

가상 시뮬레이션을 이용한 기동형 경계 로봇의 영상 기반 목표추적 알고리즘 검증[§]

이동엽* · 서봉철* · 김성수**† · 박성호***

*충남대학교 기계·기계설계·메카트로닉스공학과, **충남대학교 메카트로닉스공학과, ***㈜도담시스템스

Verification of Camera-Image-Based Target-Tracking Algorithm for Mobile Surveillance Robot Using Virtual Simulation

Dong-Youm Lee*, Bong-Cheol Seo*, Sung-Soo Kim**† and Sung Ho Park***

* Graduate School of Mechanical·Mechanical Design·Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,

** Dept of Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ., *** Dodaam Systems

(Received July 23, 2012 ; Revised July 27, 2012 ; Accepted August 3, 2012)

Key Words: Target-Tracking Control(목표추적 제어), Stabilization Control(안정화 제어), Mobile Surveillance Robot(기동형 경계 로봇)

초록: 본 논문은 3 축 영상 장치를 기존의 2 축 경계 로봇에 적용하는 설계안을 제시하고 이러한 기동형 경계 로봇의 영상 정보를 이용한 목표 추적 알고리즘을 제안하였다. 또한 가상 시뮬레이션을 이용하여 목표 추적 알고리즘을 검증하였다. 목표추적 알고리즘에서는 카메라 영상의 중심과 카메라 영상으로 포착된 목표물 중심 사이의 위치 에러를 이용하여 영상 장치의 목표 지향 벡터를 획득하고, 역기구학을 이용하여 획득한 목표 지향 벡터를 생성해 낼 수 있는 기동형 경계 로봇의 팬, 틸트 회전 요구 각도와 카메라 영상의 안정화를 위한 롤 회전 요구각도를 계산하였다. MATLAB 과 ADAMS 를 이용하여 기동형 경계 로봇의 가상 모델을 생성하고, 가상의 목표물의 움직임에 대한 가상 모델의 운동을 확인하여 영상 기반의 목표 추적 알고리즘을 검증하였다.

Abstract: In this study, a 3-axis camera system design is proposed for application to an existing 2-axis surveillance robot. A camera-image-based target-tracking algorithm for this robot has also been proposed. The algorithm has been validated using a virtual simulation. In the algorithm, the heading direction vector of the camera system in the mobile surveillance robot is obtained by the position error between the center of the view finder and the center of the object in the camera image. By using the heading direction vector of the camera system, the desired pan and tilt angles for target-tracking and the desired roll angle for the stabilization of the camera image are obtained through inverse kinematics. The algorithm has been validated using a virtual simulation model based on MATLAB and ADAMS by checking the corresponding movement of the robot to the target motion and the virtual image error of the view finder.

1. 서론

기동형 경계 로봇은 차량 및 선박 등에 장착되어 경계 감시 임무를 수행하는 로봇으로서, 오늘날 세계 여러 나라에서 많은 관심을 갖고 연구를 수행하고 있다. 그 대표적인 예로써 이스라엘의

RCWS(Remote Control Weapon System), 노르웨이의 Protector M151, 한국의 Super aEgis 2 등이 있다. 이러한 기동형 경계 로봇의 효율적인 경계 감시 임무를 수행하기 위해 차량 및 선박의 외란에 대한 안정화와 이동 목표물에 대한 목표 추적 시스템이 필요하다.

국외의 안정화와 목표 추적 시스템에 관련된 연구는 경계 로봇 보다는 대부분 항공기에서 사용하는 EOTS(Electro-Optical Targeting System)⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾와 관련하여 진행되었고, 2 축 짐벌 시스템을 이용한 목표 추적 기능을 제시하였다.

§ 이 논문은 2012 년도 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계학술대회(2012. 4. 11.-13., 제주 KAL 호텔) 발표논문임.

