〈학술논문〉 DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.4.340

모바일화를 위한 지능형 경계로봇의 시뮬레이션기반 설계

황기상* · 김도현* · 박규진* · 김성수† · 박성호**

(2007년 11월 5일 접수, 2008년 3월 5일 심사완료)

Simulation Based Design of Intelligent Surveillance Robot for Mobility

Ki Sang Hwang, Do Hyun Kim, Kyu Jin Park, Sung-Soo Kim and Sung Ho Park

Key Words : Mobile Surveillance Robot(모바일 경계로봇), Unmanned Ground Vehicle(무인지상차량), Stabilization Control(안정화 제어)

Abstract

An unmanned surveillance robot consists of a machine gun, a laser receiver, a thermal imager, a color CCD camera, and a laser illuminator. It has two axis control systems for elevation and azimuth. Because the current robot system is mounded at a fixed post to take care of surveillance tasks, it is necessary to modify such a surveillance robot to be installed on an UGV (Unmanned Ground Vehicle) system in order to watch blind areas. Thus, it is required to have a stabilization system to compensate the disturbance from the UGV. In this paper, a simulation based design scheme has been adopted to develop a mobile surveillance robot. The 3D CAD geometry model has first been produced by using Pro-Engineer. The required pan and tilt motor capacities have been analyzed using ADAMS inverse dynamics analysis. A target tracking and stabilization control algorithm of the mobile surveillance robot has been developed in order to compensate the motion of the vehicle which will experience the rough terrain. To test the performance of the stabilization control system of the robot, ADAMS/simulink co-simulations has been carried out.

1. 서 론

국가 주요 기간시설, 국경선 및 중요 건물 지역에 대하여 침입자로부터 안전하게 보호 관리하기 위하여 경계 시스템을 구축하여 활용하고 있다. 현재까지는 경계임무들은 인간에 의해 수행되어 왔다. 그러나 인간에 의해 수행되는 경계임무에서는 위험성 및 생리적 문제를 비롯하여 비능률적으로 인력과 시간을 소요하고 있다는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 인간에 의한 경계임무를 대신하여 경계임무에 로봇 시스템이 도입되고 있다. 사람을 대신하여 24시간 일정한 범위의 지역을 반복적으로 감시하며 경계지역에 있는 물체를 식별, 추적 및 위협사격 또는 살상을 할 수 있는 시스템을 경계로봇으로 정의한다. 경계로봇은 물체를 식별, 추적 및 위협사격 또는 살상을 할 수 있도록 하기 위해서 기관총, 레이저 리시버, 열 화상기, CCD 카메라 등으로 구성된다. 현재 이러한 시스템을 적용한 고정식 경계로봇이 개발되고 있으며, 실제로 시스템을 갖춰 국가 주요 기간시설, 국경선 및 중요 건물 지역의 경계에 도입되고 있다.

고정식 경계로봇은 사람을 대신하여 효율적으로 경계임무를 수행하고 있지만 경계임무에 있어 고정

† 책임저자, 회원, 충남대학교 메카트로닉스공학과
E-mail : sookim@cnu.ac.kr
TEL : (042)821-6872 FAX : (042)823-4919
* 충남대학교 대학원 메카트로닉스공학과
** (주)도담시스템스

식이라는 한계로 인하여 경계 사각지대가 발생한다. 이러한 고정식 경계로봇의 경계 사각지대에 대한 경계 시스템 보완 및 강화를 위해서는 이동을 통한 경계 감시가 필요하다.(1) 즉, 이동이 가능한 UGV(Unmanned Ground Vehicle)에 경계로봇을 장착한 모바일 경계로봇의 필요성이 요구되고 있다.

