

전복 방지를 위한 소형 무인주행로봇의 자세 안정화 알고리즘

Posture Stabilization Algorithm of A Small Unmanned Ground Vehicle for Turnover Prevention

고 두 열* Doo-Yeol Koh	김 영 국* Young-Kook Kim	이 상 훈** Sang-Hoon Lee
지 태 영** Tae-Young Jee	김 경 수* Kyung-Soo Kim	김 수 현* Soo-Hyun Kim

Abstract

Small unmanned ground vehicles(SUGVs) are typically operational on unstructured environments such as crashed building, mountain area, caves, and so on. On those terrains, driving control can suffer from the unexpected ground disturbances which occasionally lead turnover situation. In this paper, we have proposed an algorithm which sustains driving stability of a SUGV as preventing from turnover. The algorithm exploits potential field method in order to determine the stability of the robot. Then, the flipper and manipulator posture of the SUGV is optimized from local optimization algorithm known as gradient descent method. The proposed algorithm is verified using 3D dynamic simulation, and results showed that the proposed algorithm contributes to driving stability of SUGV.

Keywords : SUGV(소형 무인주행차량), Posture Stabilization(자세 안정화), Turnover Prevention(전복 방지), Potential Field(전위계), Optimization(최적화)

1. 서론

현재 다양한 소형 무인주행차량들이 높은 견인력(traction)이 요구되는 산악, 무너진 빌딩, 동굴 등의 지역에서 인간을 대신하여 정찰(reconnaissance), 수색 및

구조(search and rescue), 폭발물 제거(bomb disposal) 등의 목적으로 활용되고 있다. 여러 소형 무인주행차량들 중 가장 대표적으로 활용되고 있는 로봇으로 iRobot社의 PackBot과 Foster-Miller社의 Talon을 들 수 있다(Fig. 1).

대부분의 소형 무인주행차량들은 이동 메커니즘으로 험지 이동성이 뛰어난 무한궤도를 적용하고 있다. 이러한 무인궤도 메커니즘은 복잡한 험지에서도 지면과 지속적인 접촉이 가능하여 이동성이 뛰어난 반면, 미끄러짐(slip)이 발생하고, 지면의 불균일성을 예측하

† 2011년 8월 10일 접수~2011년 11월 25일 게재승인

* 한국과학기술원(KAIST)

** 국방과학연구소(ADD) 5기술 2부

책임저자 : 김수현(soohyun@kaist.ac.kr)



Fig. 1. PackBot(left) and Talon(right)

기 어렵다는 문제가 있다. 따라서 대부분의 현존하는 소형 무인주행차량들은 스스로 지면 상태를 인식하여 자율적으로 임무를 수행하기보다 사용자가 원격조종장치(RCU : Remote Control Unit)를 이용하여 원격에서 로봇을 조작하는 방식으로 제어된다. 이때, 사용자는 로봇에 탑재된 카메라, 레이저 등의 센서들로부터 수집한 간접적인 정보들을 이용하여 로봇을 조작한다. 이러한 간접적인 센서 정보들은 정확한 주변 상황을 인식하기 어려우며, 때때로 예측하지 못한 미끄러짐이나 전복 상황이 발생하여 로봇의 조작을 어렵게 한다^[1]. 이러한 문제점을 보완하고자 원격조종 중 주행 안전성을 유지할 수 있는 로봇의 반자율 제어(semi-autonomous control)에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다.

기존 연구들은 센서로부터 지면 정보를 미리 예측하여 로봇을 안정적인 주행 및 회전 속도로 제어하거나^[2~4], 플리퍼(flipper) 혹은 매니플레이터(manipulator)와 같은 로봇에 장착된 기구를 제어하여 자세를 안정화하는 접근 방법으로 구분될 수 있다^[5~8]. 본 연구는 후자의 자세 안정화와 관련된다. 기존 연구에서는 안정도를 판별할 수 있는 지표를 제시하고 이를 이용하여 매니플레이터의 자세를 제어한다. 하지만 안정화 제어에 대한 최적화 개념이 부족하다. 본 연구에서는 기존 연구에서 좀 더 나아가 로봇의 전복 안정성을 최적화하도록 플리퍼와 매니플레이터의 자세를 제어하는 새로운 알고리즘을 제시한다.

제안된 알고리즘은 경로 계획(path planning) 알고리즘에 많이 이용되고 있는 전위계(potential field) 방법을 이용하여 로봇의 전복 안정도를 평가하고, 만약 로봇이 불안정한 상태일 경우 전위계 방법으로부터 도출한 목적함수(objective function)를 최적화하도록 플리퍼와 매니플레이터 자세를 제어한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 다음 장에서 전체 알고리즘에 대한 개념을 자세하게 소개하고, 3장에서는 로봇의 전복 안정도를 평가할 수 있는 전위계 방

법, 자세 안정성에 대한 목적함수와 이의 최적화에 대하여 논의한다. 4장에서는 제안된 알고리즘을 동역학 해석 프로그램 RecurDyn으로 구현하여 성능을 검증하고, 마지막으로 5장에서 결론 및 향후 연구로 본 논문을 완성한다.

