

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.3.251

## 험지에서의 가변 휠형 무인 자율차량의 자세 제어를 위한 가변 휠의 형상 계획

임경빈\* · 박석훈\* · 윤용산<sup>†</sup> · 이상훈\*\* · 강신천\*\*

(2008년 7월 11일 접수, 2009년 2월 10일 수정, 2009년 2월 12일 심사완료)

### Configuration Planning of an Actively Articulated Suspension to Vehicle Orientation Control on Unstructured Terrain

Kyeong Bin Lim, Sukhoon Park, Yong San Yoon,  
Sang Hoon Lee and Shincheon Kang

**Key Words:** UGV(무인자율차량), Actively Articulated Suspension(가변 휠 현가장치), Behavior Planning(행동 계획법), Vehicle Orientation Control(차량자세제어)

#### Abstract

Hybrid locomotive UGV with actively articulated legs along with wheeled ends has high traversability to travel over rough terrain. The behavior control method was usually adapted for the controlling of the suspension configuration which determines the traversability of the UGV. In this study, we are proposing a method of configuration planning of the legs without any detail geometric data about the terrain. The terrain was estimated by the traces of each wheel and the leg configurations for the desired posture of the vehicle were set up against the constraints of the terrain. Also, an optimal leg configuration was calculated based on the quasi-static stability and power consumption, and plans for the leg behavior were made. Validity of the proposed method was checked by simulations using some off-the-shelf programs, and showed that the orientation control without geometric features of terrains and simplification of the behavior planning for obstacle negotiation were possible..

———— 기호설명 ————

$P_V$  : 차량 무게중심의 위치 벡터  
 $P_W$  : 차량 각 바퀴의 위치 벡터  
 $L, l, 2B$  : 차량 다리 간 거리, 다리 길이, 차량폭  
 $O_V = [\alpha \ \beta \ \gamma]$  : 차량의 자세 벡터 [요, 피치, 롤]  
 $\varphi$  : 바퀴의 지면 접촉각  
 $\theta$  : 각 다리 각도

$\Phi$  : 최적화 성능 계수  
 $K$  : 최적화 가중치  
 $\eta$  : 정적 안정성 각도  
 $V, E, C$  : 충돌맵 각 블록의 꼭지점, 모서리, 중심점  
 ${}^G X, {}^V X$  : 전체좌표계 및 차량좌표계에서 정의한 벡터  $X$   
 $X_0, X_d$  :  $X$ 의 초기값 및 목표값

#### 1. 서 론

무인자율차량(UGV)은 인간의 접근이 제한된 장소에서 주어진 임무를 수행하는 차량이다. 무인자율차량의 주요 임무로는 USAR(Urban Search

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과  
 E-mail : ysyoon@kaist.ac.kr  
 TEL : (042)350-3022 FAX : (042)350-3210  
 \* 한국과학기술원 기계공학과  
 \*\* 국방과학연구소 5-2체계

And Rescue)과 같은 재난구조, RSTA (Reconnaissance, Surveillance and Target Acquisition)와 같은 군사적 작전 수행, 그리고 행성탐사와 같은 과학적 임무가 있다. 이와 같은 임무는 주로 험지에서 이루어지기 때문에 험지 내 주행성능은 무인자율차량이 갖추어야 할 주요 기능 중 하나로 여겨지고 있다.

차량의 구조 설계를 통한 주행성능의 개선은 차량의 주행성능을 향상시키고자 하는 노력 중 하나이다. 다리의 적응능력과 바퀴의 효율성이 결합된 혼합형 주행은 자체와 바퀴 사이의 현가 장치에 추가적인 자유도를 부가해 차량의 무게중심을 이동시키며 바퀴로 주행하는 방식이다. 이는 다리를 피동적으로 구동하는 방법<sup>(1)</sup>과 능동적으로 구동하는 방법<sup>(2-6)</sup>으로 나뉠 수 있는데 일반적으로 능동형 혼합주행 방식이 험지에서의 우수한 주행 능력을 가진다.<sup>(2,5,6)</sup>

능동형 혼합주행 방식의 무인자율차량은 다리의 형상 제어를 통해 다양한 험지에 대해 주행능력을 갖출 수 있다. 험지 주행을 위한 다리 형상 제어 방법으로 K. Iagnemma 등<sup>(4)</sup>은 차량의 전복 안정성과 지면 접촉을 보장하는 방법으로 다리 형상을 제어하였고 Grand 등<sup>(3)</sup>은 전복 안정성과 추진력을 최적화하는 방법으로 다리의 형상을 제안한 바 있다. 그러나 이와 같은 방법은 다리의 보행 기능을 충분히 활용하지 못하고 불연속적이거나 급격한 경사면을 가진 지형에 대해서 적용하는 것이 불가하다.

그러므로 급격한 경사 혹은 불연속 지형에 다리의 보행 주행 기능과 같은 무인자율차량의 자유도 구동능력을 활용하기 위한 최근의 연구들은 행동 제어 규칙(behavior control rule) 등과 같이 일련의 행동 규칙을 개발하고 이를 차량에 적용하려는 시도를 보여주고 있다.<sup>(2,6-10)</sup> Lauria 등<sup>(2)</sup>은 “행동”을 구성하는 네 가지 요소를 정의하고 그에 따라 언덕 등반(step climbing)을 위한 일련의 행동 양식을 구성하였으나 제어 규칙을 적용하지 않아 다양한 장애물에 적용할 수 없으며 E. Tunstel<sup>(6)</sup>와 Farritor<sup>(7,8)</sup>는 각각 전복 시 자기교정 행동(self-righting behavior), 일반 작업 시 행동에 대해 유전자 프로그래밍(Genetic Programming)을 사용한 행동 제어 규칙을 제안하였다. 특히 Farritor는 차량이 할 수 있는 행동을 “행동 모듈(action module)”로 정의하고 획득한 지형모델에 대해서

목표지점까지 주어진 작업을 진행하며 전진할 수 있는 일련의 모듈 집합인 “행동모듈계획(Action module planning)”을 유전자 프로그래밍을 통해 구성하는 방법으로 매우 험한 장애물에서도 다리의 보행 기능을 활용하여 만족스러운 성능을 보여주었다. 그러나 위의 유전자 프로그래밍은 적합도(fitness level)를 계산하기 위해서는 정확한 차량 모델과 지형모델이 필요하며 차량 자체의 자유도가 증가할수록 행동모듈의 개수가 늘어남에 따라 계산량이 급격히 늘어나는 문제점이 있다. 또한 실제 얻을 수 있는 지형 정보는 불확실성을 내포하고 있으며 특히 차량이 현재 지면과 접해있는 부분은 비전정보를 얻을 수 없는 사각지대임을 고려한다면 위의 방식은 현장에서 취약하다.

