

## 기동형 경계로봇 안정화 시스템의 실험적 검증<sup>§</sup>

김성수<sup>\*†</sup>, 이동염<sup>\*\*</sup>, 권정주<sup>\*\*\*</sup>, 박성호<sup>\*\*\*\*</sup>

\* 충남대학교 메카트로닉스공학과, \*\* 충남대학교 기계·기계설계·메카트로닉스공학과 대학원, \*\*\* 한국원자력연구원, \*\*\*\* ㈜도담 시스템즈

### Experimental Verification of Effectiveness of Stabilization Control System for Mobile Surveillance Robot

Sung-Soo Kim<sup>\*†</sup>, Dong Youm Lee<sup>\*\*</sup>, Jeong Joo Kwon<sup>\*\*\*</sup> and Sung Ho Park<sup>\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,

<sup>\*\*</sup> Graduate School of Mechanical·Mechanical Design·Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,

<sup>\*\*\*</sup> Korea Atomic Energy Research Institute, <sup>\*\*\*\*</sup> Dodaam Systems

(Received June 18, 2010 ; Revised February 2, 2011 ; Accepted February 7, 2011)

**Key Words** : Mobile Surveillance Robot(기동형 경계로봇), Stabilization Control(안정화 제어), Experimental Verification(실험적 검증)

**초록:** 기동형 경계 로봇은 공항이나 항구 등의 공공 지역을 보호하기 위한 기동형 차량 시스템에 고정되어 있는 경계 로봇을 말한다. 이러한 기동형 경계 로봇은 사격 시스템, 카메라 시스템, 임베디드 시스템 그리고 AHRS 센서로 구성되어 있다. 또한 고각과 방위각을 위한 2 축 제어가 가능하도록 설계되었다. 안정화된 영상과 사격을 위해 이 시스템은 차량의 모션으로부터 발생하는 외란에 대한 보상을 통해 안정화가 되어야 한다. 본 논문에서는 ADAMS 와 Matlab/Simulink 를 이용해서 기동형 경계로봇의 가상 모델을 생성하고 제안한 안정화 알고리즘을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 또한 가상 모델에 상응하는 모형의 기동형 경계 로봇과 6 축 모션 시뮬레이터를 이용하여 안정화 알고리즘을 실험적으로 검증하였다.

**Abstract:** A mobile surveillance robot is defined as a surveillance robot system that is mounted on a mobile platform and is used to protect public areas such as airports or harbors from invaders. The mobile surveillance robot that is mounted on a mobile platform consists of a gun module, a camera system module, an embedded control system, and AHRS (Attitude and Heading Reference System). It has two axis control systems for controlling its elevation and azimuth. In order to obtain stable images for targeting invaders, this system requires a stabilizer to compensate any disturbance due to vehicle motion. In this study, a virtual model of a mobile surveillance robot has been created and ADAMS/Matlab simulations have been performed to verify the suitability of the proposed stabilization algorithm. Further, the suitability of the stabilization algorithm has also been verified using a mock-up of the mobile surveillance robot and a 6-DOF (Degree Of Freedom) motion simulator.

## 1. 서 론

고정식 경계 로봇은 CCD 카메라, 기관포, 레이저 거리센서, 야간 카메라 등으로 구성된 시스템으로 공공 시설과 장소에 설치되어 지역의 일부를 지속적으로 감시 경계 할 수 있는 장치이다. 현재

이러한 고정식 경계 로봇은 주요 군 시설이나 국경선의 감시 임무를 수행하는데 있어 시범적으로 도입이 추진되고 있다.

이러한 고정형 타입의 경계로봇은 일정 지역을 반복적으로 감시하면서 경계를 할 수 있는 장점이 있지만 경계 사각지대를 갖는다는 약점이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 차량에 장착되어 고정형태에서 수행하지 못했던 건물, 나무 후면과 같은 은폐지역의 경계임무를 수행 할 수 있도록 하는 경계로봇의 형태가 바로 기동형 경계로봇이다. 차량에 장착되는 기동형 경계로봇의 경계임무를

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계 학술대회 (2010. 6. 3.-4., 광주과학기술원) 발표논문임.