고정식 경계로봇이 모바일화가 되기 위해서는 UGV에 장착될 수 있는 경계로봇이 개발되어야 하며, UGV와 장착될 경계로봇 사이에 동역학적 상호작용에 대한 규명이 필요하다. 또한 고정식 경계로봇이 갖는 경계 사각지대에 대한 경계 및 감시, 수색을 확장하고 용이하게 하기 위해서는 고정식과는 달리 험한 비포장 산악 및 사막지역에서 작동되어야 한다. 이 때, 경계로봇이 목표물에 대해 위치 추적, 경고사격 또는 살상 등을 원활하게 수행하기 위해서는 영상 및 열상 카메라로 구성된 비전 시스템과 사격 시스템의 차량 동요에 대해 강인한 트래킹 및 안정화 제어가 필요하다.(2~5)

이러한 모바일 경계로봇의 설계 제작 및 실험을 통한 검증은 많은 시간과 비용이 소요되고 실험과정에서 많은 위험성도 내포되어 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 시뮬레이션 기반 설계 및 검증을 위한 가상에서의 시험이 필요하다.(6,7)

본 연구에서는 모바일 경계로봇의 시뮬레이션 기반 설계 과정을 제시하고 이 과정들을 통해 모바일 경계로봇을 설계함으로써 시간과 비용을 줄이고, 가상에서 시뮬레이션을 통한 시험을 수행함으로써 실험의 위험도를 낮추는데 첫 번째 목적이 있다. 그리고 경계로봇의 목표물 추적 및 안정화 제어를 위해 안정화 제어 로직을 적용하고 가상 시험을 통하여 이 안정화 제어 로직의 효용성을 검증하는데 그 두 번째 목적이 있다.(6,7) 본 연구에서는 고정식으로 개발되어 자이툰 부대에 실전 배치되었던 이지스 경계로봇의 후속 모델을 사용하여 제시된 설계 과정을 검증하였다.(8)

본 논문의 2장에서는 시뮬레이션 기반 설계 과정과 가상 시험 과정에 대하여 설명하고, 3장에서는 모바일 경계로봇의 가상 모델을 모델링하는 과정에 대하여 설명한다. 4장에서는 모바일 경계로봇의 안정화를 위해서 필요한 제어 모델에 대해 기술한다. 그리고 5장에서는 3장과 4장에서 설계된 경계로봇 모델과 제어 모델들을 이용하여 가상 시험 시뮬레이션에 대해 설명한다. 마지막으로 6장에서는 본 연구의 결론을 기술한다.

2. 시뮬레이션 기반 설계와 가상 시험 과정

시뮬레이션 기반 설계과정에서는 개발하고자 하는 모델의 가상 모델을 설계하고 이 모델을 가상 성능 평가를 통하여 최종적으로 실제 모델 설계에 반영함으로써 시간과 비용, 그리고 위험도를 줄이고자 하는데 목적이 있다. 시뮬레이션 기반 설계 과정은 Fig. 1에서와 같은 다이어 그램으로 나타낼 수 있다. 시뮬레이션 기반 설계 과정은 Fig. 1에서와 같이 형상 모델링과 기구학적 검증 단계, 동역학 모델 생성과 동역학적 해석 및 제어를 통해 검증하는 단계, 실제 모델을 제작하여 검증하는 단계로 이루어졌다.

Fig. 2는 가상 시험 시뮬레이션 과정을 도식화한 다이어그램이다. 본 과정에서는 UGV가 험한 지형을 주행할 때 발생하는 운동 외란에 대해 모바일 경계로봇의 안정화 제어 성능을 살펴본다. 가상 시험에서는 다양한 도로의 특성에 따른 시뮬레이션이 가능하므로 다양한 상황에 대한 성능 분석이 가능하다. 이는 실제 시험에서 올 수 있는 위험성을 줄일 수 있게 되고, 각 상황에서의 모바일 경계로봇의 성능을 파악할 수 있다.