C. Dornhege 등<sup>(10)</sup>은 지형정보와 기술묘사(skill description)로 구성된 행동지도(behavior map)를 구성하였는데 여기서 기술묘사는 각 장애물 형태에 관한 정보와 그에 따른 행동 정보를 포함하도록 하였다. 그러나 여기서 개발된 행동 정보는 장애물 구간의 시작 위치에서의 차량 자세만을 포함하므로 행동의 연속적 정의가 없고 퍼지 규칙을 사용한 대략적 지형 분류에 따른 고정적 행동규칙이므로 적응성이 낮다는 단점이 있다.

이와 같이 무인자율차량의 여유자유도를 이용한 장애물 극복 시 일련의 행동 계획에 대한 필요성에 많은 연구들이 동의하고 있으나 그에 대한 효율적인 방법은 추가적인 연구가 필요하다. 그러므로 본 논문에서는 자세한 지형모델이 필요 없이 차량의 자세 및 위치에 대한 상위 수준의 행동을 정의하였을 때, 하위 수준의 행동인 다리 형상에 대한 행동 계획을 생성하는 방법을 기술하고자 한다. 본 방법은 자세한 지형모델을 사용하지 않고 차량의 각 바퀴의 이동 궤적을 통해 얻은 지면 위치 및 기울기만을 사용하여 원하는 차량의 3차원 자세를 구현할 수 있으며 직접적인 수학 연산만을 사용하므로 연산속도가 빠르다.

## 2. Solutions of Vehicle Configuration

본 장에서는 지면 경사각에 대한 차량 자세와 다리 형상 간의 기구학적 해석 및 차량 자세를 위한 다리 형상의 “올바른” 해 및 “최적” 해에 대해 기술하고자 한다

2.1 Vehicle Configuration Kinematics

본 연구에서 사용한 좌표계 및 좌표는 Fig. 1과 같다. 현 차량의 위치 및 자세 등을 정의한 전체 좌표계(global coordinate)는 x방향이 현 차량의 진행 방향과 동일하도록 설정하였다. 차량 좌표계(vehicle coordinate)는 차량 진행방향을 x축, 수평 왼쪽 방향을 y축으로 정의하였다. 차량의 현 위치와 목표 위치는 각각  ${}^G P_{V_0}$ ,  ${}^G P_{V_d}$ , 차량의 현 자세 및 목표 자세는  ${}^G O_{V_0} = [0, \beta_0, \gamma_0]$ ,  ${}^G O_{V_d} = [0, \beta_d, \gamma_d]$ , 각 바퀴 접촉점에서 예측한 지면 경사  $V\varphi_i$ , 그리고 각 다리의 현재 형상 및 명령 형상은 각각  $V\theta_{0,i}$ ,  $V\theta_{d,i}$ 로 정의하였다. 각 좌표의 왼쪽 윗 첨자는 좌표 값을 정의한 기준 좌표계로 G는 전체 좌표계, V는 차량 좌표계를 의미하며 i는 각 바퀴 및 다리를 의미한다. 여기서 지면의 기울기는 차량 좌표계를 기준으로 정의하였는데 이는 다리의 형상 계획은 차량 진행 방향에 대한 지면의 기울기만이 관계가 있기 때문이다. 지면의 기울기는 차량 좌표계에서의 각 바퀴 위치 변화를 통해서 예측이 가능하며 또한 각 바퀴의 속도 및 기구학적 계산을 통한 예측도 가능하다.<sup>(4)</sup>

전체 좌표계에서 현 차량 좌표계로의 변환행렬은 수식 (1)과 같다.

$${}^G T_{V_0} = \begin{bmatrix} R_y(\beta_0)R_x(\gamma_0) & {}^G P_{V_0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

또한 차량의 목표위치 및 자세에 대한 변환행렬은 수식 (2)와 같다.

$${}^G T_{V_d} = \begin{bmatrix} R_y(\beta_d)R_x(\gamma_d) & {}^G P_{V_d} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

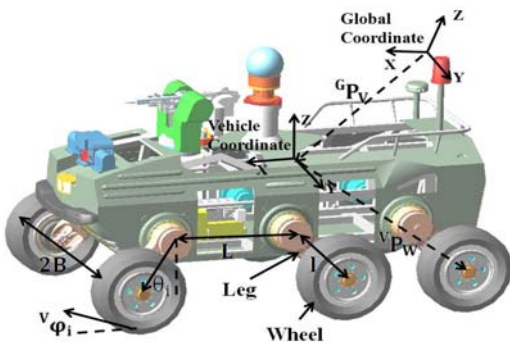


Fig. 1 Coordinates and parameters

이를 통해 차량의 현 위치에 대한 목표위치의 변환 행렬은 수식 (3)으로 표현이 가능하다.

$${}^{V_d} T_{V_0} = {}^G T_{V_0}^{-1} {}^G T_{V_d} \quad (3)$$

차량 좌표계에서 각 바퀴의 위치는  $\theta$ 에 관한 함수로 다리간 거리를 L, 다리의 길이를 l, 차폭을 2B라고 하였을 때, 현 다리 형상에서의 바퀴의 위치와 명령 다리 형상에서의 바퀴 위치는 왼쪽 전방 바퀴의 경우 수식 (4), (5)로 표현이 가능하다

$${}^{V_0} P_{W_0} = [L + l \sin \theta_{0,LF} \quad B \quad -l \cos \theta_{0,LF} \quad 1]^T \quad (4-1)$$

$$= [{}^{V_0} P_{W_{0,x}} \quad {}^{V_0} P_{W_{0,y}} \quad {}^{V_0} P_{W_{0,z}} \quad 1]^T \quad (4-2)$$

$${}^{V_0} P_{W_d} = {}^{V_0} T_{V_d} {}^{V_d} P_{W_d} \quad (5-1)$$

$$= {}^{V_0} T_{V_d} \cdot [L + l \sin \theta_{d,LF} \quad B \quad -l \cos \theta_{d,LF} \quad 1]^T \quad (5-2)$$

$$= [{}^{V_0} P_{W_{d,x}} \quad {}^{V_0} P_{W_{d,y}} \quad {}^{V_0} P_{W_{d,z}} \quad 1]^T \quad (5-3)$$

