. 노면의 분류는 수많은 종류의 노면형태에 대해 차량의 속도라는 일차원적인 상대적 값으로 나타내야 하는 어려운 문제이다. 본 연구에서는 노면을 분류하기 위해 ISO 노면 거칠기에 대한 연구를 바탕으로 진행하였다. ISO 노면 분류는 노면의 공간주파수에 따른 지면의 높이변화를 분류하는 방법으로서 차량주행 시 노면의 거친 정도를 판별하는 방법이다[15,16].

본 연구에서는 III 장 1절에서 설명한 경로주행가능 속도를 초기속도로하여 III 장 2절의 동역학 해석시뮬레이션을 수행하며 이 해석결과를 바탕으로 주행하게 될 노면의 거칠기에 대한 정보를 추출하게 된다. 그리고 추출한 노면 거칠기를 바탕으로 차량의 속도를 결정한다. 이때 노면의 분

류나 속도의 결정은 차량모델을 이용한 시뮬레이션을 통해 생성한 데이터베이스(DB)를 바탕으로 수행한다.

노면의 거칠기에 대한 차량상태의 DB를 생성하기 위해 그림 4(a)와 같은 과정을 수행한다. 이 과정은 ISO 노면거칠기로 생성된 등급별 노면 프로파일(ISO Road Profile)을 사용하여 여러 속도별(velocity division)로 주행시뮬레이션(dynamic simulation)을 수행하고, 시뮬레이션 결과로 최대 차량상태값(maximum vehicle states)을 DB로 저장한다. 여기서 최대 차량상태값은 차량 가속도, 압 각속도 등의 차량 안정성에 영향을 미치는 주요 파라미터의 최대값이다. 따라서, 실제 차량은 주행 중 획득되는 노면프로파일을 입력으로 동역학 시뮬레이션을 수행하고 시뮬레이션 결과로부터 획득된 최대차량상태값과 DB내의 최대 차량상태값과의 비교를 통해 노면을 분류하게 된다.

다음으로 분류된 노면을 이용하여 주행가능한 최대속도를 결정하기 위해서 속도결정을 위한 DB를 사용하였다. 이 DB는 그림 4(b)와 같은 방법으로 생성하며, 설계한계 또는 운용한계에 따르는 차량의 최대 허용상태(constrained maximum state)를 기준으로 하여 각 ISO 노면을 주행 했을 때 허용기준을 넘지 않는 최대 속도를 저장하여 구축되었다.

4. 가감속 성능에 따른 주행가능 속도 결정

III 장의 1절에서 설명한 횡방향에 대한 미끄럼 안정속도(초기속도)를 추종하기 위해서는 차량의 가감속 특성을 고려한 진행방향에 대한 속도 프로파일이 필요하다. 종방향 속도를 결정하는 가장 중요한 인자는 차량의 가감속 성능이다. 일반적으로 차량의 가속성능은 엔진의 성능에 의존적이며 감속성능은 타이어 마찰력에 비례하기 때문에 가감속력의 최대값은 일정한 상수 값을 가진다. 이러한 가감속 성능을 이용하여 등감속 후 등가속을 수행하는 차량의 속도 프로파일을 그리면 그림 5와 같다. 여기서 우리가 사용하게 될 속도 프로파일은 그래프 (b)로서 II 장 가절에서 정의한 횡방향 미끄럼에 대한 안정 최대속도(초기속도)에 겹쳐서 그리게 되면 궤적주행이 가능한 최대주행속도를 계산할 수 있다.

그림 5의 그래프를 수학적으로 정의하면 가속과 감속에 대한 함수를 추출할 수 있으며 등감속 곡선과 관계된 수식은 식 (6)와 같으며 식 (7)은 가속 곡선과 관계된 식이다. 여기서 a_b 와 a_t 는 최대 감속도와 가속도를 나타내는 상수이며 나머지 수학기호들은 그림 5를 참조하면 된다.

그림 4. 노면분류 및 속도결정 DB 구축을 통한 속도결정.

Fig. 4. Velocity decision through road classification and velocity decision DB.

그림 5. 등감속 후 등가속시의 속도프로파일.

Fig. 5. Velocity profile of deceleration and acceleration.

$$v_{brk}(s) = \sqrt{v_{\max}^2 - 2(s - s_0)a_b} \quad (s_0 \leq s < s_p) \quad (6)$$

$$v_{tra}(s) = \sqrt{v_p^2 - 2(s_p - s)a_b} \quad (s_p \leq s < s_p + s_t) \quad (7)$$

식 (6)와 (7)을 이용하면 기지의 궤적상의 위치 (s_p)와 속도 (v_p)를 기반으로 종 방향 안정성을 만족하는 속도 프로파일을 그릴 수 있다. 이 그래프를 앞절에서 구한 속도값에 적용하여 그렸을 때 그래프의 아래영역이 주행가능한 속도 영역이 되며, 이때 완성된 속도 프로파일이 주행가능한 안정 최대속도가 된다.