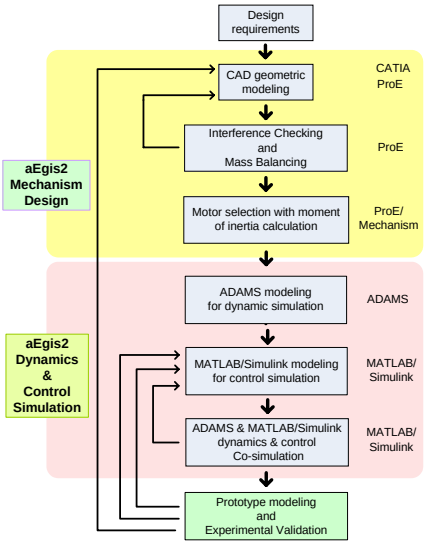

Fig. 1 Simulation based design procedure

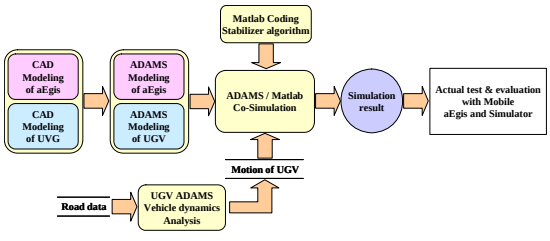

Fig. 2 Virtual test simulation procedure

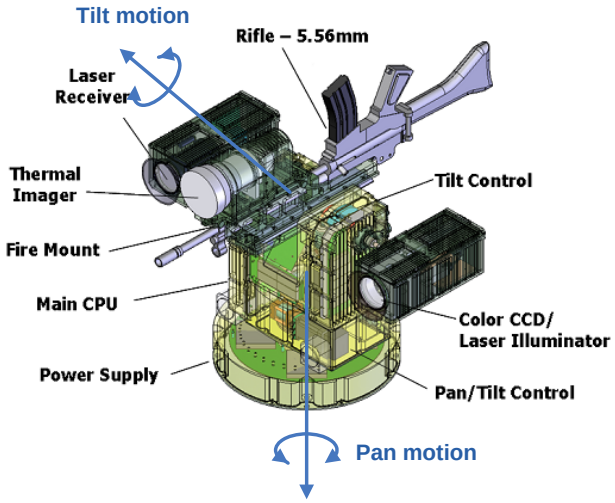

Fig. 3 Composition of mobile surveillance robot

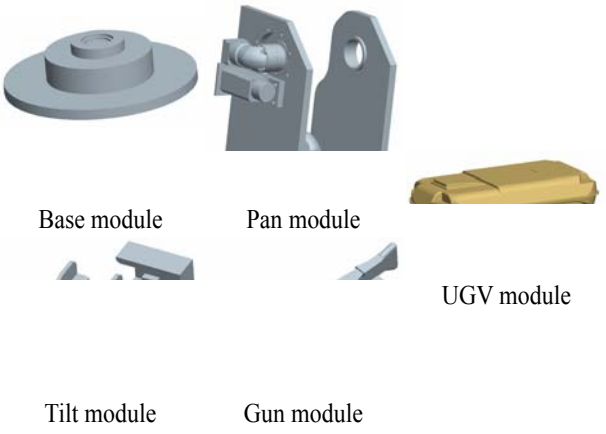

Fig. 4 3D CAD model of each module of mobile surveillance robot

3. 경계로봇의 가상 모델링

3.1 경계로봇의 3D CAD 모델링

경계로봇은 모바일화를 위하여 자이툰 부대에 실전 배치되었던 고정식 이지스 경계로봇을 기본 플랫폼으로 사용하였다.[8]

이지스 경계로봇은 Fig. 3과 같이 기관총, 레이저 리시버, 열화상기, CCD 카메라 등으로 구성된다. 그리고 경계로봇은 팬 운동과 틸트 운동, 그리고 격발 시 충격완화를 위한 복좌 운동의 3축 시스템으로 이루어졌다. 그러나 본 연구에서는 주행 사격시의 안정화보다 초기 목표물 지향시의 안정화에 초점을 맞추었으므로 복좌운동은 배제 하였다.

모바일 경계로봇의 3D CAD 모델을 Pro-Engineer를 이용하여 Fig. 4와 같이 모델링 하였다. 팬 운동과 틸트 운동을 중심으로 모듈화하여 설계되었다. 각각의 모듈은 경계로봇을 구동할 때, 기구학 해석을 통해서 모듈간에 간섭이 발생하지 않도록 설계하였다. 그리고 틸트 모듈과 팬-틸트 모듈(팬 모듈과 틸트 모듈이 결합된 모듈)의 설계에 있어서 모듈의 무게 중심의 위치가 각 틸트 회전축과 팬 회전축 선상에 위치하도록 설계하였다. 이는 구동시에 각 구동 모터에 과도한 토크가 발생하지 않도록 하기 위한 설계이다.