위의 수식에 지면 제한조건을 적용하기 위하여 각 바퀴 주변의 지형을 기울기  $V\varphi_i$ 인 평면으로 가정하였다. 즉, 차량이 현재 진행방향으로 계속 진행하면 바퀴의 현재 위치와 명령 위치 간의 관계는 수식 (6)과 같이 표현이 가능하며 이는 수식 (3)과 (5)를 이용하여 수식 (7)과 같은  $\theta_{d,LF}$ 의 방정식으로 정리가 가능하다.

$$\tan \varphi_i = \frac{{}^{V_0} P_{W_{d,z}} - {}^{V_0} P_{W_{0,z}}}{{}^{V_0} P_{W_{d,x}} - {}^{V_0} P_{W_{0,x}}} \quad (6)$$

$$A \sin \theta_{d,LF} + B \cos \theta_{d,LF} + C = 0 \quad (7)$$

같은 방법으로 각 바퀴에서 수식 (7)과 같은  $\theta_{d,i}$ 의 방정식을 계산하면 각 바퀴에 대해 두 개의  $\theta_{d,i}$ 를 얻을 수 있고 각 바퀴에 대한  $\theta_{d,i}$ 의 조합은 총  $2^N$  ( $N =$  차량의 자세 제어에 사용되는 바퀴 개수)개의 해  $\theta = \{\theta_{d,1}, \theta_{d,2}, \dots, \theta_{d,N}\}$ 를 얻을 수 있다. 이는 현재 지형과 그 주변에서 차량이 원하는 자세를 취할 수 있는 다리의 형상은 총  $2^N$ 개가 있음을 의미한다. 그러나 각 바퀴에서 구해지는 2개의 해는 다리의 차량 측 피봇과 지면 간 거리에 따라 실제 해가 될 수도 있고 가상해(spurious solution)일 수도 있으므로 이를 해결책에서 제거해야 한다.

2.2 "Correct" Leg Configuration

해 집합에서부터 “올바른” 해를 찾기 위해서는 다음과 같은 두 가지 해들을 제거해야 한다.

1. **Complex Solution:** 복소수 해는 지면과 차체 간 거리가 다리의 길이보다 큰 경우 나타난다. 차체의 자세는 공간 상에서 3 자유도를 가지므로 해의 원소  $N$ 개 중 실수 원소의 개수가 3 미만인 경우 차량은 지면에 대해 고정되지 못해 원하는 자세를 유지할 수 없다. 그러므로 이와 같은 해는 해집합에서 제거하여야 한다. 만약 실수 원소의 개수가 3 이상인 경우에는 해당 다리를 사용하여 차량이 원하는 자세를 유지할 수 있으므로 허수 원소를 보정하는 방식으로 해를 수정하였다.

수식 (7)에서  $\theta_{d,LF}$ 가 허수가 나올 조건은  $abs(C/\sqrt{A^2+B^2}) > 1$ 인 조건이므로 이와 같은 경우 수식 (8)과 같은 방법으로 허수가 나오는 조건을 피해주었다. 이 때, 사용한  $\epsilon$ 은 다리의 특이점 (singular point)을 피하기 위한 값으로 다리가 특이점에 위치할 경우 다리의 차체 측 피봇에 많은 힘이 가해지며 다리 구동에 무리가 올 수 있다.

$$C/\sqrt{A^2+B^2} \approx sgn(C/\sqrt{A^2+B^2})(1-\epsilon) \quad (8)$$

*where  $\epsilon > 0$*

수식 (8)의 물리적 의미는 차량의 다리를 지면과 가장 가까운 곳에 위치하도록 하는 것이다. 차량의 험지를 주행 시에는, 각 바퀴가 지면과 접촉을 유지하는 것이 차량의 전복 안정성 및 주행 성능에 도움이 되므로 지면과의 접지를 잃었을 경우에는 이와 같이 지면과 가장 가까운 곳에 바퀴를 위치시켜 빠르게 지면과의 접지를 회복할 수 있도록 하는 것이 필요하다.

2. **Infeasible Solution:** 얻어진 해 중에는 물리적으로 구현이 불가능한 형상이 존재하므로 이와 같은 실행 불가능한 해는 해 집합에서 제외해야 한다. 대표적인 실행 불가능 해는 수식 (9-1,2)와 같이 다리의 구동범위를 넘어서는 경우와 다리가  $\theta_{d,i}$ 로 변형하였을 때, 바퀴가 다른 다리의 바퀴와 겹치는 위치에 있는 경우가 있다. 이와 같은 해는 해집합에서 제외하도록 하였다.

$$\theta_{d,i} > \theta_{ref}^+ \text{ or } \theta_{d,i} < \theta_{ref}^- \quad (9-1)$$

*where  $\theta_{ref}^+, \theta_{ref}^- = \text{upper and lower limit}$*

$$\| {}^V_d P_{W_{\phi i+1}} - {}^V_d P_{W_{\phi i}} \| \leq 2R \quad (9-2)$$

*where  $R = \text{radius of wheel}$*

이와 같이 “Correct” 해를 위한 일차적 제거를 통해 남은 해가 존재하지 않는 경우에는 현 지형에서 차량을 원하는 자세로 제거 불가능함을 의미하며 다수의 해가 존재할 경우에는 최적의 해를 찾을 필요가 있다.

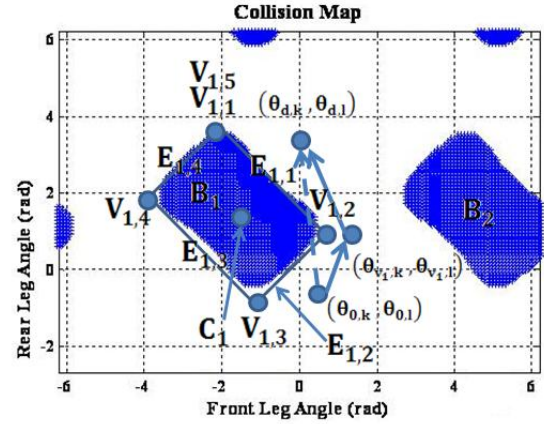


Fig. 3 Collision map

### 2.3 Optimal Leg Configuration

다수의 해에 대해서 다리 형상을 결정하기 위해서는 각 해에 대한 평가를 통해 가장 적절한 해를 결정하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 차량의 전복 안정성과 전력 소모량을 고려한 성능지수(performance index)  $\Phi$ 를 수식 (10)가 같이 정의하였고 이를 최소화 하는 해를 최적의 다리 형상으로 결정하였다.