2. 전체 알고리즘 소개

이 장에서는 전반적인 알고리즘의 흐름에 대하여 소개한다. 제안된 전체 알고리즘은 크게 두 부분으로 구분될 수 있다. 먼저 센서를 통한 지면과 로봇의 상태 정보로부터 로봇의 전복 안정성을 계산한다. 다음으로 로봇이 불안정한 상태일 경우 최적화 제어를 통하여 로봇에 장착된 플리퍼와 매니플레이터 자세를 제어한다(Fig. 2). 전복 안정성이란 전복이 발생할 수 있는 정도를 나타내는 지표로서 본 연구에서는 무게 중심의 위치에 따른 전위(potential) 값을 계산하여 전복 안정도를 제시하였다. 만약 계산된 전위의 크기가 설정된 크기보다 클 경우 로봇은 플리퍼와 매니플레이터를 전위의 크기가 최소화 되도록 제어하여 자세 안정화를 추구하게 된다.

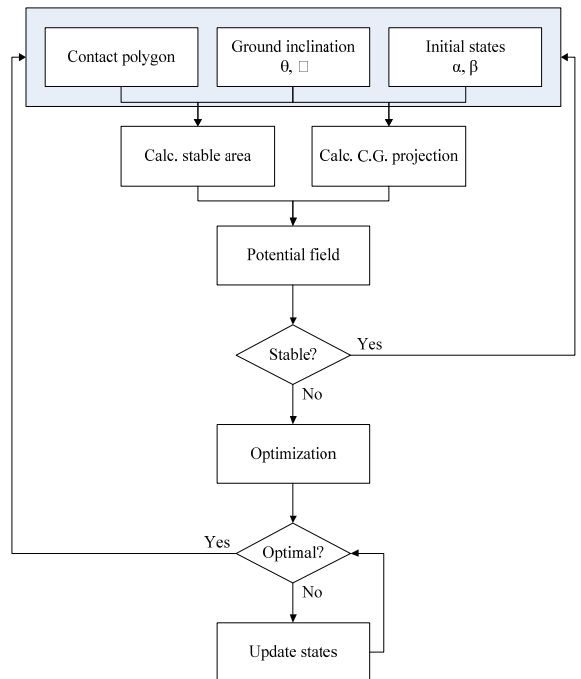


Fig. 2. Overall flow of posture stabilization algorithm

본 연구에서 고려하는 소형 무인주행차량은 앞단에 좌우 플리퍼가 동기화되어 움직이고, 몸통 상단에 틸트(tilt) 움직임이 가능한 단일 링크(link) 매니플레이터로 구성된다. 로봇의 자세 상태는 플리퍼와 매니플레이터 위치로 표현할 수 있으며, 이는 각각 로봇의 주행 방향을 수평으로 하여 측정된 각도 값을 의미한다 (Fig. 3).

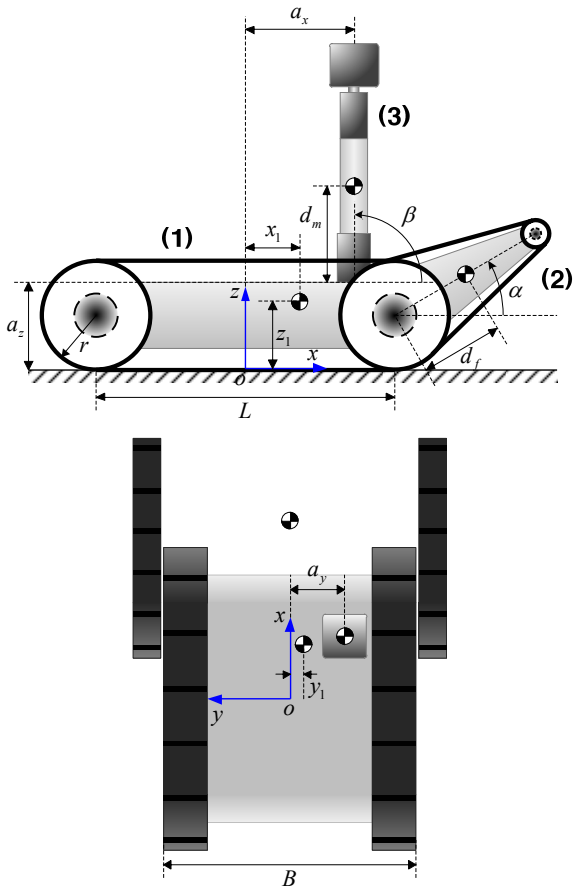


Fig. 3. States and parameters of a SUGV. α , β represent flipper and manipulator state respectively

3. 전복 안정도 평가 및 자세 최적화

앞서 언급하였듯이 로봇의 전복 안정화를 위해서는 전복 안정성의 정도에 대한 지표가 필요하다. 기존 연구에서는 로봇의 무게중심(C.G. : Center of Gravity)의 위치^[9,10], 매니플레이터의 부하를 고려한 Force-angle

measure^[5,6], 모멘트의 합이 0이 되는 점 ZMP(Zero Moment Point)의 위치^[8]를 이용하여 전복 안정성을 평가하였다. 본 연구에서는 무게중심의 위치와 전위계를 위하여 전복 안정성 지표를 제안하였다.