3.2 경계로봇의 동역학 모델링

경계로봇의 동역학 해석 모델은 범용 동역학 해석 프로그램인 ADAMS[9]를 이용하여 설계하였다. 동역학 모델은 4개의 부분으로 구성되었다. 팬 운동과 틸트 운동을 위하여 베이스 모듈과 팬 모듈, 그리고 팬 모듈과 틸트 모듈 사이에는 각각 회전 조인트로 구속이 되어있다. 또한 베이스 모듈과 UGV 모듈 사이에는 고정 조인트로 구속이 되어 있다. 그리고 복좌 운동을 위해서 기관총 모듈과 틸트 모듈 사이에는 병진 조인트로 구속이 되어야 하지만 앞서 기술한 바와 같이 목표물 지향 및 추적시의 안정화 제어에 초점을 맞추었기 때문에 틸트 모듈에 기관총 모듈을 고정시킨 형태로 이루어져있다. 팬 모듈과 틸트 모듈의 구동을 위한 모터의 로터와 팬 모듈 사이에도 각각 회전 조인트로 구속이 되어 있으며, 모터의 로터와 틸트 모듈 및 팬 모듈 사이에는 기어 및 타이밍 벨트를 대신하여 기어비를 고려한 기구학적 구속 요소인 커플러를 이용하여 구속이 되어있다. 그리고 각 모듈의 질량은 형상 설계된 모델에 재질의 정보를 주어 CAD 프로그램에서 측정된 값을 사용하였으며, 기관총 및 틸트 모듈에 내장되는 센서들은 기존의 고정식 경계로봇에 사용되는 센서의 실제 질량 값이 사용되었다. 또한 관성 및 무게 중심들도 CAD 프로그램에서 측정되는 값을 사용하였다.

4. 안정화를 위한 동역학 및 제어 모델

4.1 센서 모델

모바일 경계로봇의 제어를 위해서 IMU(Inertial Measurement Unit)과 GPS 센서를 이용하여 UGV의 운동을 알 필요가 있다. 이는 모바일 경계로봇의 움직임이 UGV의 움직임에 영향을 받기 때문이다. 본 연구에서는 이 IMU 및 GPS 센서 모델을 위해 UGV 가상 모델에 마커를 설정하였고, 이를 통하여 UGV의 위치와 자세를 획득하도록 하였다. 그리고 경계로봇의 기관총이 지향하는 팬 및 틸트 각도도 틸트 모듈에 마커를 설정하고, 마커가 나타내는 각도를 추출하여 센서 데이터를 대신하였다.

4.2 모터 모델

모터는 고정식 이지스에서 사용한 모터를 사용하였다. 모터 모델은 일정한 제어 입력(전압)을 토크로 바꾸어 주는 동역학 요소로서 역학적, 전기적 특성을 고려하여 ADAMS와 Matlab/simulink에서 모델링 되었다. 모터 모델은 식 (1)과 같이 전달함수 형태로 표현할 수 있다. 여기에 사용된 매개변수의 값은 다음과 같다.

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K_m}{(R_a + L_a s)(Js + b) + K_b K_m} \quad (1)$$

K_m : 0.0603 (torque constant)

L_a : 0.00063 H (armature inductance)

R_a : 1.91Ω (armature resistance)

K_b : 0.0603 (back EMF constant)

J : Each axis load (inertia) from ADAMS model

b : No friction (rotor friction)

4.3 목표물 지향을 위한 요구 각 계산

2 축으로 구성된 모바일 경계로봇이 6 자유도로 움직이는 UGV 위에서도 항상 목표물을 안정적으로 조준할 수 있도록 하기 위해 기하학적인 요구조건을 이용하여 목표물 지향 요구 각을 계산할 수 있다. 이 계산에 의해 목표물과 UGV의 위치 및 자세로부터 경계로봇의 기관총이 지향 되어야 될 2 축에 대한 목표각은 다음 식 (2)와 같다.