† Corresponding Author, sookim@cnu.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

반면, 국내의 연구로는 2 축 기동형 경계 로봇 시스템에 관련한 연구가 수행되었다. (4-6) 2 축 기동형 경계 로봇은 롤 축에 대한 자유도가 없기 때문에 차량 및 선박의 롤 외란에 대한 영상의 안정화가 기구적으로 불가능하다. 그러나 무인차량에 탑재되는 기동형 경계 로봇은 카메라 영상을 보면서 원격으로 조이스틱을 이용하여 기동형 경계 로봇을 조종하여, 목표물을 선택(lock-on)해야 하기 때문에 안정된 영상 획득이 필요하다. 따라서, 카메라 영상의 안정화를 위한 롤 축의 안정화가 필수적이며, 이에 상응하는 3 축 안정화 및 목표 추적 알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 안정된 영상을 획득할 수 있도록 3 축(요, 피치, 롤)의 영상 안정화 시스템을 기존 2 축 경계로봇에 적용하고, 이에 상응하는 3 축 안정화 및 영상기반 목표추적 알고리즘을 제시 하였다. 또한, 기동형 경계 로봇의 실제 하드웨어 제작 및 실험에 앞서 다양한 상황에 대한 가상 시뮬레이션을 통해 제안한 3 축 영상기반 목표 추적 알고리즘을 효율적으로 검증하는데 논문의 목적이 있다.

본 연구에서 제안한 3 축 영상 장치를 이용한 목표 추적 알고리즘은 이동 차량에 부착된 기동형 경계 로봇의 안정화와 이동 목표물에 대한 목표 추적을 모두 구현할 수 있다.

2. 3 축 영상 장치를 포함한 기동형 경계 로봇

Fig. 1 은 기관총과 CCD 카메라, LRF(Lazer Range Finder)로 구성된 도담 시스템의 aEgis 2 경계 로봇을 나타낸다. aEgis 2 는 팬, 틸트의 2 축 구동 모델이며, 구동 가능 범위는 팬 모듈의 경우 $-180^{\circ} \sim +180^{\circ}$, 틸트 모듈의 경우 $-20^{\circ} \sim +30^{\circ}$ 이다.

본 연구에서는 실험실에서 기동형 경계 로봇의 안정화 실험을 위해 Fig. 2 와 같은 aEgis 2 모델의 동역학적 등가 가상 모델을 생성(4)하였다. 기동형 경계로봇은 서론에서 기술한 바와 같이 차량의 외란에 대해서도 안정적인 영상을 획득해야 하므로, 롤 운동을 보상할 수 있도록 3 축의 영상장치가 필요하다.

따라서 Fig. 3 과 같은 팬, 틸트, 롤의 3 축 기동형 경계 로봇의 가상 모델을 개발하였다. 롤 모듈 설계 시 롤 회전 축이 틸트 회전 축 선상에 위치하도록 설계 하였으며, 구동에 필요한 토크를 최소화시키기 위해 각 모듈의 무게 중심을 각 모듈의 회전 축 선상에 위치하도록 설계 하였다.

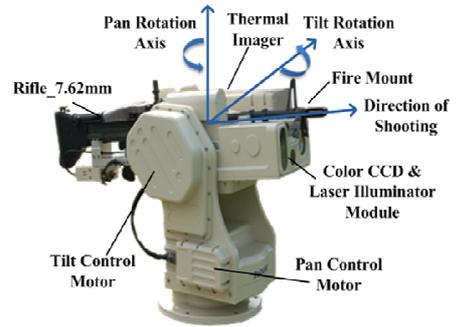


Fig. 1 aEgis 2 surveillance robot (Dodaam systems, Korea)