가. 전복 안정도 평가

로봇의 전복 안정성은 무게중심의 위치와 밀접한 관계가 있다. 따라서 로봇의 안정성을 판별하기 위해서는 먼저 무게중심의 위치를 구해야 한다. 로봇의 무게중심을 플리퍼와 매니플레이터의 자세에 따라 절대 좌표계(global coordinate)를 기준을 나타내면 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{p}_{cg} &= [x_{cg} \ y_{cg} \ z_{cg}]^T \\ \vec{P}_{cg} &= Rot(\phi \ \theta \ \psi) \vec{p}_{cg} \end{aligned}$$

where,

$$x_{cg} = \frac{m_1 x_1 + m_2(L/2 + d_f \cos \alpha) + m_3(a_x + d_m \cos \beta)}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (1)$$

$$y_{cg} = \frac{m_1 y_1 + m_3 a_y}{m_1 + m_2 + m_3}$$

$$z_{cg} = \frac{m_1 z_1 + m_2(r + d_f \sin \alpha) + m_3(a_z + d_m \sin \beta)}{m_1 + m_2 + m_3}$$

$$Rot(\phi \ \theta \ \psi) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\theta + c\psi s\theta s\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\theta + s\psi s\theta c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix}$$

$$c\psi \equiv \cos \psi, \ s\psi = \sin \psi, \ c\theta \equiv \cos \theta,$$

$$s\theta = \sin \theta, \ c\phi \equiv \cos \phi, \ s\phi = \sin \phi$$

$$\vec{P}_{proj} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \vec{P}_{cg} \quad (2)$$

여기서 m_1 , m_2 , m_3 는 각각 몸통, 플리퍼, 매니플레이터의 무게이고, L은 앞 뒤 풀리 사이의 거리, B는 로봇 몸통의 너비를 의미한다. 로봇의 전체 무게중심을 구하기 위해서는 로봇과 플리퍼, 매니플레이터 좌표계 사이의 상대적인 변위를 알아야 한다. 플리퍼 좌표계의 위치는 플리퍼 회전축의 중심이며 d_f 는 회전 중심으로부터 무게중심까지의 거리를 나타낸다. a_x , a_y , a_z 는 로봇과 매니플레이터 좌표계 사이의 상대 거리이며 d_m 은 매니플레이터 좌표계의 기준점으로부터 무게중심까지의 거리이다. x_1 , y_1 , z_1 은 로봇 좌표계

로부터 몸통 무게중심 사이의 거리를 나타낸다. $Rot(\phi \theta \psi)$ 은 로봇 좌표계에서 나타낸 무게중심의 위치를 절대 좌표계에서 나타내도록 변환하는 오일러(Euler) 각 변환행렬이다.

일반적으로 전복 안정도는 무게중심의 위치와 안정 영역으로 결정된다. 정역학적으로 로봇의 무게중심이 지면에 투영(projection)된 투영점이 로봇과 지면 사이의 접촉 영역으로 결정되는 안정 영역을 벗어날 경우 전복이 발생한다^{9,10}(Fig. 4). 무게중심의 투영점은 (2)

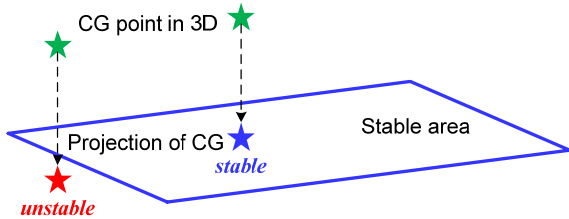


Fig. 4. Concept of static turnover stability

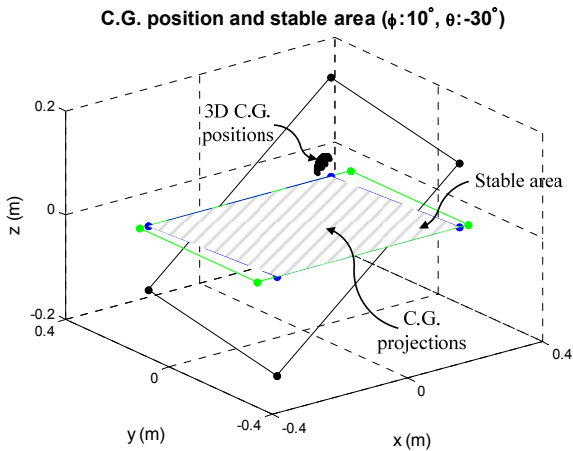


Fig. 5. C.G. projection points w.r.t. flipper and manipulator states and stable area w.r.t. ground inclination when $\phi = 10^\circ, \theta = -30^\circ$

$$\begin{aligned} \vec{p}_1 &= [L/2 \ B/2 \ 0]^T, \vec{p}_2 = [-L/2 \ B/2 \ 0]^T, \\ \vec{p}_3 &= [-L/2 \ -B/2 \ 0]^T, \vec{p}_4 = [L/2 \ -B/2 \ 0]^T \\ \vec{P}_i &= Rot(\phi \theta \psi) \vec{p}_i, \quad i = 1, 2, 3, 4 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\vec{P}_{s,i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \vec{P}_i$$