† Corresponding Author, sookim@cnu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

효과적으로 수행하기 위해서는 카메라 시스템이나 사격 통제 시스템이 차량의 흔들림에도 안정적으로 작동하기 위한 안정화 시스템 구축이 필요하다.

기동형 경계 로봇에 관한 선행 연구는 가상 환경에서의 UGV 개발과 기동형 경계로봇의 시뮬레이션 기반 설계 연구가 수행되었고,<sup>(1)</sup> Fig. 1 과 같이 기동형 경계로봇을 실내 환경에서 시험할 수 있도록 하는 6축 시뮬레이터 가상 설계 연구<sup>(2)</sup>와 6축 모션 시뮬레이터의 제작 및 차량 모션인가 구동 제어에 대한 연구<sup>(3)</sup>가 진행 되었다.

위와 같이 가상환경상에서의 기동형 경계 로봇의 안정화 실험은 수행 되었지만 실험장치를 통한 안정화 알고리즘 검증은 수행되지 않았다. 본 논문은 실험실 환경에서 기동형 경계 로봇을 구축하고 6축 모션 시뮬레이터에 장착하며 제안한 안정화 알고리즘을 검증하는데 그 목적이 있다.

본 논문에서는 기동형 경계로봇의 안정화 시험을 위하여 먼저 모션 시뮬레이터와 기동형 경계로봇이 결합된 가상모델을 이용하여 안정화 알고리즘을 시뮬레이션을 통하여 검증한 후 이를 근거로 실제 제작된 실험 장치를 이용하여 안정화 알고리즘을 검증하였다.

## 2. 실험용 기동형 경계로봇 설계 및 제작

개발 업체에서 보유하고 있는 경계로봇 시스템은 Fig. 2 와 같다. 이 경계로봇의 구동 가능 범위는 팬 모듈의 경우,  $-180^{\circ} \sim +180^{\circ}$  이며, 틸트 모듈의 경우,  $-20^{\circ} \sim +30^{\circ}$  이다.

본 연구에서는 실험실에서 경계로봇 안정화 실험을 위해서 먼저 개발업체가 보유하고 있는 aEgis2 모델과 동역학적인 등가의 모델을 제작하여 안정화 실험을 위한 모델을 생성<sup>(4)</sup>하였다.

실험용 기동형 경계로봇의 3D CAD 모델은 Pro-Engineer 를 이용하여 생성하였다. 이는 팬축과 틸트축, 두 회전축으로 구성되어 있고 구동에

필요한 토크를 최소화시키기 위해 무게중심을 회전축 상에 존재하도록 하였다. 구동 범위는 실제 로봇과 동일하게 하였고 이를 확인하기 위해 CAD 모델을 이용하여 간섭 및 구동 범위를 확인을 수행하였고, 무게중심의 위치에 대한 확인도 수행하였다. 이렇게 구성된 가상모델은 Fig. 3 과 같다.

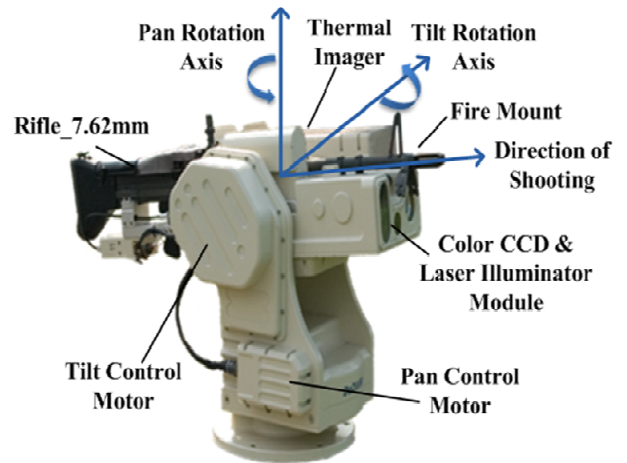


Fig. 2 aEgis 2 surveillance robot (Dodaam systems, Korea)