$$\Phi(\theta_a, \theta_0) = \frac{K_1}{\eta_1} + K_2 \left( \sum_{i=1}^N (\theta_{d,i} - \theta_{0,i})^2 \right) \quad (10)$$

*where,  $\eta_1 < \eta_2 < \dots < \eta_N$*   
 *$\eta_i = \text{stability angle}$*   
 *$K = \text{weighting factor}$*

성능지수  $\Phi$ 의 첫 번째 항은 차량의 전복 안정성으로 K. Iagnemma<sup>(4)</sup>가 제안한 안정성 각 (stability angle)  $\eta_i$ 을 사용하여 계산하였다. 이는 차량의 준정적 상태에서의 전복 안정성을 평가한 방법으로 험지 구간에서 저속으로 주행하는 차량의 경우에 적합하다. 안정성 각은 지면과의 접촉점을 기준으로 구성된 다각형의 각 변을 전복 축 (tipover axis)으로 하여 그 축에 대해 차량이 전복하는데 필요한 차량 중심의 이동각도를 나타낸다. 위의 식은 가장 전복이 일어나기 쉬운 축에 대한 안정성 각도를 나타내고 있다. 두 번째 항은 차량의 다리가 현재 형상에서부터 이동해야 할 각도의 합을 나타내며 이는 또한 지면과의 접촉 유지 정도를 의미하기도 한다.

많은 경우 해들의 최소 안정성 각이 비슷하게 나타나 미세한 중심 이동에 따라  $\min\{\eta_i\}$ 이 바뀔 수 있다. “올바른” 해집합에 속한 해들의 값은 불연속적이기 때문에 이 경우 전력소모량에 대한

가중치가 지나치게 작거나 고려되지 않으면 최적의 다리 형상이 불연속적으로 나타나며 채터링(chattering)이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 전력소모량의 가중치를 크게 하는 방법과  $\Phi = K_1/\eta_1 + K_2/\eta_2 + K_3(\sum_{i=1}^N(\theta_{d,i} - \theta_{0,i})^2)$ 와 같이 2순위의 전복 축에 대한 전복 안정성을 추가로 고려하는 방법이 있다. 본 연구에서는 추가적인 안정성을 확보할 수 있는 후자의 방안을 택하였다.

### 3. Lower Level Behavior Planning

차량 자세 제어를 위한 다리의 목표 형상은 하위 수준에서의 연속 행동을 통해 구현될 수 있다. 본 장에서는 각 바퀴가 목표 형상에 안전하게 도달하기 위한 행동 계획에 대해 설명하고자 한다.

#### 3.1 Via Leg Configuration

행동 계획은 다리의 변형 중 발생할 수 있는 바퀴 간 충돌을 회피하기 위한 다리의 경유 형상(via leg configuration)을 생성하는 것을 목적으로 하였다. 다리의 최종 위치가 충돌 위치로 정의되는 경우와는 다르게 변형 중 발생하는 충돌은 다리의 경유 형상 추가를 통한 경로계획을 통해 피할 수 있다.

바퀴 간 충돌은 앞 장에서 이미 다룬 바와 같이 수식 (9-2)로 정의할 수 있다. 충돌 상황은 인접한 두 바퀴 간에서 발생하는 것이므로 인접한 두 다리  $k, l$ 을 “충돌집합 ( $CS = \{Leg_k, Leg_l\}$ )”으로 정의하였다. 각 충돌집합에 대해 다리의 각도  $\theta_k$ 과  $\theta_l$ 의 허용 각도 내에서 충돌 발생 지역을 관절 공간(joint space)에서 도식화하고 이를 직사각형으로 간단화한 “충돌지도(Collision Map)”를 구성하였다(Fig. 2). 충돌지도는 바퀴 간 충돌을 의미하는 4개의 직사각형 블록  $B_i (i=1, 2, 3, 4)$ 을 포함하며 블록  $B_i$ 는  $V_{i,j} (j=1, \dots, 5, V_{i,1} = V_{i,5})$ 의 5개 꼭지점과  $E_{i,j} (j=1, \dots, 4, E_{i,j} = \overline{V_{i,j}V_{i,j+1}})$ 의 4개 모서리를 가지고 있다.

각 다리가 현 위치에서 최종 위치로 변형하는 과정에서 바퀴 간 충돌이 발생하는지 알아보기 위하여 앞에서 구성한 관절공간에 다리의 경로를 도식화하였다. 경로는 linear joint interpolation<sup>(11)</sup>의 방법으로 구성하여 현재 다리의 위치  $\theta_{0,kl} = \{\theta_{0,k}, \theta_{0,l}\}$ 와 다리의

목표 위치  $\theta_{d,kl} = \{\theta_{d,k}, \theta_{d,l}\}$ 를 선분  $S$ 로 연결하였다. 선분  $S$ 와 블록  $B_i$ 의 중심점  $C_i$  간의 거리가 블록의 대각선 길이보다 작은 경우 블록  $B_i$ 에 속한 모서리  $E_{i,j} (j=1, \dots, 4)$ 에 대해 순차적으로 교점을 계산하여 모서리 내에 교점이 존재하는 모서리를 찾았다. 선분  $S$ 가 블록을 지나는 경우 선분  $S$ 와의 교점을 갖는 모서리는 2개 ( $V_{i,m}, V_{i,n}, n > m$ )가 나타난다. 두 개의 모서리가 인접한 경우 ( $n = m + 1$  or  $(m, n) = (1, 4)$ )에는 공통점  $V_{i,n}$ 를 기준으로 수식 (11)을 통하여 충돌지역을 의미하는 블록  $B_i$ 를 피하는 경유점(via point)  $\theta_{V_1,kl} = (\theta_{V_1,k}, \theta_{V_1,l})$ 를 생성하였다.

$$\overline{\theta_{V_1,C_1}} = (1 + \epsilon)\overline{E_{1,n}C_1}, \text{ where } \epsilon > 0 \quad (11)$$