와 같이 계산된다. 안정 영역은 (3)에서 계산된 네 점을 잇는 영역의 내부를 의미한다. 지면 경사가 $\phi = 10^\circ, \theta = -30^\circ$ 일 때 로봇 자세에 따른 무게중심 위치와 안정영역을 나타내면 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 녹색 실선은 로봇이 평면에 위치할 경우 접촉 영역이고, 검정색 실선은 지면 경사가 $\phi = 10^\circ, \theta = -30^\circ$ 일 때의 접촉 영역, 파란 점선은 검정 실선을 평면에 투영한 영역으로 안정영역을 나타낸다. 그리고 검정 점들은 지면 경사가 $\phi = 10^\circ, \theta = -30^\circ$ 일 때 플리퍼와 매니퓰레이터 자세에 따른 3차원 무게중심 점들이고, 파란 점들은 3차원 무게중심 점들을 평면에 투영한 것이다.

로봇의 전복 안정성은 무게중심의 투영점이 안정 영역의 가장자리(boundary)에 가까울수록 로봇이 전복될 확률이 높으므로 낮아지게 된다. 따라서 무게중심 투영점의 위치가 가장자리에 가까울 경우 안정화를 위해서는 무게중심의 위치를 영역 안쪽으로 이동시켜야 하며 가장자리에 가까울수록 더욱 많이 안쪽으로 이동되어야 한다. 이러한 특징을 구현하기 위하여 본 연구에서는 전위계 방법을 적용하였다.

전위계 방법은 로봇의 자율주행을 위한 경로계획에서 이용되는 방법으로 목표(goal) 지역에서 생성된 인력(attractive force)과 장애물에서 발생하는 척력(repulsive force)을 합한 전위계를 이용하여 장애물 회피와 목표 도달을 동시에 만족하는 경로를 생성하는 방법이다. 본 연구에서는 안전영역의 가장자리를 장애물로 가정하여 무게중심 투영점과 가장자리의 거리에 따라 척력이 발생하도록 (4)와 같이 전위계를 계산하였다. Fig. 6에 (4)와 관계된 변수를 나타내었다.

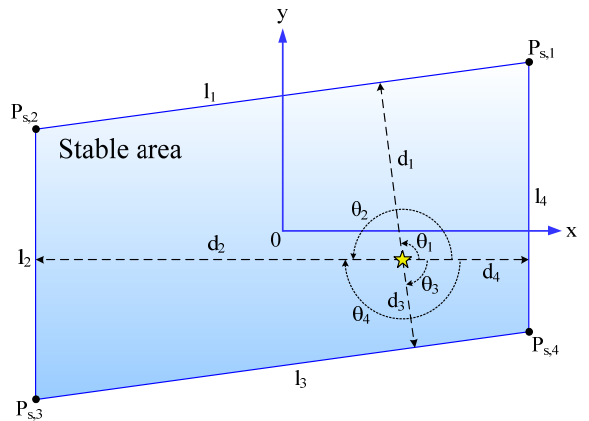


Fig. 6. Parameters for calculating potential field method

if $d_i \leq s_i$
 $\Delta x_i = -\lambda(s_i - d_i)\cos\theta_i$ and $\Delta y_i = -\lambda(s_i - d_i)\sin\theta_i$

if $d_i > s_i$
 $\Delta x_i = 0$ and $\Delta y_i = 0$ (4)

$$\vec{P}_{des} = \vec{P}_{proj} + \left[\sum_i \Delta x_i \quad \sum_i \Delta y_i \quad 0 \right]^T$$

$i = 1, 2, 3, 4$

d_i 와 θ_i 는 무게중심 투영점으로부터 각 가장자리 직선 l_i 까지의 거리와 각도이다. 식 (4)에서 s_i 는 각 가장자리로부터 전위계가 생성되는 최대 거리를 의미하고, 안정화 범위를 결정한다. s_i 가 작으면 가장자리 주변에서만 전위계가 생성되며, 클수록 전위계의 영역이 넓어진다. λ 는 전위계 크기 배율을 의미하며 안정화 정도를 결정한다. λ 가 클수록 척력의 크기가 커지므로 무게중심 투영점을 안정화하는 정도가 커지게 된다. s_i 와 λ 는 0보다 크거나 같은 값을 갖는 양수로 사용자가 결정하는 변수이다.