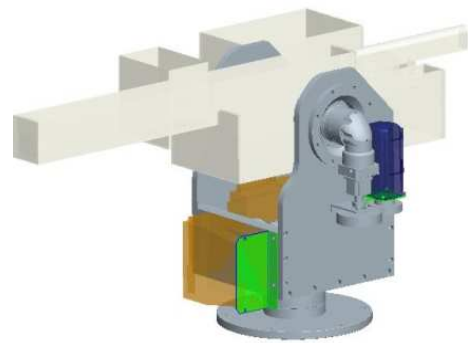


Fig. 3 Virtual mock-up model of aEgis 2



Fig. 1 Indoor test concept of mobile surveillance robot



Fig. 4 Mock-up model of aEgis 2

**Table 1** The component specification of OEMAX AC servo motor

		Tilt motor	Pan motor
		CSMT-04B	CSMT-08B
정격 전압	V	220	220
정격 출력	W	400	750
정격 토크	N-m	1.27	2.39
순시 최대 토크	N-m	3.82	7.16
정격 회전 속도	rpm	3000	3000
최대 회전 속도	rpm	5000	5000
정격 전류	A	3.3	5.0

앞서 개발한 3D CAD 모델을 이용하여 제작한 경계로봇의 하드웨어 시스템은 Fig. 4 와 같다. 크게 3 가지의 모듈 즉, 팬 모듈과 틸트 모듈, 컨트롤러 모듈로 나뉜다.

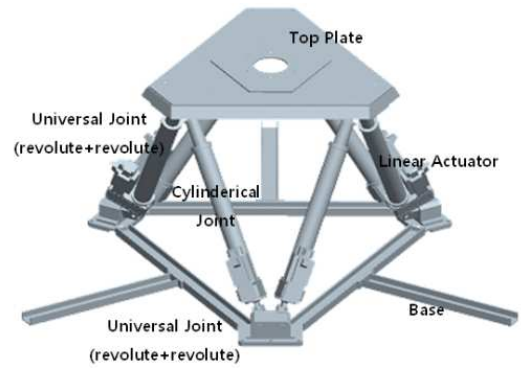
경계로봇의 구동기 모듈은 모터부와 기어 또는 풀리 및 타이밍 벨트로 이루어진 동력 전달부로 구성이 되어 있다. 본 논문에서 사용된 모터는 틸트 모터는 OEMAX 사의 CSMT-04B 모터이며, 팬 모터는 동일회사의 CSMT-08B 이다. 두 모터 모두 AC servo 모터이며 모터의 사양은 Table 1 에 나타나 있다.

감속기는 APEX dynamics 사의 베벨 타입 기어 박스와 타이밍 벨트(timing belt)를 사용하였다. 기어박스의 감속비는 팬 모터의 경우 20:1 의 감속비를 가지고 있으며, 틸트 모터의 경우 150:1 의 감속비를 가지고 있다. 타이밍 벨트의 경우에는 두 축 모두 2:1 의 감속비를 가지고 있다.