$$\theta_{pan} = \tan^{-1}\left(\frac{d_y}{d_x}\right)$$
$$\theta_{tilt} = \tan^{-1}\left(\frac{d_z}{d_x \cos\theta_{pan} + d_y \sin\theta_{pan}}\right) \quad (2)$$

여기서 θ_{pan}, θ_{tilt}는 팬과 틸트의 각도이다. d_x, d_y, d_z는 경계로봇의 목표물 지향 벡터 **d**의 x, y, z 좌표를 나타낸다. **d**는 레이저 리시버로부터 얻을 수 있는 기관총으로부터 목표물까지의 거리벡터이다. 식 (2)에서 틸트 각도는 틸트 운동의 범위인 -20°~30°를 벗어나지 않도록 하기 위해 프로그램적으로 -20°와 30°에 각각 제한을 주었다. 따라서 틸트 운동의 요구각이 틸트 운동 범위를 넘을 경우는 한계 각도(-20°와 30°)를 유지하게 된다.

4.4 모바일 경계로봇의 제어기 모델

본 연구에서 모바일 경계로봇의 제어를 위해서는 PIDA(Proportional, Integral, Derivative, Acceleration)제어기가 사용되었다.[6~7] PIDA제어기는 식 (3)과 같이 표현되며, 이 제어기는 PID 제어기에 오차의 1계도함수를 시간에 대해 한 번 더 미분한 값과 가속도 성분 이득인 K_A를 곱한 항을 추가하여 얻은 수식이다. 가속도 성분을 사용하는 것은 속도 성분보다 위상이 90° 앞서므로 제어 시스템의 안정성(stability)이 향상되며, 더욱 큰 K_P, K_I, K_D의 제어 이득 값들을 이용한 보다 좋은 제어 성능을 나타낼 수 있는 장점이 있기 때문이다.[6~7]

$$U_{(t)_{PIDA}} = K_P e(t) + K_I \int e(t)dt + K_D \frac{de(t)}{dt} + K_A \frac{d^2 e(t)}{dt^2} \quad (3)$$

5. 모바일 경계로봇의 가상 시험 시뮬레이션

5.1 UGV 운동 생성 및 적용

모바일 경계로봇의 안정화 모델의 성능을 평가하기 위해서 UGV의 정형화된 험지 주행이 필요하며, 그에 따른 안정화 성능 지표가 필요하다. 하지만 모바일 경계로봇에 대한 안정화 기준이 문헌상에 나타나 있지 않으므로, 미육군의 탱크의 포신 안정화에 사용된 기준을 준용하여 안정화 시뮬레이션을 적용하였다.[10]

안정화 시험을 위한 노면은 Fig. 5와 같은 사다리꼴 형태의 범프가 번갈아 놓여있는 Fig. 6과 같은 노면을 이용하였다.[10] 이때 생성된 도로에서 범프의 위치 및 주기가 좌우 각각 다르게 생성되었기 때문에 주행하는 UGV는 피치, 롤, 히브 운동이 모두 발생한다. UGV의 타이어 모델은 ADAMS에서 제공하는 매직포뮬라 타이어를 모델링하여 사용하였으며, 주행 시뮬레이션에서 UGV의 주행 조건은 8km/h로 주행하도록 설정하였다.

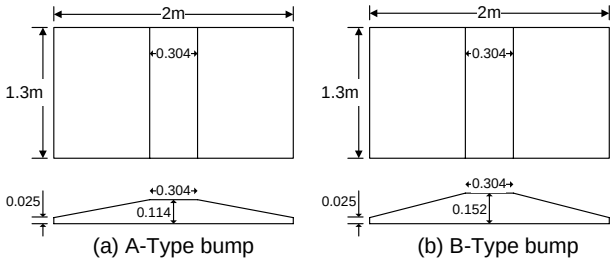

Fig. 5 Type of bump shape

Table 1 Motion range of UGV

UGV speed (km/h)	Pitch (deg)	Roll (deg)	Heave (m)
8	-9.39 ~ +8.70	-7.49 ~ +7.52	-0.01 ~ +0.12

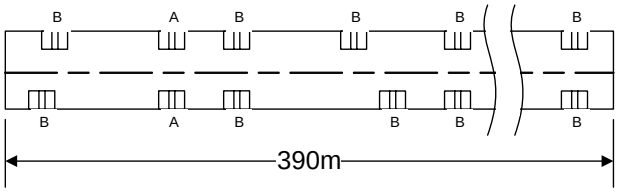

Fig. 6 Bump-road model for stabilization test

Table 1은 UGV의 피치, 롤, 히브 운동의 범위를 나타낸다.