Fig. 7(a)에 지면이 평편할 경우 무게중심의 투영점과 안전영역 내부의 전위계를 나타내었다. Fig. 7(a)에 나타나듯이 전위계는 투영된 무게중심점을 중심으로 $d_i > s_i$ 인 영역에서는 전위계가 생성되지 않으나, $d_i \leq s_i$ 인 영역에서는 가장자리에 가까울수록 큰 전위 값을 갖는 전위계가 생성되는 것을 볼 수 있다. 여기서 무게중심 투영점에서 전위가 발생하지 않는다는 것은 현재 로봇의 상태가 전복으로부터 안정적이라는 것을 의미한다. 반면 지면 경사가 $\phi = 10^\circ$, $\theta = -30^\circ$ 일 경우 Fig. 7(b)와 같이 무게중심 투영점에서 전위가 발생하게 되고 이는 로봇 자세 안정화가 필요한 상태를 의미한다.

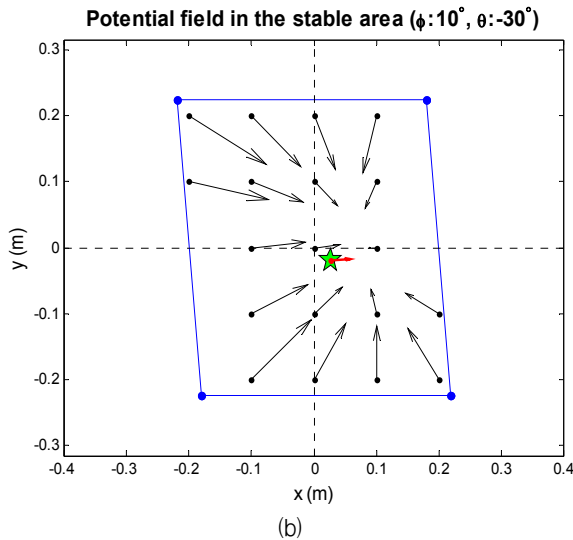
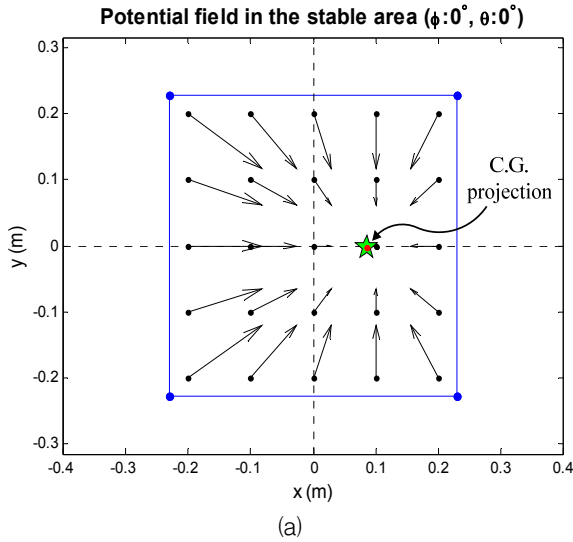


Fig. 7. Potential field in the stable area when (a) $\phi = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$, and (b) $\phi = 10^\circ$, $\theta = -30^\circ$

나. 자세 최적화

앞의 전위계 방법을 이용하여 로봇의 전복 안정화가 필요한 경우 플리퍼와 매니플레이터 자세를 제어하여 로봇이 안정화되도록 해야 한다. 다시 말하면 전위계 방법으로 부터 현재 무게중심 투영점에서 전위가 발생하면 투영점을 전위의 크기와 방향을 고려하여 이동시켜야 한다. 하지만 로봇의 무게중심은 주어진 지면 경사에서 플리퍼와 매니플레이터 자세에 의해서만 이동이 가능하므로 항상 전위계로부터 계산된 위치로 무게중심을 옮길 수 없다. 따라서 본 연구에서는 (5)와 같이 목적함수를 현재 무게중심 투영점과 전위계로부터 구한 목표 투영점사이의 거리로 정의하고, 이를 최적화하여 로봇의 자세 안정화를 추구하고 있다. 목적함수는 플리퍼와 매니플레이터 자세의 함수로 표현된다. 여기서 $\lambda_{s_{max}}$ 는 표준화 요소(normalizing factor)이다. 식 (5)에는 플리퍼와 매니플레이터의 자세에 대한 제한(constraint)들을 포함하고 있다. 플리퍼는 제한된 구동범위를 벗어날 경우 몸체를 지면으로부터 밀어내어 로봇 상태가 더욱 불안정해질 수 있고, 매니플

레이터는 운용 범위가 기구적으로 제한되어 있기 때문에 이와 같이 설정하였다.