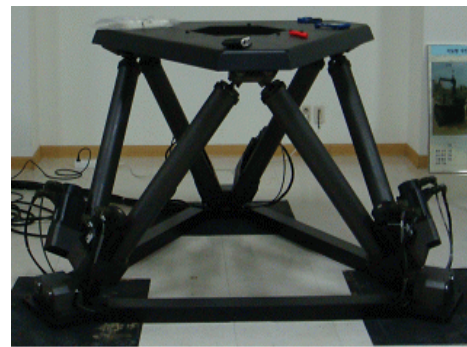
### 3. 실험을 위한 모션 시뮬레이터 설계 및 제작

#### 3.1 모션 시뮬레이터의 가상설계

모션 시뮬레이터는 상판의 모션이 6 축 모션을 생성할 수 있도록 스투어트 플랫폼(Stewart platform)형태<sup>6)</sup>로 설계하였다. Fig. 5 는 6 축 모션 시뮬레이터의 3D CAD 를 이용한 가상 모델을 나타내고 있다. 각각의 파트를 연결해주는 구속 조건에는 우선 하판과 핀, 상판과 핀을 구속해 주는 회전조인트가 총 12 개, 각 축을 구동하기 위한 모터와 풀리의 회전조인트 6 개, 볼-스크류의 회전조인트 6 개와 내부 실린더의 실린더 조인트 6 개가 사용되었다.



**Fig. 5** Virtual model of Stewart platform type motion simulator



**Fig. 6** Motion simulator hardware

그리고 구동력을 전달해 주기 위한 타이밍 벨트와 볼-스크류의 회전 조인트와 내부 실린더의 실린더 조인트의 관계를 커플러를 이용한 구속으로 설정하여 총 12 개의 커플러가 사용되었다. 이와 같이 설계된 모션 시뮬레이터의 최종 시스템 자유도는 6 이다. 이러한 가상모델을 이용해서 상판 모션이 인가되었을 때 필요한 모터의 요구 각도를 계산하는 역기구학 알고리즘을 개발 실험 하였다.<sup>3)</sup>

#### 3.2 모션 시뮬레이터 제작

앞서 설명한 가상 설계를 근거로 하여 Fig. 6 과 같이 모션 시뮬레이터가 제작되었다. 모션 시뮬레이터는 6 개의 액추에이터와 상판과 베이스, 그리고 상판과 액추에이터와 베이스를 연결해주는 조인트 브라켓으로 구성되어 있다. 모션 시뮬레이터를 구동 및 제어해주는 컨트롤러는 윈도우(window)기반 PC 이며, 자세한 사양은 Table 2 에 명시되어 있다.

상기 모션 시뮬레이터의 주어진 차량 모션에 대한 시뮬레이터 제어에 관한 연구는 참고문헌<sup>3)</sup> 을 통하여 수행되었으므로 본 논문에서는 지면 관계상 기술을 생략한다.

**Table 2** The component specification of the motion simulator

Item	Classification	EA	Spec.
Motion Simulator	Actuator	6	Servo Motor(RSMH-15BR1ABK3)
	Upper Plate	1	Steel
	Upper Joint Bracket	3	Steel
	Lower Joint Bracket	3	Steel
Control Cabinet	PC	1	P-4, 1G 이상 Motion controller(MMC-BDPV82PNA)
	Motion IO Card	2	MMC-MI10
	Servo Drive	6	CSD3-15BX2
Cables		6	
S/W	OS	1	Windows XP
	Development environment	1	Visual C++ MFC

4. 가상모델을 이용한 기동형 경계로봇의 안정화 제어 시뮬레이션

4.1 가상모델의 안정화 제어 알고리즘

2 장과 3 장에서 설명한 실제 제작된 기동형 경계로봇과 모션 시뮬레이터를 이용하여 안정화 알고리즘을 검증하기 이전에 Fig. 7 과 같은 결합된 가상 모델을 생성하여 안정화 알고리즘을 시험하였다.

안정화 알고리즘을 Fig. 8 과 같이 차량의 병진 운동  $r_v$  와 차량의 롤, 피치, 요 각도로 기술되는 좌표 변환 행렬  $A_v$  가 주어졌을 때 경계 로봇의 기관총 또는 카메라가 목표점을 지향하도록 하는 기동형 경계로봇의 팬각( $\theta_{pan}$ ) ( $Z_g$  축회전)과 틸트각( $\theta_{tilt}$ ) ( $Y_g$  축회전)을 구하는 것이다.