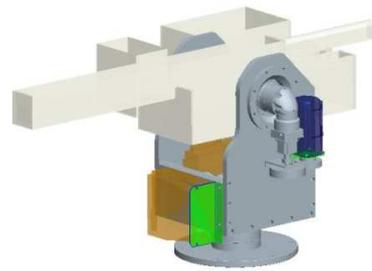


Fig. 2 Virtual model of aEgis 2

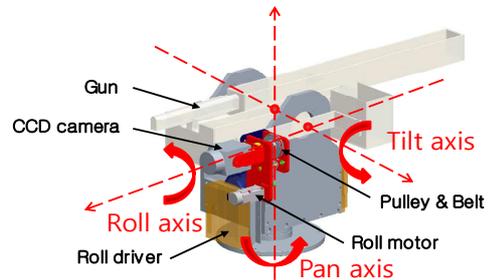


Fig. 3 Virtual surveillance robot model with 3 axis image stabilizer

이렇게 구성된 3 축 영상장치 기반 기동형 경계 로봇의 구동 범위는 팬, 틸트 모듈의 경우 기존 aEgis 2 모델의 구동 범위를 그대로 사용 하였고, 롤 모듈의 경우 ADAMS 를 이용한 HMMWV(High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle)⁽⁹⁾ 차량의 힘 지 주행 시뮬레이션(ISO D 등급⁽¹⁰⁾ 로드의 10, 20, 30km/h 주행 시뮬레이션)을 통해 분석된 롤 운동에 따라서 롤 축의 구동 가능 범위를 $-10^{\circ} \sim +10^{\circ}$ 로 정의 하였다.

Fig. 4 는 제안한 3 축 영상장치기반 기동형 경계 로봇의 목표 추적 시스템의 구동 과정을 나타낸다. 차량의 외란과 이동 목표물이 주어지면, 카메라가 수평을 유지하도록 하는 안정화된 상태에서 조이

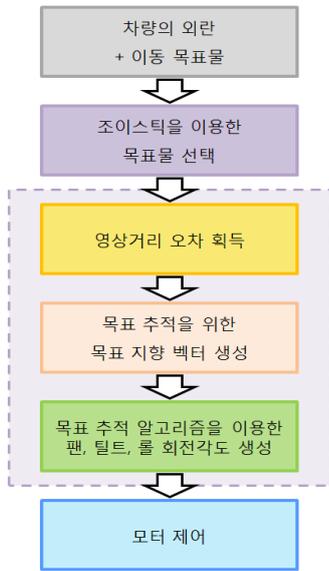


Fig. 4 Operational process of a surveillance robot target-tracking system

스틱을 이용하여 목표물이 카메라 영상 내에 들어올 수 있도록 경계 로봇의 팬, 틸트 각을 조정하고, lock-on 기능을 통해 목표물을 선택한다. 목표물이 선택되면 색상 기반 영상 처리 기법을 이용하여 목표물의 중심을 획득하고, 목표물의 중심과 카메라 영상 중심 사이의 영상 거리 오차를 획득한다. 획득한 영상 거리 오차를 이용하여 목표 지향 벡터를 생성하고, 목표 지향 벡터를 이용하여 목표 추적을 위한 기동형 경계 로봇의 팬, 틸트, 롤 축의 회전 요구 각도를 생성한다. 마지막으로, 생성된 팬, 틸트, 롤 축의 회전 요구 각도를 이용하여 각 축의 모터 시스템을 제어한다.

3. 영상 정보를 이용한 목표추적 알고리즘

3.1 영상 정보를 이용한 목표 지향 벡터 생성

2 장에서 기술한 바와 같이 기동형 경계 로봇의 목표 추적을 위해서는 영상 거리 오차를 이용하여 기동형 경계 로봇의 목표 지향 벡터를 생성해야 한다.

Fig. 5 와 같이 카메라로부터 일정 거리(l)에 위치한 가상 투영 평면의 영상 크기와 일정 거리(l)의 관계가 카메라 측정을 통해 규명 되면, 이동 차량에 장착되어 기동형 경계 로봇이 이동하고 목표물이 동시에 이동하는 상태에서도 목표물이 항상 카메라 영상 내에 위치하면 목표 추적이 가능하다. 목표물이 영상 내에 위치하고 영상 장치가