$$Min \left(\frac{\| \vec{P}_{proj} - \vec{P}_{des} \|^2}{\lambda s_{max}} \right) \equiv f(\alpha, \beta)$$

subject to (5)

$$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$$

$$45^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$$

플리퍼와 매니플레이터 자세를 갱신하기 위하여 (5)의 목적함수에 국부 최적화(local optimization) 알고리즘 중 하나인 경사강하법(gradient descent method)을 (6)과 같이 적용하였다. γ 는 최적화의 수렴 속도를 결정하는 변수이다.

$$x(k+1) = x(k) - \gamma \nabla f(k)$$

where,

$$x = [\alpha \ \beta]^T$$

$$\nabla f = \left[\frac{\partial f}{\partial \alpha} \ \frac{\partial f}{\partial \beta} \right]^T$$

Fig. 8은 지면 경사가 $\phi = 20^\circ$, $\theta = -40^\circ$ 이고, 로봇의 초기 자세가 $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 90^\circ$ 일 때 (5)와 (6)으로부터 계산된 최적화 과정을 나타낸다. 최적화 결과로

Optimization of an objective function ($\phi: 20^\circ$, $\theta: -40^\circ$)

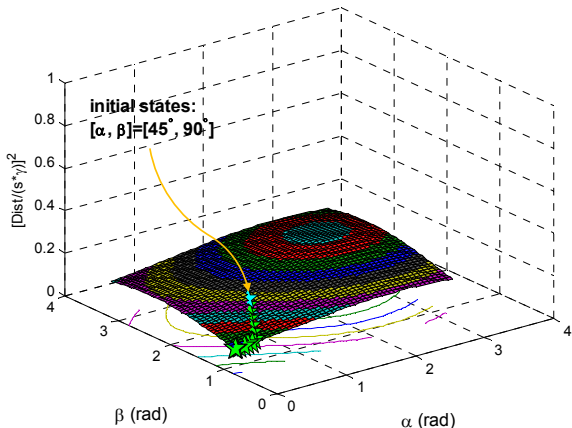


Fig. 8. Optimization of the flipper and manipulator posture when $\phi = 20^\circ$, $\theta = -40^\circ$

봇의 자세가 몇 번의 반복을 거쳐 $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 45^\circ$ 로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이는 로봇이 약간 기울어진 상태에서 경사도를 등반할 경우 플리퍼와 매니플레이터를 모두 앞으로 뺀 자세가 가장 안정화된 자세라는 것을 의미한다.

4. 모의실험

가. 실험환경 구성

앞서 제안한 자세 안정화 알고리즘을 검증하기 위하여 직접 실험하기에 앞서 동역학 시뮬레이션을 수행하였다. 모의실험을 위해 소형 무인주행차량의 3차원 모델을 동역학 시뮬레이션 프로그램인 RecurDyn을 이용하여 Fig. 9와 같이 구현하였다. 앞의 해석과 모의실험에 이용된 로봇 변수 값들은 Table 1에 나타내었다.

모의실험은 앞의 RecurDyn 모델과 Matlab Simulink를 연동하여 전체 알고리즘 제어 루프를 Fig. 10과 같이 구현하였다. Simulink에 구현된 제안 알고리즘은 사용자로부터 입력받는 기준입력과 RecurDyn으로부터 지면 경사 및 로봇의 자세 상태를 입력받아 앞장에서 언급

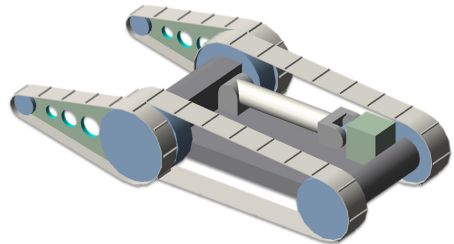


Fig. 9. 3D model of a SUGV for dynamic simulation

Table 1. Parameters of a SUGV

Parameter	Value	Parameter	Value
m_1	18.480kg	a_x	0.165m
m_2	4.110kg	a_y	-0.0600m
m_3	1.120kg	a_z	0.0750m
x_1	0.0423m	d_f	0.0433m
x_2	-0.000460m	d_m	0.283m
x_3	0.744m	r	0.0900m
B	0.455m	L	0.460m

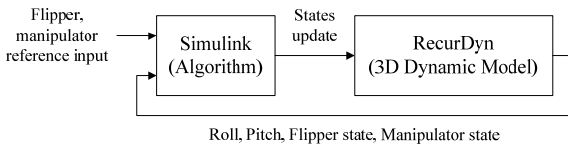


Fig. 10. Overall algorithm loop for simulation

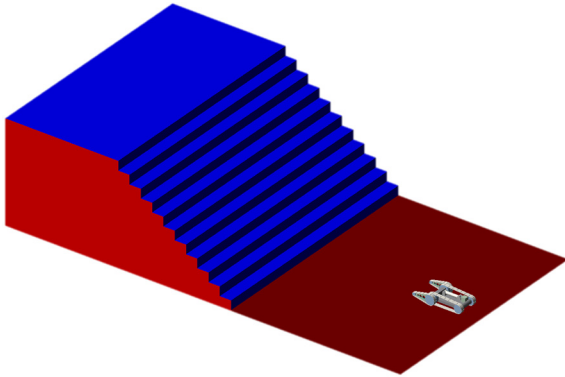


Fig. 11. Simulation environment for demonstration

한 자세 안정화 알고리즘을 이용하여 자세를 갱신한다. 모의실험의 환경은 일반 건물에서 흔히 마주치는 계단을 Fig. 11과 같이 구현하였다. 계단 각 단의 높이는 16cm이고, 깊이는 20cm이다.