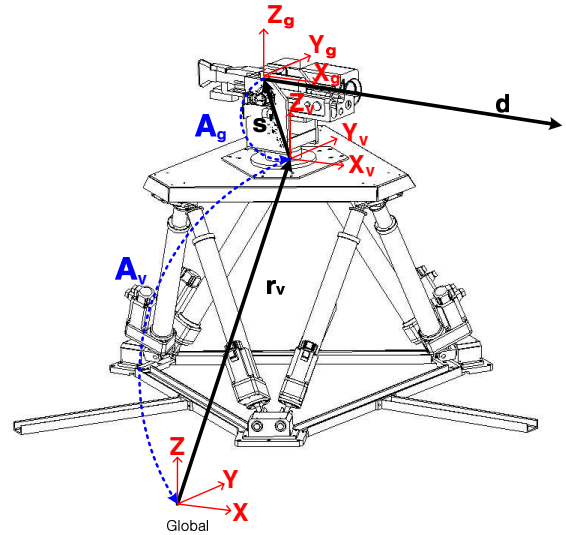
Gun 모듈의 물체 기준좌표 ( $X_g-Y_g-Z_g$ )로부터 상판 ( $X_v-Y_v-Z_v$ )까지의 좌표 변환 행렬  $A_g$  ( $\theta_{pan}, \theta_{tilt}$  의 함수)를 이용하고  $X_g-Y_g-Z_g$  의 원점으로부터 목표점까지의 위치벡터인 목표지향 벡터  $d$  가  $X_g$  축과 항상 평행 하다는 구속 조건식을 풀면 외란에 대해서 항상 목표를 지향하는 팬각( $\theta_{pan}$ ) 과 틸트각( $\theta_{tilt}$ )은 식 (1)과 식 (2)와 같이 얻을 수 있다.

$$\theta_{pan} = \tan^{-1}\left(\frac{k_y}{k_x}\right) \tag{1}$$

$$\theta_{tilt} = \tan^{-1}\left(-\frac{k_z}{k_x \cos \theta_{pan} + k_y \sin \theta_{pan}}\right) \tag{2}$$



**Fig. 7** Virtual model of the mobile surveillance robot and the motion simulator



**Fig. 8** Vector and matrix definition for stabilization control algorithm

여기서  $k_x, k_y, k_z$  는 차량의  $\varphi_{roll}, \varphi_{pitch}, \varphi_{yaw}$  함수로 표시되는 벡터의 요소로서 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} k_x &= d_x \cos \varphi_{pitch} \cos \varphi_{yaw} + d_y \cos \varphi_{roll} \sin \varphi_{yaw} \\ &\quad + d_y \sin \varphi_{roll} \sin \varphi_{pitch} \cos \varphi_{yaw} \\ &\quad + d_z \sin \varphi_{roll} \sin \varphi_{yaw} \\ &\quad - d_z \cos \varphi_{roll} \sin \varphi_{pitch} \cos \varphi_{yaw} \\ k_y &= -d_x \cos \varphi_{pitch} \sin \varphi_{yaw} + d_y \cos \varphi_{roll} \sin \varphi_{yaw} \\ &\quad - d_y \sin \varphi_{roll} \sin \varphi_{pitch} \cos \varphi_{yaw} \\ &\quad + d_z \sin \varphi_{roll} \cos \varphi_{yaw} \\ &\quad + d_z \cos \varphi_{roll} \sin \varphi_{pitch} \cos \varphi_{yaw} \\ k_z &= d_x \sin \varphi_{pitch} - d_y \sin \varphi_{roll} \cos \varphi_{pitch} \\ &\quad + d_z \cos \varphi_{roll} \cos \varphi_{pitch} \end{aligned} \tag{3}$$

또한 식 (3)의  $d_x, d_y, d_z$  는 앞서 기술한 목표지향 벡터의 x, y, z, 성분으로 목표물 좌표가 정해지면 결정되는 단위 벡터이다.