두 개의 모서리가 인접하지 않는 경우 ( $(m, n) = (1, 3)$  or  $(2, 4)$ )에는 경유 방향에 따라  $V_{i,m}$ 과  $V_{i,n+1}$  혹은  $V_{i,n}$ 과  $V_{i,m+1}$ 을 기준으로 수식 (11)과 같은 방법으로 두 개의 경유점  $\theta_{V_1,kl}$ 과  $\theta_{V_2,kl}$ 를 설정하였다. 이 때, 경유 방향은 수식 (10)을 사용하여 수식 (12)와 같은 새로운 성능인자를 기준으로 결정하였다.

$$\Phi(\theta_d, \theta_V, \theta_0) = \sum_{i=0}^P \Phi(\theta_{V_{i+1}}, \theta_{V_i}) \quad (12)$$

where  $\theta_{V_0} = \theta_0, \theta_{V_{P+1}} = \theta_d$

#### 3.2 Generation of Lower Level Behavior

Linear joint interpolation 형태의 경로를 따라 다리  $i$ 와  $j$ 를 현 위치에서 경유위치(Via Leg Configuration)를 거쳐 최종 목표 위치로 이동하기 위해서는 각 다리의 목표 속도를 결정하여야 한다. 일반적으로 하나의 다리는 두 개 이상의 충돌 집합에 포함될 수 있으며 각 충돌집합에서 경유점이 부여될 수 있다. 이와 같은 경우 다리의 경로 설정은  $\theta_i$ 과  $\theta_j$ 로 이루어진 2D의 관절공간에서 다룰 수 없고 3D 혹은 초월공간(hyperspace)의 관절공간이 필요하다. 그러나 본 연구에서는 각 다리의 움직임이 2개 이상의 Collision Set에서 충돌을 유발하는 큰 변형을 고려하지 않아 경로계획을 2D의 관절공간으로 제한하였다.

다리  $i, j$ 를 포함하는 CS가 관절공간 상에서  $P$ 개의 경유점을 포함하였다면 이를 지나는  $P+1$ 개의 선분은  $P+1$ 개의 경로계획을 구성하여  $P+1$ 개의 하위 수준의 행동을 생성한다. 각 하위 수준의 행동은 다리  $i$ 와 다리  $j$ 에 대한 명령각도  $\phi_i$ ,



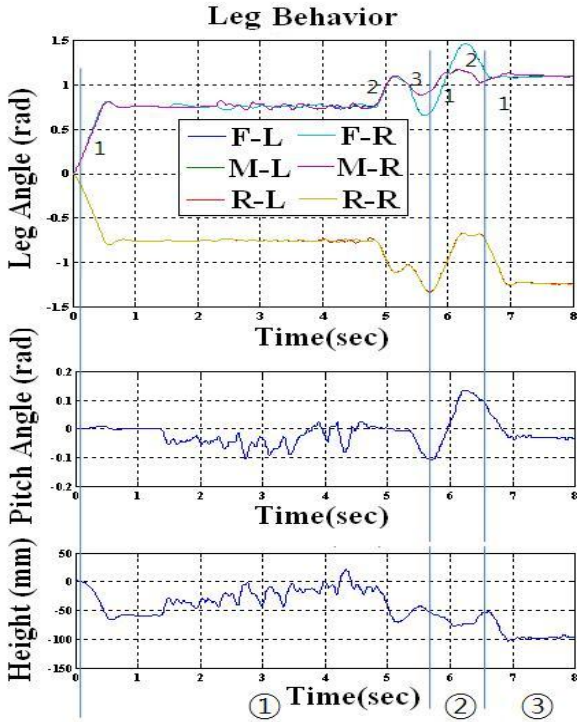


Fig. 4 Orientation control results

$\phi_j$ 와 명령 속도  $\omega_i, \omega_j$ 로 정의된다. 다리  $i$ 의  $k$ 번째 하위 수준 행동에 속하는 명령 각도  $\phi_{k,i}$  및 Linear joint interpolation 방법을 사용하였을 때, 다리  $i$ 의  $k$ 번째 하위 수준 행동에 속하는 명령속도  $\omega_{k,i}$ 는 수식 (13)과 같다.

$$\phi_{k,i} = \theta_{V_{k,i}} \tag{13-1}$$

$$\omega_{k,i} = \frac{\theta_{V_{k,i}} - \theta_{V_{k-1,i}}}{T} \tag{13-2}$$

where  $T = \max_{i=1, \dots, N} \left( \frac{\theta_{V_{k,i}} - \theta_{V_{k-1,i}}}{\omega_{\max}} \right)$   
 $\omega_{\max} = \text{maximum joint velocity}$

다리  $j$ 에 대해서도 같은 과정을 통해 명령 각도 및 명령 속도를 포함하는 하위 수준의 행동을 정의할 수 있다. 또한 이와 같은 방법으로 모든 충돌집합에서 명령 각도 및 명령 속도를 정의하면 각 다리는  $P$ 개의 경유점이 있을 때,  $P+1$ 개의 하위 수준의 행동을 생성할 수 있다. 이 때, 하나의 다리는 두 개 이상의 충돌집합에 포함될 수 있으므로 어느 충돌집합을 기준으로 다리의 경로계획을 세우는지 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 다리의 경유 형상이 추가된 충돌집합에 대해 이에 포함된 다리의 경로계획을 수식 (13)을 통해 수립하고 이를 기준으로 나머지 다리의 경로계획을 세우도록 했다.

Table 1 Sequence of vehicle orientation command

sequence	platform pitch	platform height
1	-0.1 rad	55mm downward
2	0.1 rad	-55mm downward
3	0 rad	-85mm downward

### 4. Simulation and Results

#### 4.1 Simulation

제안한 방법의 효용성을 검증하고자 본 연구에서는 상용 동역학 해석 프로그램인 ADAMS를 사용하여 능동형 혼합주행 방식의 차량과 지형을 모델링하였다. 차량은 국방과학연구소에서 현재 개발 중인 견마로봇의 실차량 설계와 동일한 크기와 동특성을 갖도록 (주)티유알에서 제작하였으며 구조는 총 6개의 구동 가능한 다리와 각 다리에 연결된 구동 가능한 바퀴를 가지고 차량의 무게 중심은 차량 플랫폼의 중앙에 위치하도록 구성되어 있다(Fig. 1). 지형은 다양한 크기의 장애물 형태를 포함하는 지형모델을 구성하였으며 시물레이션 목적에 따라 지형모델을 동역학 모델에 추가하였다. 차량의 제어는 상용 프로그램인 MATLAB/Simulink를 사용하여 구성하였다. ADAMS에서 구성한 동역학 모델과 본 연구에서 제안한 행동 계획을 각각 블록으로 구성하였다. 또한 구성된 행동을 수행하는 행동 관리 알고리즘(Behavior Management Algorithm)을 추가로 구성하였다.