5.2 모바일 경계로봇의 목표물 지향 및 추적 안정화 시뮬레이션

모바일 경계로봇의 목표물 지향 및 추적 안정화 제어 모델은 Fig. 8과 같이 ADAMS와 Matlab 병행 시뮬레이션을 이용하여 이루어졌다. Fig. 7은 병행 시뮬레이션에서 사용될 모바일 경계로봇의 ADAMS 플랜트 모델이다. 병행 시뮬레이션 모델은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 모바일 경계로봇의 ADAMS 플랜트 모델과 요구 각 계산 모델, PIDA 제어기 모델 그리고 모터 모델들로 구성되었다.

미육군의 탱크 포신 안정화 시험을 준용하여 고정 목표물에 대한 시뮬레이션(CASE 1)과 움직이는 목표물에 관한 시뮬레이션(CASE 2)을 수행하였다.[10] 목표물의 위치는 경계로봇으로부터 X, Y, Z 방향으로 각각 600m, 200m, 50m 떨어진 위치를 초기 위치로 설정하였다. 그리고 움직이는 목표물은 초기위치에서 Fig. 7의 –Y 방향으로 8.5m/s로 일정하게 움직이도록 설정하였다. 그리고 PIDA 제어 이득 값은 Table 2와 같이 CASE 1과 CASE 2 시뮬레이션에서 모두 동일한 값을 사용하였다.

Fig. 9 와 Fig. 10 은 고정 목표물 지향 안정화 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 그래프에서 실선은 요구 각 계산으로부터 계산된 경계로봇의 기관총이 지향해야 할 기준 각도이고, 파선은 PIDA 제어를 통하여 기준 각도를 추종하는 팬과 틸트의 각도이다. 그리고 점선은 이 둘의 오차를 나타내는 각도 에러이다. Fig. 9 와 Fig. 10 에서 확인되는 바와 같이 기관총이 기준 위치에서 목표물을 지향

Table 2 PIDA gain of simulation

	P	I	D	A
Pan	300	1.5	4	0.01
Tilt	510	15.5	11.39	0.02

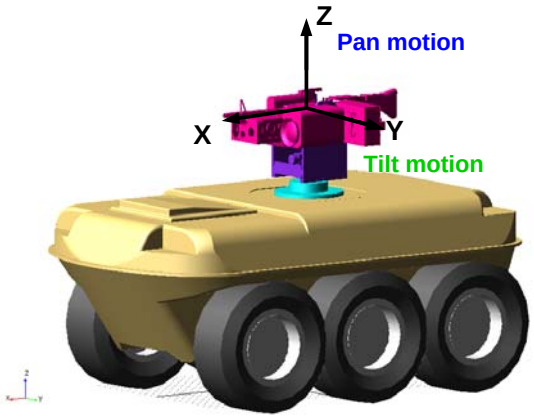

Fig. 7 ADAMS plant model of mobile surveillance robot for control simulation

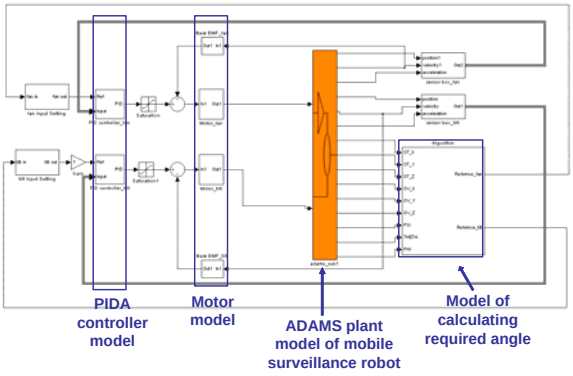

Fig. 8 Co-simulation model of mobile surveillance robot

하는 동안에는 각도 에러의 크기가 큰 것을 확인할 수 있지만, 지향을 하고부터 추적하는 동안에는 각도 에러의 값은 팬 조인트의 경우 0.11°, 틸트 조인트의 경우 0.75°이내의 오차 범위에 머무르는 것을 알 수 있다. 따라서 안정화 알고리즘이 효율적으로 작동되고 있는 것을 확인 할 수 있었다.