4.2 가상모델의 안정화 제어 시뮬레이션

안정화 제어를 위한 기동형 경계로봇의 팬, 틸트 모션 제어기와 모션 시뮬레이터 제어기는 모두 PID 제어기를 사용하였다.

Fig. 9 는 기동형 경계로봇의 안정화를 위한 블록 다이어그램을 나타내고 있다.

차량 모션이 기동형 경계 로봇의 기저부에 장착된 AHRS 센서로부터 측정되면 차량의 롤, 피치, 요 값에 의해서 안정화 알고리즘 식 (1), (2)로부터 요구되는 모터의 각도를 구하고 그에 따라서 PID 제어기를 통하여 모터를 구동하게 된다.

Fig. 10 은 가상 모델의 시뮬레이션을 위한 ADAMS/Matlab Co-simulation 구성도를 나타내고 있다. 경계로봇과 모션 시뮬레이터의 가상모델은 ADAMS 로 구현되었고 경계로봇과 모션 시뮬레이터의 제어기, 모터 모델, 역기구학 알고리즘, 안정화 및 목표추적 알고리즘 등은 모두 Matlab/Simulink 로 구현되었다.

안정화 알고리즘을 시뮬레이션으로 검증하기 위해  $d$  벡터가 수평을 유지하도록 (1,0,0)의 값을

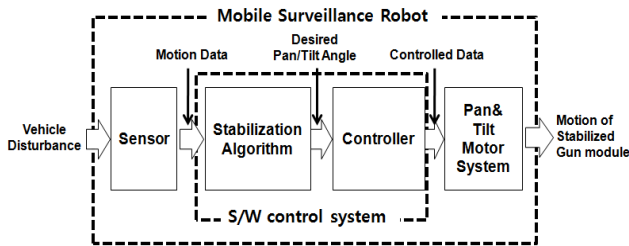


Fig. 9 Block diagram for mobile surveillance robot control

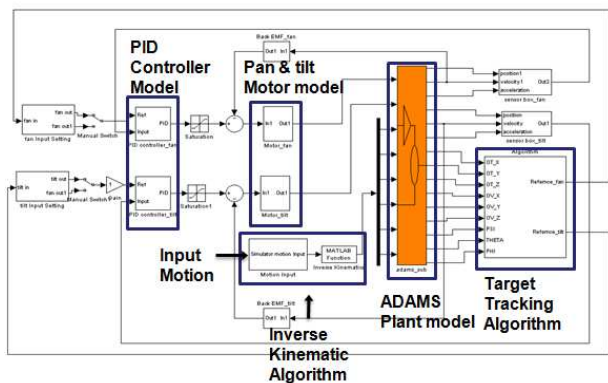


Fig. 10 Co-simulation model of mobile surveillance robot for virtual test

주고, 진폭 5°, 주기 0.5 Hz 사인과 형태의 모션을 모션 시뮬레이터에 인가하였을 때 안정화 알고리즘의 결과를 확인해 보았다. Fig. 11 과 Fig. 12 는 각각 팬 모듈과 틸트 모듈의 결과 값을 나타낸다. 여기서 **command angle** 은 안정화 알고리즘을 통하여 계산된 요구 각도이고 **response angle** 은 제어 시뮬레이션을 통하여 얻는 값이다.

경계로봇의 기저부가 사인파의 형태로 움직일 때, 그에 상응하여, Fig. 12 에서와 같이 틸트축이 마이너스 사인파로 움직여, Gun 모듈을 수평으로 유지하도록 하는 것을 알 수 있다. 팬축의 경우 최대 0.006°, 틸트축의 경우 최대 0.18°의 오차가 발생하였다. 따라서, 기본적으로 알고리즘이 잘 작동함을 알 수 있었다.