IV. 실험

본 연구의 신뢰성 및 실시간성을 확인하기 위해 제안된 통합 실시간 주행성 분석(RTT) 기반의 자율주행 알고리즘을 실험차량(XAV)에 탑재하여 시험을 진행하였다.

시험환경은 평지에서 요철(bump)을 모사할 수 있는 장애물을 차량의 전면부에 놓고 차량의 센서를 통하여 요철로서 인식이 가능하도록 하였다. 요철의 크기는 지면에서 약 30 cm 정도로 하였으며, 시험에서는 RTT 프로그램이 작동하는 상태에서 차량을 통과시켜 차량의 속도 결과를 관찰하였다. 이때 차량은 RTT 명령에 따라 속도를 변화시키며 주행하게 된다. 시험결과 RTT 알고리즘의 구동속도는 Intel Core2Quad 3.0 GHz CPU 환경에서 약 60 msec 정도의 처리속도를 보였으며 본 실험차량에서는 알고리즘 처리속도를 10 Hz로 셋팅하였다.

다음으로 요철통과 시험 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림은 요철통과 약 5 m 전에서 측정되어 동역학 시뮬레이션의 입력으로 사용된 노면의 프로파일(road height)과 제시된 알고리즘으로부터 계산된 속도 프로파일(velocity profile)을 나타낸다. 노면 프로파일은 경로계획으로부터 전달된 경로를 차량이 주행한다고 가정하였을 경우, 차량의 바퀴가 추종할 경로(left path, right path) 상의 노면높이를 나타내었다. 그림에서 station은 차량의 앞 바퀴 부터 계산된 주행경로상의 거리를 나타낸다. 그림에서 노면프로파일의 높이가 높은 부위가 요철이 있는 부분이다. 그림의 노면프로파일의 높이 값에는 오프셋 값이 포함되어 있으며, 그 오프셋 값은

그림 6. 실험차량의 자율주행 실험장면.

Fig. 6. Autonomous navigation experiment for 6×6 unmanned ground vehicle.

그림 7. 요철통과 시험 시의 노면 프로파일과 RTT 속도.

Fig. 7. Road profile and RTT velocity when the vehicle traverses over bump.

그림 8. 전체경로에서 RTT 속도 및 주행속도.

Fig. 8. RTT velocity and vehicle velocity in total driving path.

선형적으로 상승하고 있음을 알 수 있다. 오프셋 값은 지면을 평지라고 가정하면 0이다. 오프셋 값은 요철직전에서 약 7 cm이며 요철부의 오프셋 값은 약 8 cm 정도로 예측된다. 따라서 요철의 측정 값인 약 40 cm의 값에는 오프셋 값 이외에 약 2 cm 정도의 오차가 포함되었음을 알 수 있으며 이는 측정센서의 캘리브레이션 등의 오차로 판단된다.

그림 8에는 각 노면의 통과 중 계산되는 RTT 속도와 차량의 속도를 차량의 주행거리(travel distance)에 대해 그래프로 나타내었다.

이때 차량의 속도는 RTT 속도명령에 의해 요철의 발견시점(요철부에서 약 10 m 이전)부터 속도를 줄이기 시작하여 요철의 통과 시까지 감속하고 통과 후 다시 가속하는 과정을 확인 할 수 있다. 그 차량의 속도는 RTT 속도에 즉각적으로 반응하지 않고 약간의 delay를 발생시키는데 이는 모터 구동 제어시스템이 반응하는 과정에서 나타나는 것이다. RTT속도의 출력 형태를 보면 속도 프로파일에서 노이즈 같이 순간순간 증가했다 감소하는 값이 나타난다. 이는 두 가지 이유 때문에 발생한다. 첫 번째는 Path Planner에서 만들어내는 경로가 매 순간 변하면서 만들어지는 주행할 경로의 차이 때문에 발생하며, 두 번째는 센서를 통한 지형정보의 정확성 때문이다. 센서는 지형정보를 검사하여 노면 모델을 만드는데, 이 과정에서 비교적 큰 오차가 발생한다. 특히 거리가 멀어짐에 따라 오차는 기하급수적으로 증가하므로 먼 거리에 발생한 요철에 대해 과도하거나 과소한 높이를 만들어 낼 수 있다. 이러한 요인들은 앞으로 센서의 정확도가 증가함에 따라 자연스럽게 해결될 것으로 판단된다.