#### 4.2 Results

본 연구에서는 지형의 구체적인 형상에 대한 정보를 제공받지 않는 상태에서 차량의 자세를 제어하는 다리의 행동 계획을 목적으로 하고 있다. 제안한 방법의 유효성을 검증하기 위하여 울퉁불퉁한 지형에서 Table 1에서 정의한 연속적인 세 가지 자세를 유지하는 시물레이션 하였다. 다리의 행동 계획은 제안한 방법으로 구성하였고 행동 관리 알고리즘에서 자세와 관련한 오차를 파악하고 현 자세 명령에 대해 다리 행동 계획을 추가할지 결정하였다. 차량의 자세는 차량의 다리 형상과 관련이 있는 차량의 피치 및 롤 각도

**Table 2** Behavior planning for overcoming step-up obstacle

step	Behavior
1	start
2	lift up front wheel
3	put down front wheel
4	lift up middle wheel
5	put down middle wheel
6	lift up rear wheel
7	put down rear wheel
8	finish

와 차량의 높이로 정의하였고 차량 자세의 각 명령값들은 1° 혹은 10mm 이내의 오차로 제어되었을 때 다음 자세를 취하도록 하였다.

Fig. 3의 첫 번째 그래프는 각 다리의 각도를 나타내며 두 번째와 세 번째 그래프는 각각 차량의 피치와 높이를 나타내고 있다. 각 다리의 속도가 바뀌는 것은 각 다리에 다리 행동 명령이 내려졌음을 의미한다. 시뮬레이션 결과 첫 번째 자세를 취하기 위해서 0s~5.7s에 걸쳐서 세 번의 다리 행동 계획이 생성되었음을 확인할 수 있었다. 두 번째 자세는 5.7s~6.5s에서 시도되고 있으며 두 번의 다리 행동 계획이 요구되었다. 세 번째 자세의 경우 하나의 다리 행동 계획을 사용해 원하는 자세로 변경할 수 있었다. 각 자세에 따라 요구되는 다리 행동의 개수는 지면의 기울기 변화 및 차량의 진행과 관계가 있다. 본 연구에서 사용한 방법에서는 차량 바퀴의 궤적을 통해 지면의 기울기를 추정하였고 지면은 작은 구간 내에서 일정한 기울기를 가지고 있다고 가정하였다. 차량의 자세 제어를 위해 이동한 각 바퀴의 x방향 이동거리가 작을 경우 구간 내에서 지면 기울기 변화가 적기 때문에 위의 가정이 성립하여 다리 행동에 따른 차량 자세는 다리 행동이 추가됨에 따라 원하는 값으로 수렴한다. 차량의 피치각과 높이에서 발생하는 각각 1°, 10mm 수준의 오차는 차량의 타이어에서 발생하는 변형 및 지형 인식에서 일반적으로 발생하는 오차수준을 고려하여 선정하였다.

본 행동 계획방식을 사용하였을 때, 차량이 장애물을 극복하는데 필요한 행동양식이 간략해질 수 있음을 확인하기 위하여 자세 제어의 행동양

**Table 3** Behavior planning for overcoming step up-down obstacle

step	Description
1	start
2	lift up front wheel
3	put down front wheel
4	lift up middle wheel
5	put down middle wheel
6	lift up rear wheel
7	put down rear wheel & finish

식을 직관적으로 구성하여 보았다. 수직상승 장애물(step up)에 대해서는 장애물을 극복하기 위한 총 8개의 행동을 Table 2와 같이 구성하였고 수직하강 장애물(step down)에 대해서는 총 7개의 행동을 Table 3과 같이 구성하였다. 자세 제어의 행동 양식에서는 차량의 피치 및 롤과 높이에 대한 자세 명령과 추가로 특정 다리를 매니플레이터(manipulator)로 사용하였을 때 구동 높이 혹은 구동 각도가 포함되었다. 이 때, 차량의 피치와 높이가  $\beta$ 와  $h$ 로 표현된 행동 정의는 각 바퀴가 지면과 접할 수 있는 조건을 만족하도록 계산한 결과를 의미한다. 또한 차량의 위치를 각 바퀴 기준으로 정의하였다. 여기서 차량의 자세 명령은 장애물을 간략화한 형상 치수에 관해 정의하였고 장애물의 형상은 각 종류에 대해서 각각 세 가지를 구성하였다(수직상승: 높이 400mm, 500mm, 600mm, 수직하강: 깊이 400mm, 500mm, 600mm).

시뮬레이션 결과 수직 상승 장애물에서는 앞서 언급한 8개의 행동으로 구성된 행동양식을 통해 세가지 높이의 수직 상승 장애물을 성공적으로 극복하였다(Fig. 4). 또한 수직 하강 장애물에서는 Table 2의 7개 행동을 통해 3개의 서로 다른 깊이의 장애물 지역을 모두 성공적으로 극복할 수 있었다(Fig. 5).

이 때, 앞서 정의한 각 행동 양식에 대해서 알고리즘이 생성한 하위 수준의 행동양식 개수는 Table 4와 같다. 수직 상승 장애물의 경우 20~40개의 하위 수준 행동 양식이 생성되었으며 특히 2단계, 4단계, 6단계에서 많은 행동 양식이 생성되었다. 그 이유는 위의 단계에서 차량이 바퀴의 일부를 매니플레이터로 사용하기 위하여 의도적

으로 지면에서 떼어내면서 각 바퀴의 하중분포가 바뀌며 각 타이어와 현가장치의 변형량이 변하기 때문이다. 이와 같은 현상은 현 차량의 피치각 및 높이를 의도치않게 변화시키기 때문에 이전에 계산한 각 현가장치의 명령각이 차량을 원하는 상위수준 행동양식을 만족하도록 하지 못하게 된다. 이와 같은 현상이 반복되면서 알고리즘은 추가적인 새로운 하위수준 행동양식을 계산하게 되며 결과적으로 상위수준 행동양식을 만족시키는 하위 수준 행동을 생성하게 된다.

수직하강 장애물에서도 같은 결과가 나타났으며 특히 주행 중 전륜이 공중에 뜨게 되는 2번째 상위 행동양식에서 차량의 타이어 및 현가장치 변형으로 인해 많은 하위 수준 행동양식이 만들어졌음을 확인할 수 있다.