5. 기동형 경계로봇의 안정화 실험

5.1 기동형 경계로봇 실험 장치 구성

4 장의 가상모델과 동일한 형태로 경계로봇과

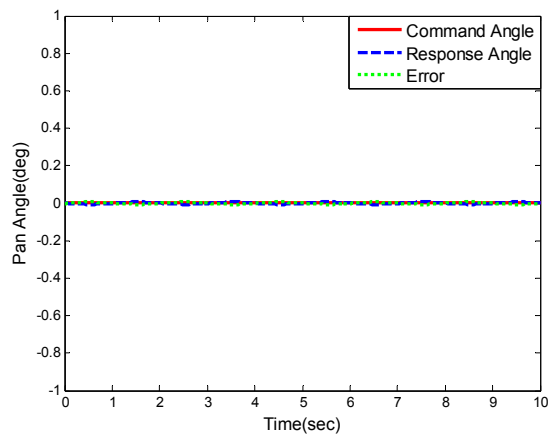


Fig. 11 Pan motion response of stabilization control in virtual test

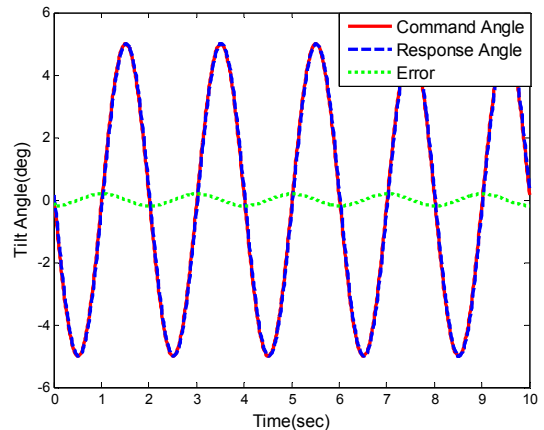


Fig. 12 Tilt motion response of stabilization control in virtual test



Fig. 13 Mobile surveillance robot test environment

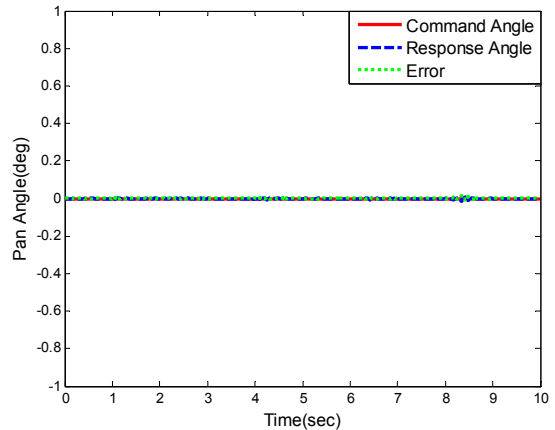


Fig. 15 Pan motion control result for stabilization

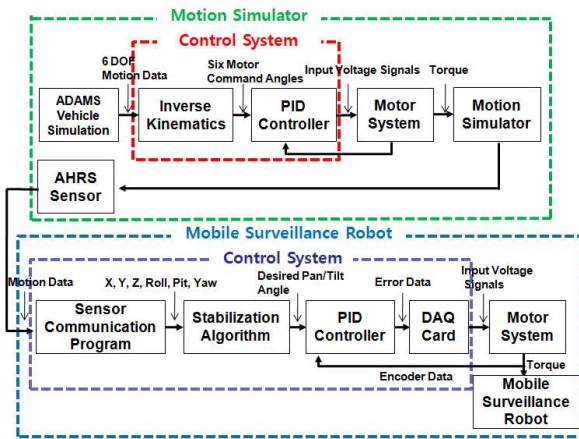


Fig. 14 The system configuration of mobile surveillance robot

시뮬레이터를 결합하여 실험장치를 Fig. 13 과 같이 구성하였다.

차량 모션을 재현하는 시뮬레이터의 모션은 Crossbow 사의 NAV440CA AHRS(Attitude and Heading Reference System)센서를 이용하여 측정하고 결과를 경계로봇 제어 PC 에 전달하여 제어 PC 내부에 있는 안정화 제어 알고리즘을 통해 경계로봇 팬, 틸트 모터의 요구 회전각을 구하고 이를 경계로봇 팬, 틸트 모터에 전달하여 경계로봇의 안정화 제어를 구현하였다. 이러한 데이터 흐름도는 Fig. 14 와 같다.