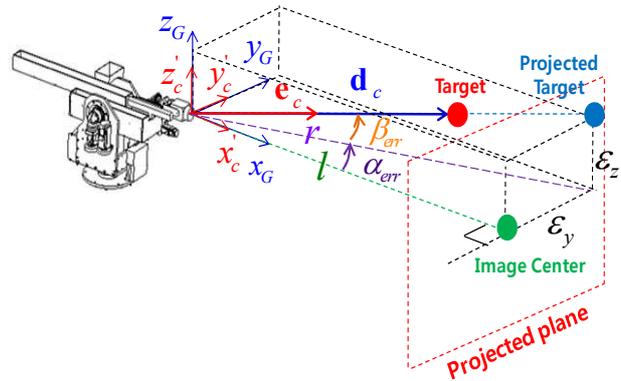


Fig. 5 Reference frames for target-tracking

일정 거리(l)에 있는 평면을 비출 때, 영상 장치로부터 획득한 목표물의 중심으로부터의 영상장치 카메라 뷰 파인더 중심까지의 거리 오차 (ϵ_y, ϵ_z)를 이용하면, 목표 추적을 위한 영상 장치의 목표 지향 벡터(e_c)를 생성할 수 있다. 즉, 측정된 영상 거리 오차(ϵ_y, ϵ_z)로부터 $\alpha_{err}, \beta_{err}$ 를 식 (1)과 같이 정의할 수 있고, 이를 이용하여 식 (2)와 같이 목표 지향 벡터를 생성할 수 있다.

$$\alpha_{err} = \tan^{-1}\left(\frac{\epsilon_y}{l}\right) \tag{1}$$

$$\beta_{err} = \tan^{-1}\left(\frac{\epsilon_z}{\sqrt{l^2 + \epsilon_y^2}}\right)$$

$$e_c = [\cos \beta_{err} \cos \alpha_{err} \quad \cos \beta_{err} \sin \alpha_{err} \quad \sin \beta_{err}]^T \tag{2}$$

3.2 목표 추적 알고리즘

Fig. 6 은 기동형 경계로봇의 좌표축과 좌표변환 행렬을 나타내고 있다. 차량의 롤, 피치, 요의 함수인 $A_v(\varphi_{roll}, \varphi_{pitch}, \varphi_{yaw})$ 는 차량 기준 좌표계 ($x'_v - y'_v - z'_v$)로부터 전역 기준 좌표계 ($x_G - y_G - z_G$)로의 좌표변환 행렬을 나타내며, 경계 로봇의 팬, 틸트 각의 함수인 $A_g(\theta_{pan}, \theta_{ilt})$ 는 기동형 경계 로봇 기준 좌표계($x'_g - y'_g - z'_g$)로부터 차량 기준 좌표계($x'_v - y'_v - z'_v$)의 좌표변환 행렬을 나타낸다. 또한, 카메라 롤 각의 함수인 $A_c(\theta_{roll})$ 는 카메라 기준 좌표계($x'_c - y'_c - z'_c$)로부터 기동형 경계 로봇 기준 좌표계로의 좌표변환 행렬을 나타낸다. 목표 추적 알고리즘은 3.1 절에서

생성한 목표 지향 벡터(\mathbf{e}_c) 및 차량 상판의 위치(\mathbf{r}_v)와 자세(\mathbf{A}_v)에 관한 외란이 주어졌을 때 기동형 경계 로봇의 영상 장치가 목표 추적을 하기 위한 회전 요구각도 ($\theta_{pan}, \theta_{tilt}, \theta_{roll}$)를 생성한다.

본 논문에서 제안한 목표 추적 알고리즘은 카메라 기준 좌표계를 구성하는 x'_c 축의 지역 단위벡터 \mathbf{i}'_c 는 지역 목표 지향 벡터(\mathbf{e}'_c)와 항상 평행하다는 구속 조건(식 (3))과 카메라 기준 좌표계를 구성하는 y'_c 축의 전역 단위벡터 \mathbf{j}_c 는 중력 방향 벡터(\mathbf{g})와 항상 수직 하다는 구속 조건(식 (4))을 만족해야 한다. 식 (3)은 목표물이 어떻게 움직이든지 카메라가 항상 목표물의 중심을 향하도록 하는 조건이며, 식 (4)는 롤 운동 외란에 대해 카메라가 항상 수평을 유지하는 조건이다. 전역 좌표계에서 표시된 목표지향 벡터(\mathbf{e}_c)는 식 (5)에 의해서 카메라 기준 좌표계에서 표시된 목표지향 벡터(\mathbf{e}'_c)와 좌표변환 행렬($\mathbf{A}_v, \mathbf{A}_g, \mathbf{A}_c$)을 통해 구할 수 있다. 상기한 두 가지 구속 조건식을 적용하면, 식 (6)과 같은 기동형 경계로봇의 팬, 틸트, 롤 요구 각을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{i}'_c // \mathbf{e}'_c \rightarrow \mathbf{i}'_c = \mathbf{e}'_c \tag{3}$$