CASE 2의 안정화 시뮬레이션 결과는 Fig. 11과 Fig. 12에서 보는 바와 같다. 목표물의 움직임과 UGV의 움직임이 복합적으로 작용하여 모바일 경

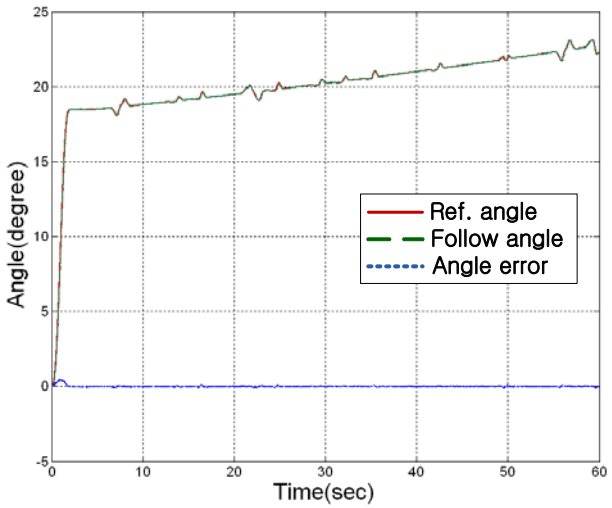

Fig. 9 Pan angle in CASE 1

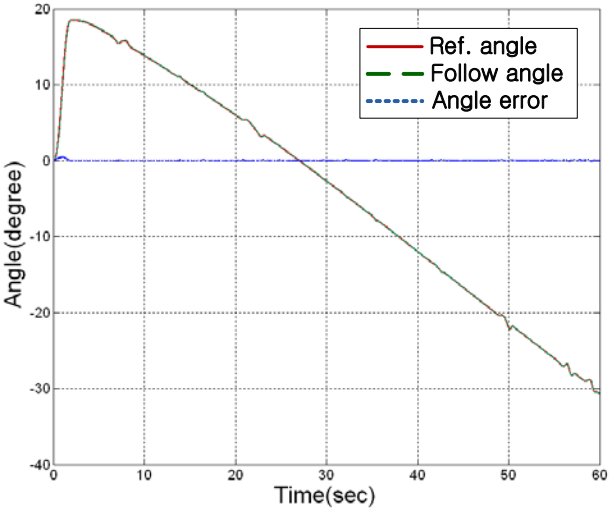

Fig. 11 Pan angle in CASE 2

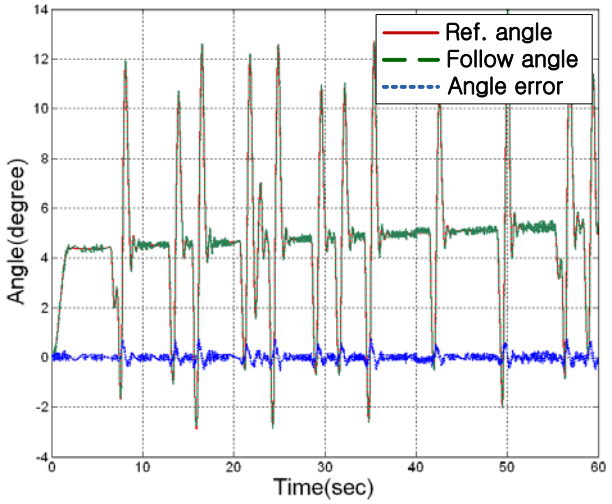

Fig. 10 Tile angle in CASE 1

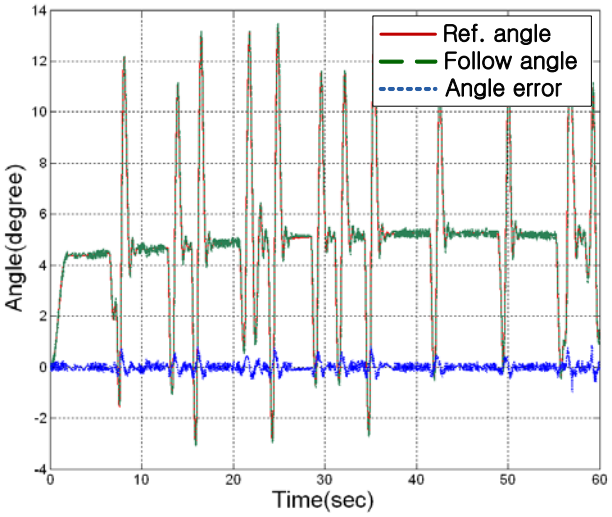

Fig. 12 Tilt angle in CASE 2

계로봇의 기관총이 지향해야 할 각도의 범위가 커지는 것을 확인할 수 있다. 각도 오차는 CASE 1의 시뮬레이션과 마찬가지로 범프를 만나는 위치에서 최대 0.75°이내의 오차결과를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 시뮬레이션 기반 설계 프로세스와 가상 시험 시뮬레이션을 제안하여 모바일 경계로봇의 설계에 대한 연구를 수행하였다. 고정 및 이동 목표물에 대한 가상 시험 시뮬레이션을 통하여 모바일 경계로봇의 UGV 가 움직일 시에도 기관총이 항상 목표물을 0.75°내에서 지향하고 안정적으로 추종하는 것을 확인하였다. 이로써 기구학적 요구조건을 이용한 지향 각 계산 및 안정와 제어 로직의 효율성을 검증하였다. 추후 연구로는 안정화 성능 평가를 위한 기준 확립에 관련된 연구가 수행되어야 한다.

후 기

본 연구는 중소기업청 산학공동기술개발 컨소시엄사업(산학 2007-08-07)의 지원으로 ㈜도담시스템스와 함께 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Ji Sung Kim, Jae Won Lee, Youn Kyun Shin, Wan Yeon Lee, 2005, "Implementation of the Manless

Security System Using a Wireless Exploring Unit," *Proceedings of Korea Computer Congress 2005 conference of The Korean Institute of Information Scientists and Engineers*, pp. 736 ~ 738.
(2) Woon-Yong Koh, 2002, "Stabilization and Tracking Algorithms of a Shipboard Satellite Antenna System," *Journal of Control, Automation and Systems Engineers*, Vol. 8, No. 1, pp. 67 ~ 73.