### 5.2 실험장치를 이용한 안정화 실험

안정화 알고리즘의 실험적 검증을 위하여 가상 시뮬레이션과 동일하게 모션 시뮬레이터에 진폭 5°, 주기 0.5Hz 사인파 형태의 모션을 인가 하였다. 안정화 알고리즘 실험 결과는 Fig. 15 와 Fig. 16 에 나타나 있다. 팬축의 경우 최대 0.015°, 틸트축의 경우 최대 0.5°의 오차가 발생하였다. 가상 시뮬레

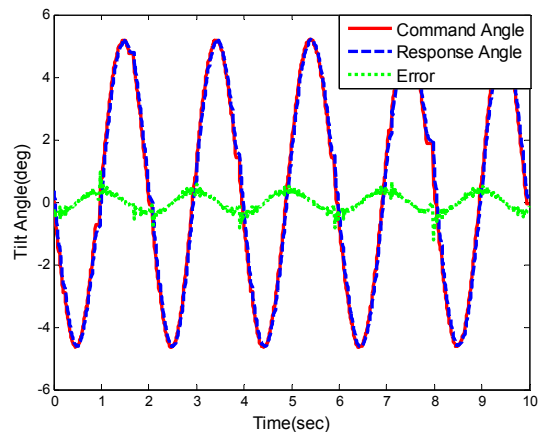


Fig. 16 Tilt motion control result for stabilization

이션의 경우 보다 오차가 크지만, 0.5°오차 범위에서 전체적으로 안정화 제어가 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 논문에서는 기동형 경계로봇의 안정화를 위하여, 다물체 동역학 이론에 기반한 안정화 알고리즘을 제안하였고, 기동형 경계로봇과 모션 시뮬레이터의 가상 모델과 실제 경계로봇의 하드웨어 등가 모델과 6 축 모션 시뮬레이터를 이용하여, 안정화 알고리즘의 타당성을 검증 하였다. Gun 모듈이 수평을 유지할 수 있도록 틸트각이 생성되는 것을 알 수 있었다. 안정화 성능에 대하여는 0.5Hz 의 외란에 대해서 최대 0.5 도의 오차를 갖는 것을 알 수 있었다. 이로서, 저속 주행의 경계로봇의 안정화에 적합함을 알 수 있었고, 보다 빠른 외란에 대한 안정화 제어에 대해서는 추후 PID 제어와 차별되는 고급 제어를 시도해 볼 필요가 있다.

## 후 기

이 논문은 2008 년도 충남대학교 학술사업 (2008-2231)과 한국 산업 기술 평가 관리원 지역 산업 기술 개발 사업(7004253-2009-02)에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- (1) Hwang, K. S., Kim, D. H., Park, G. J., Kim, S. S. and Park, S. H., 2008, "Simulation Based Design of Intelligent Surveillance Robot for Mobility," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 32, No. 4, pp. 340~346.
- (2) Kim, D. H., Park, S. H., Diana, W. and Kim, S. S., 2008, "Development of a Motion Simulator for Testing a Mobile Surveillance Robot," *Proceedings of 4<sup>th</sup> ACMD 2008*.
- (3) Kim, S. S., Kwon, J. J., Park, S. H. and Park, S. W., 2009, "Dynamics and Control Simulation Based Design for a Hexapod Robot," *Proceedings of the ASME IDETC 2009*.
- (4) Kwon, J. J., 2010, *Virtual Design and Testing a Stabilization System of mobile Surveillance Robot using Motion Simulator*, Chungnam National University M.S. Thesis.
- (5) Stewart, D., 1965, "A Platform with Six Degrees of Freedom," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 180, No. 5, pp. 371~386.