장애물 구간 내에서 차량의 안정성각을 평가해보았을 때, 차량은 전체적으로  $0.3\text{rad}$  이상의 안정성을 유지하며 장애물 구간을 지나가고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 일부 구간에서 장애물의 높이가 낮거나 깊이가 얇은 경우 장애물 구간 내에서 안정성각이 음수가 나왔다. 이는 차량이 현재 바퀴의 접촉점을 기준으로 생성된 평면에서 전복이 일어남을 나타낸다. 하지만 이와 같은 현상은 중륜이 전방에서 후방, 혹은 후방에서 전방으로 이동하는 과정에서 중륜이 지면과 닿게 되어 기준이 되는 접촉평면이 바뀌는 과정에서 마치 전복이 일어난 것으로 측정된 것임을 확인하였다. 그러므로 전체적으로 차량은  $0.3\text{rad}$  이상의 안정성을 유지하며 장애물 구간을 주행하였음을 알 수 있다. 이와 같이 정적 안정성을 유지하며 장애물 구간을 극복할 수 있는 능력은 차량의 무게 중심을 능동적으로 이동시킬 수 있는 능동형 현가장치 차량의 특징이라 할 수 있다. 특히 임무 장비를 가지고 있거나 다양한 종류의 센서가 필요한 무인자율 차량의 경우 충격에 취약하기 때문에 하강지형에서 정적 안정성을 유지하며 장애물을 극복하는 능력은 반드시 필요하다. 더욱이 차량의 질량이 클수록 하강 지형 극복시 발생하는 추락에 의한 충격이 커지므로 관절에 무리한 힘이 가해질 수 있어 정적 안정성을 유지하며 내려가는 능력이 반드시 수반되어야 한다.

Farritor<sup>(7)</sup>가 제안한 GA를 통한 행동모델계획에서는 수직 돌출 장애물과 동일한 작업에 대해서 총 71개의 행동이 사용된 것과 비교하였을 때,

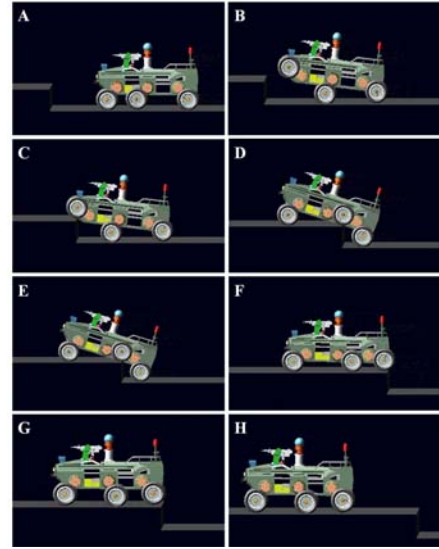


Fig. 4 Resultant upper level behaviors for step-up obstacles

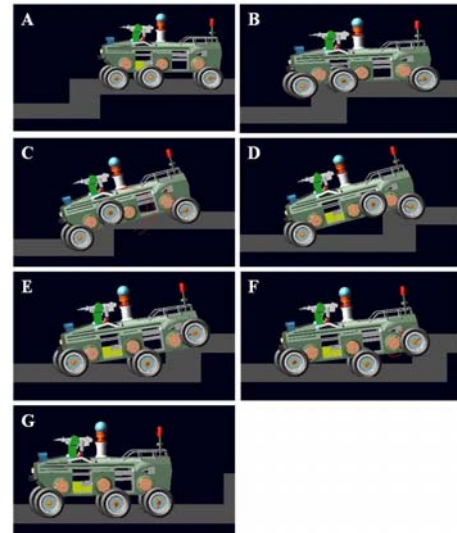


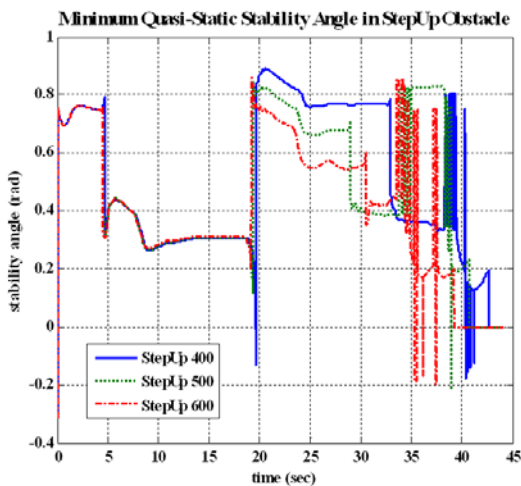
Fig. 5 Resultant upper level behaviors for step-down obstacles

계획 길이는 상위 수준의 경우 약 1/10 수준으로 현저하게 줄었다. 그 이유는 GA방법의 경우 행동이 하위 수준까지 포함하지만 본 연구에서 사용한 방법은 상위 수준에서만 행동을 계획하기 때문이다. 실제 장애물 극복에 사용된 행동의 경우에는 현재 시뮬레이션 결과에서는 약 절반 수준으로 나타났으나 자세와 관련한 오차 허용범위에 따라 GA를 사용한 방법과 비슷한 개수의 행동이 사용될 수도 있다.



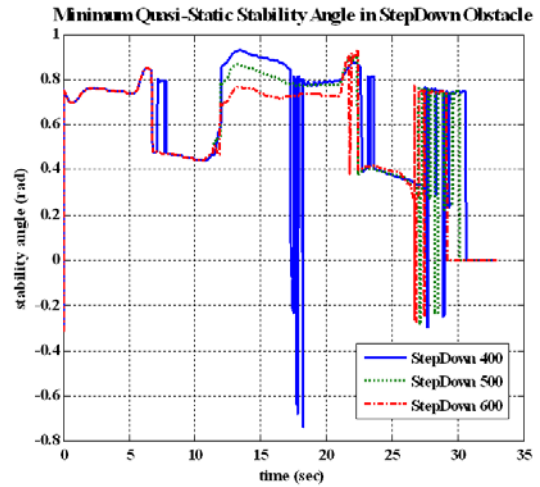
**Table 4** Number of Lower Level Behaviors in Step up and Step down obstacles

step\Height	Step Up			Step Down		
	400	500	600	400	500	600
1	2	2	2	2	2	2
2	6	6	6	17	17	17
3	2	2	2	4	3	2
4	5	5	5	3	4	2
5	2	2	2	3	3	4
6	4	3	20	5	4	4
7	3	1	2	4	3	3
8	3	2	3	-	-	-
total	27	23	42	38	36	34