(3) Gil-Sang Ryu, 2004, "Development of Signal Processing and Control Algorithm for Satelite Antenna for Marine Use," *Chungnam National University M.S. Thesis*, pp. 4 ~ 36.
(4) Joong-Soon Lim, Joon Lyou, 1987, "A Control Scheme for Stabilizing a Two-Axes Antenna System," *Proceedings of The Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol. 1, pp. 209 ~ 212.
(5) Daewoon Kim, Soonyong Cheon, 2007, "Identification and Control of Command Panoramic Sight System," *Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol. 44, No. 3, pp. 14 ~ 21
(6) Mooncheol Won, Sung-Soo Kim, 2005, "Design and Control of a Marine Satellite Antenna," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19 No. 1, pp. 473 ~ 480.
(7) Hyun-il Kim, Sung-Soo Kim, Mooncheol Won, Jin Sup Yun 2006, "Experimental Validation for the Multibody Dynamics and Control Model of 3-axis Marine Satellite Antenna," *Proceedings of The Korean Society of Mechanical Engineers 2006 fall Annual Meeting*, pp. 796 ~ 801.
(8) Dodaam Systems Inc., 2007, aEgis Manual.
(9) MSCsoftware Inc., 2005, ADAMS 2005 manual.
(10) US Army, 1983, US Army Test and Evaluation Command Test Operation Procedure(Gun Stabilization System), Report No. TOP 3-2-602, US Army Aberdeen Proving Ground.