V. 결론

본 연구는 무인자율주행 차량이 야지를 주행하기 위해 필요한 최대 주행 속도를 결정하는 방법에 대한 통합적인 방법론을 제안하고 있다. 이 방법은 주행경로와 노면의 거칠기에 대한 종합적인 동역학적 분석을 통해 차량의 속도를 결정하기 때문에 기존의 속도결정 방법보다 높은 신뢰도의 안정적인 주행 속도를 결정할 수 있다. 따라서 무인자율주행 차량의 주행성을 대폭 향상시켜 고기동성의 자율주행이 가능할 것이라 기대한다.

참고문헌

- [1] C. M. Jeon et al., "Autonomous navigation of KUVE (KIST Unmanned Vehicle Electric)," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 7, pp. 617-624, Jul. 2010.
- [2] Y. S. Kang, C. W. Rho, and S. C. Kang, "Development of autonomous navigation robot in outdoor road environments," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 3, pp. 293-299, Mar. 2009.
- [3] H. Seraji, "Fuzzy traversability index: A new concept for terrain-based navigation," *Journal of Robotic System*, vol. 17, no. 2, pp. 75-91, 2000.
- [4] Y. I. Lee, H. J. Lee, and T. Y. Jee, "The generation of directional velocity grid map for traversability analysis of unmanned ground vehicle" *Journal of Korea Institute of Military Science and Technology (in Korean)*, vol. 12, no. 5, pp. 546-556, Oct. 2009.
- [5] Z. Shiller and Y.-R. Gwo, "Dynamic motion planning of autonomous vehicle," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 2, pp. 241-249, April 1991.
- [6] S.-L. Cho, K. Yi, J. Lee, and W.-S. Yoo, "Maneuvering speed of a 6x6 autonomous vehicle using a database obtained from multibody dynamic simulation," *IMechE*, vol. 223, no. 8, Part D: J. of Automobile Engineering, pp. 979-985, 2009.
- [7] Y. I. Lee, H. J. Lee, and Y. W. Park, "Local path planning manager for autonomous navigation of UGV," *Journal of Korea Institute of Military Science and Technology (in Korean)*, vol. 13, no. 6, pp. 990-997, Dec. 2010.
- [8] Y. I. Lee, H. J. Lee, and J. H. Ko, "A local path planning algorithm considering the mobility of UGV based on the binary map," *Journal of Korea Institute of Military Science and Technology (in Korean)*, vol. 13, no. 2, pp. 171-179, Apr. 2010.
- [9] P. E. Nikravesh, *Computer Aided Analysis of Mechanical Systems*, (Prentice-Hall International, Inc.), 1998.
- [10] B. H. Lee, W.-S. Yoo, and B. M. Kwak, "A systematic formulation for dynamics of flexible multi-body systems using velocity transformation technique," *I Mech E, Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 207, no. C4, pp. 231-238, 1993.
- [11] J. W. Lee, J. H. Sohn, K. S. Kim, and W. S. Yoo, "Construction of system jacobian in the equations of motion using velocity transformation technique," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 25, no. 12, pp. 1966-1973, 2001.
- [12] A. Son, *Derivation of 6x6 vehicle and efficient simulation*, Pusan National University Master Degree Thesis, 2008.
- [13] H. B. Pacejka and I. J. M. Besselink, "Magic formula tire model with transient properties," *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 1744-5159, vol 27, no. 1, Supplement 1, pp. 234-249, 1997.
- [14] D. H. Choi, K. S. Kim, and W. S. Yoo, "Efficiency of a symbolic code for the real time dynamic simulation," *In Proceedings of KSME Spring Annual Meeting A, Korea University of Technology and Education (in Korean)*, Chunan, Spring Proceeding A, pp. 104-107, 23-24 April 1999.
- [15] ISO, "Reporting vehicle road surface irregularities," Technical Report, ISO, ISO/TC108/SC2/WG4 N57, 1982.
- [16] K. S. Kim and W. S. Yoo, "Generation of road surface profiles with a power spectral density function," *Trans. of Korean Society of Automotive Engineers (in Korean)*, vol. 5, no. 1, pp. 136-145, 1997.

주 상 현

1991년 부산대 기계설계공학과 졸업.
1993년 KAIST 정밀공학과 석사. 2008
년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학
과 박사과정. 1993년~현재 국방과학연
구소 연구원. 관심분야는 자율주행, 지
능로봇, 경로계획 및 주행제어.

이 지 흥

1983년 서울대학교 전자공학과 졸업.
1985년 KAIST 전기전자공학과 석사.
1991년 KAIST 전기전자공학과 박사.
1994년~현재 충남대학교 메카트로닉스
공학과 정교수. 관심분야는 자율주행,
지능로봇, 경로계획 및 위치추정.