나. 실험 결과

모의실험은 로봇이 계단을 등반할 때 플리퍼가 0~1 초 사이에 0°에서 25°로 각도가 증가하고, 매니플레이터는 0~2초 사이에 완전히 접힌 180°에서 90°로 자세가 변한 후 유지하도록 로봇 자세를 입력하여 진행하였다. 모의실험 결과 Fig. 12와 같은 결과를 얻을 수 있다. Fig. 12에서 로봇이 계단 등반을 시작할 때까지 평면을 주행하여 전복으로부터 안정된 상태이므로 플리퍼와 매니플레이터는 입력된 자세를 추종한다. 계단 진입 이후 경사가 일정 이상이 되면 3장에서 언급한 안정도 평가로부터 전위 값이 안정영역내부에서 발생하여 자세 안정화가 진행된다. Fig. 12의 두 번째와 세 번째의 그래프의 빨간 점선부분에 나타나듯이 계단 진입 후 자세 안정화 알고리즘에 의하여 플리퍼와 매니플레이터의 자세가 완전 앞으로 뺀 자세가 되는 것을 알 수 있다. 그리고 로봇이 계단을 모두 오른 후 다시 평편한 지역에 도달하게 되면 역시 전복으로부터 안정된 상태이므로 플리퍼, 매니플레이터 자세가 입력 자세로 복귀한다.

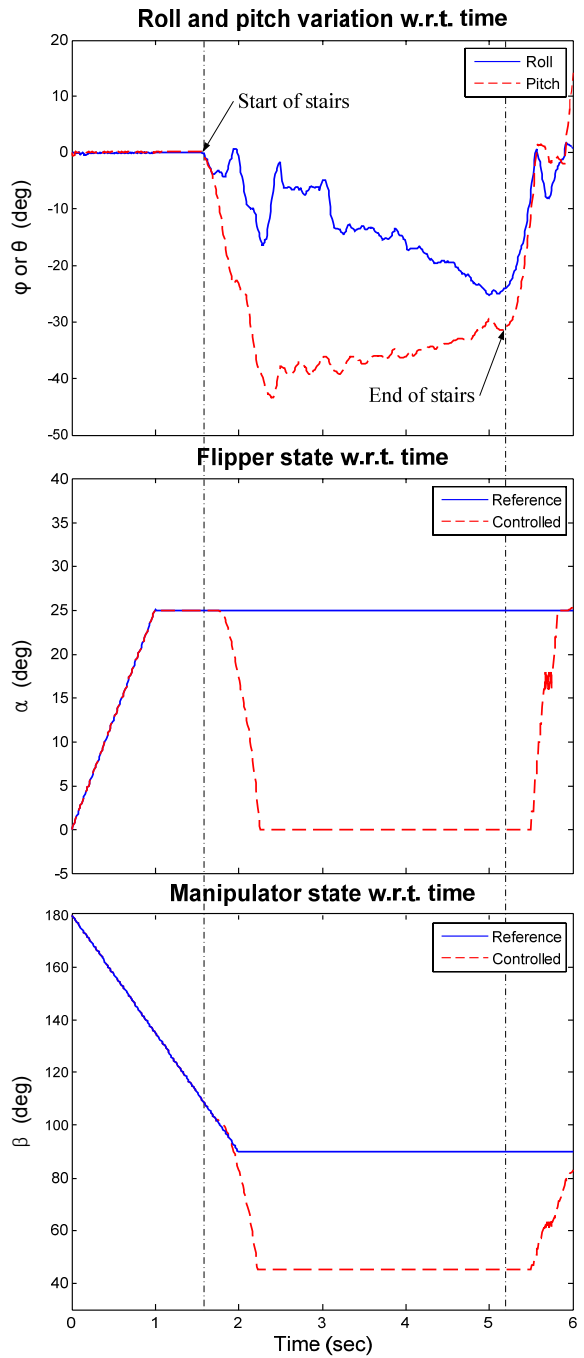


Fig. 12. Simulation result

제안된 알고리즘의 자세 안정화 정도를 정량적으로 측정하기 위하여 Fig. 13과 같이 알고리즘을 적용하였을 때와 적용하지 않았을 때의 무게중심 투영점에서