**Fig. 6** Minimum Quasi-Static stability angle in step-up obstacles

본 연구에서와 같이 계획 단계에서 차량의 자세와 관련된 상위 수준의 행동만을 고려하는 것은 다음과 같은 장점이 있다. 우선 고려하는 행동의 개수가 줄어들기 때문에 경로 계획 시 연산 속도를 줄이는 것이 가능하다. GA 방법에서도 연산 속도를 줄이기 위해 현재 상황에서 불필요한 행동은 제외하고 교배방식을 실패구간 내로만 제한하는 등의 노력을 기울인 바 있다. 또한 Farrisor 역시 행동모델계획을 상위 수준에서 수행하는 것이 올바르다고 지적하였는데 이는 하나의 상위 수준 행동은 여러 하위 수준의 행위를 하나의 단위로 함으로써 고려하는 행동의 개수가 줄어드는 역할을 하기 때문이다. 고려하는 행동의



**Fig. 7** Minimum Quasi-Static stability angle in step-down obstacles

개수가 줄어들수록 연산 속도뿐 아니라 최적화 연산 중 지역최소값에 빠질 가능성도 줄어든다.

둘째로, 상위 수준만의 행동으로 행동 계획을 하면 상위 수준의 행동에 대해 지식 기반의 전문가 모델을 구성하여 직관적으로 행동 계획을 구성하는 것이 가능하다. 이는 보다 직관적인 행동 계획을 가능하게 하며 전문가 모델의 학습 또한 가능하다. 본 연구에서는 지형 내에 존재하는 장애물의 간략한 형태에 따라서 직관적으로 상위 수준의 행동계획을 작성한 것이며 행동 계획을 장애물 형상 치수와 연결시킴으로써 하나의 전문가 모델을 구성한 것이다. 학습이 포함되지 않은 전문가 모델의 경우 장애물을 극복하는데 있어 직관적인 방법만을 사용하게 되므로 이 경우 Farrisor의 행동모델계획을 함께 사용하여 전문가 모델을 구성할 수 있다. GA를 통한 행동모델계획의 경우 예상치 못한 방법으로 장애물 극복 방법을 구성하는 능력을 보여준 바가 있어 전문가 모델이 직관 내에서 머무는 것을 방지할 수 있다.

### 5. Summary and Conclusions

본 연구에서는 능동형 혼합 주행 방식의 무인 자율 차량에 대해서 차량의 자세 제어를 위한 다리 형상 제어방식을 제안하였다. 본 방법에서는 지형에 대한 구체적인 정보 없이 협지 구간 내에서 차량의 자세를 유지하거나 변경할 수 있는 방

법으로 각 바퀴와 지면의 접촉각을 이용해 구간 내에서 이와 평행한 지면을 구성하였다. 각 바퀴가 지면 위에 있도록 하는 구속조건과 차량 치수 및 형상에 대한 변환행렬을 통해 차량 자세에 대한 상위행동명령을 만족시키는 하위행동 명령, 즉 차량 다리의 각도 및 각속도를 만들었다. 이때, 차량의 준정적 전복 안정성과 전력사용량을 고려하였고 각 바퀴 간에 충돌이 발생하지 않도록 행동양식을 구성하였다.

본 방법은 능동형 혼합 주행 방식 차량의 다리 제어에 많이 활용되는 행동 제어방식에서 지면의 정보 없이 상위 수준의 행동을 수행할 수 있으므로 제한된 지형정보만을 습득하는 경우에 적합하다. 또한 상위 수준의 행동만을 고려한 행동 계획이 가능하도록 하여 행동 계획에 직관적 및 효율적이며 추후에 학습알고리즘을 적용한 전문가 모델의 활용이 용이하다.

## 후 기

본 연구는 방위사업청/민군겸용 기술센터/정보통신부/정보통신연구진흥원의 민군 겸용 기술개발 사업의 일환으로 수행되었음.[06-DU-LC-01, 네트워크 기반 다목적 견마형 로봇 기술 개발]

## 참고문헌

- (1) Siegwart, R., Lamon, P., Estier, T., Lauria, M. and Pignet, R., 2002, "Innovative Design for Wheeled Locomotion in Rough Terrain," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 40, No. 2-3, pp. 151~162.
- (2) Lauria, M., Pignet, Y. and Siegwart, R., 2002, "OCTOPUS: An Autonomous Wheeled Climbing Robot," *Proceedings International Conference on Climbing and Walking Robots*.
- (3) Grand, C., Benamar, F., Plumet, F. and Bidaud, P., 2004, "Stability and Traction Optimization of a Reconfigurable Wheel-Legged Robot," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 23, No. 10-11, pp. 1041~1058.
- (4) Iagnemma, K., Rzepiewski, A., Dubowsky, S. and Schenker, P., 2003, "Control of Robotic Vehicles with Actively Articulated Suspensions in Rough Terrain," *Autonomous Robots*, Vol. 14, No. 1, pp. 5~16.
- (5) Kemurdjian, A., Gromov, V., Mishkinyuk, V., Kucherenko, V. and Sologub, P., 1992, "Small Marsokhod Configuration," *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- (6) Tunstel, E., 1999, "Evolution of Autonomous Self-Righting Behaviors for Articulated Nanorovers," *Proceedings of the Fifth International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (ESA SP-440)*.
- (7) Farritor, S. and Dubowsky, S., 2002, "Genetic Planning Method and Its Application to Planetary Exploration," *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the Asme*, Vol. 124, No. 4, pp. 698~701.
- (8) Farritor, S., Hacot, H. and Dubowsky, S., 1998, "Physics-Based Planning for Planetary Exploration," *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- (9) Chin, K., Breslawski, R., Kientz, T. and Kumar, V., 2002, "Mobile Robot for Uneven Terrain," *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*.
- (10) Dornhege, C. and Fleiner, A., 2007, "Behavior Maps for Online Planning of Obstacle Negotiation and Climbing on Rough Terrain," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- (11) Hollerbach, J. M. and Atkeson, C. G., 1987, "Deducing Planning Variables from Experimental Arm Trajectories: Pitfalls and Possibilities," *Biological Cybernetics*, Vol. 56, No. 5-6, pp. 279~292.