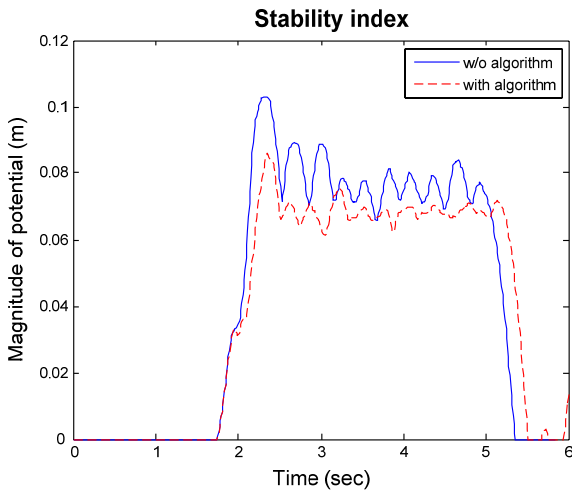


Fig. 13. Comparison of the magnitude of potential field (solid line : without the algorithm, dashed line : with algorithm)

생성되는 전위 크기를 비교하였다. Fig. 13에서 파란실선은 안정화 알고리즘을 적용하지 않고 계단을 등반하였을 경우이고, 빨간 점선은 알고리즘을 적용하였을 때의 전위 크기 변화이다. 결과에서 나타나듯이 알고리즘을 적용하였을 경우 전위 크기가 적용하지 않은 경우에 비하여 낮은 것을 확인할 수 있다. 로봇의 전복 불안정성은 전위의 크기에 비례하므로 제안된 알고리즘이 전복 안정성에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 하지만 안정화의 정도가 크지 않는 이유는 로봇의 몸체 무게에 비하여 플리퍼 및 매니플레이터 무게가 상대적으로 가볍기 때문이다. 만약 플리퍼와 매니플레이터가 제시된 로봇보다 높은 자유도를 갖거나, 매니플레이터가 물체를 잡고 있어 높은 적재하중(payload)이 있을 때 안정화 효과는 높아질 것이다.

5. 결론

현재 소형 무인주행차량은 높은 견인력이 요구되는 다양한 임무 환경에서 활용되고 있다. 대부분의 소형 무인주행차량들은 사용자가 원격에서 원격조종장치로부터 입력신호를 받아 제어된다. 하지만 이러한 운용 방식은 때때로 주변 상황을 예측하기 힘들어 로봇이 전복되는 상황이 발생하여 로봇에 치명적인 결함을 가져올 수 있다. 본 연구에서는 사용자의 제어입력을 보

조하며 로봇이 스스로 전복 안정성을 판단하여 자세를 제어하는 알고리즘을 제시하였다. 알고리즘은 전복 안정성을 전위계 방법으로부터 판별하여, 이로부터 도출된 목적함수를 최적화하도록 로봇 자세를 제어하였다. 제안된 알고리즘 검증을 위하여 동역학 시뮬레이션 프로그램을 이용한 모의실험을 수행하였으며, 제안된 알고리즘이 전복 안정화에 기여하는 것을 확인할 수 있었다. 향후 연구로는 다양한 조건의 로봇에서도 제시된 알고리즘이 전복 안정화에 기여가 가능한지 검토해볼 것이다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 “동적자세 안정화 및 자세복귀 알고리즘 연구” 과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] John D. Martens, Wyatts S. Newman, “Stabilization of a Mobile Robot Climbing Stairs”, IEEE Intl. Conference on Robotics and Automation, pp. 2501 ~ 2507, 1994.
- [2] Matthew Spenko et al., “Hazard Avoidance for High-Speed Mobile Robots in Rough Terrain”, Journal of Field Robotics 23(5), pp. 311 ~ 331, 2006.
- [3] Jae Byung Park et al., “Online Turnover-Free Control for a Mobile Agent with a Terrain Prediction Sensor”, Journal of Field Robotics 23(1), pp. 59 ~ 77, 2006.
- [4] Zvi Shiller, “Dynamic Motion Planning of Autonomous Vehicles”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 2, pp. 241 ~ 249, April 1991.
- [5] E. G. Papadopoulos, D. A. Rey, “A New Measure of Tipover Stability Margin for Mobile Manipulators”, International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, pp. 3111 ~ 3116, April 1996.
- [6] D. A. Rey, E. G. Papadopoulos, “On-line Automatic Tipover Prevention for Mobile Manipulators”, Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Grenoble, France, Sept. 1997.

- [7] Christoph Beck, Jaime Valls Miro and Gamini Dissanayake, "Trajectory Optimisation for Increased Stability of Mobile Robots Operating in Uneven Terrains", 7th International Conference on Control and Automation, pp. 1913~1919, Dec, 2009.
- [8] Qiang HUANG, Shigeh SUGANO, and Ichiro KATO, "Stability Control for a Mobile Manipulator Using a Potential Method", IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Munich, Germany, pp. 839~846, 1994.
- [9] Evgeni Magid et al., "Rescue Robot Navigation : Static Stability Estimation in Random Step Environment", SIMPAR, pp. 305~316, 2008.
- [10] Weidong Wang, Zhijiang Du, Lining Sun, "Kinematics Analysis for Obstacle-climbing Performance of a Rescue Robot", IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1612~1617, 2007.