$$\mathbf{j}_c \perp \mathbf{g} \rightarrow \mathbf{j}_c \cdot \mathbf{g} = 0 \tag{4}$$

$$\mathbf{e}_c = \mathbf{A}_v \mathbf{A}_g \mathbf{A}_c \mathbf{e}'_c \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \theta_{tilt} &= \sin^{-1}(-k_z) \\ \theta_{pan} &= \tan^{-1}\left(\frac{k_y}{k_x}\right) \end{aligned} \tag{6}$$

$$\theta_{roll} = \tan^{-1}\left(\frac{p_x \sin \theta_{pan} - p_y \cos \theta_{pan}}{p_x \cos \theta_{pan} \sin \theta_{tilt} + p_y \sin \theta_{pan} \sin \theta_{tilt} + p_z \cos \theta_{tilt}}\right)$$

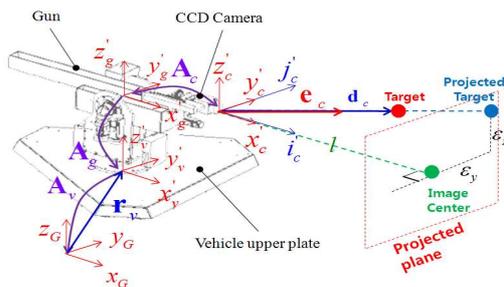


Fig. 6 Vectors, matrixes and variables definition for target-tracking

여기서 \mathbf{k} 는 식 (7)과 같이 표현되며, \mathbf{p} 는 식 (8)과 같이 표현된다.⁽⁷⁾

$$\begin{aligned} k_x &= \cos \theta_{pan} \cos \theta_{tilt} \\ k_y &= \sin \theta_{pan} \cos \theta_{tilt} \\ k_z &= -\sin \theta_{tilt} \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} P_x &= \sin \varphi_{roll} \sin \varphi_{yaw} - \cos \varphi_{roll} \sin \varphi_{pitch} \cos \varphi_{yaw} \\ P_y &= \sin \varphi_{roll} \cos \varphi_{yaw} + \cos \varphi_{roll} \sin \varphi_{pitch} \sin \varphi_{yaw} \\ P_z &= \cos \varphi_{roll} \cos \varphi_{pitch} \end{aligned} \tag{8}$$

4. 영상 기반 목표 추적 알고리즘 검증을 위한 가상 시뮬레이터 구현

제안한 영상 기반 목표 추적 알고리즘을 실제 시스템에 적용하기 전에 다양한 외란 및 목표물 이동 조건에 대해서 알고리즘을 검증해야 한다. 따라서, 본 절에서는 가상시뮬레이터를 이용한 알고리즘 검증에 관하여 설명한다.

4.1 영상 기반 목표 추적 알고리즘 검증 과정

가상 시뮬레이션을 이용한 목표 추적 알고리즘 검증 과정은 Fig. 7 와 같다. 먼저 MATLAB 을 이용하여 가상 영상 오차 생성 모듈, 목표 지향 벡터 생성 모듈과 목표 추적 모듈을 구현한다. 이를 이용하여 목표물의 운동과 차량의 외란이 주어지면 영상 거리 오차(ϵ_y, ϵ_z)를 생성한 후 목표 지향 벡터(\mathbf{e}_c)를 생성하고, 식 (6)의 목표 추적 알고리즘을 통해 팬, 틸트, 롤 회전 각도를 획득한다.

검증을 위해서 먼저 6 자유도 모션 플랫폼과 3 자유도 영상장치를 포함한 경계로봇으로 구성된 ADAMS 모델과 가상의 영상 오차 생성 모듈로 구성된 가상 시뮬레이터를 구현한다. 획득한 팬, 틸트, 롤 회전 각도와 동일한 차량의 외란을 가상 시뮬레이터의 입력한 후, 가상 영상 오차 생성 모듈을 통해서 영상 거리 오차($\epsilon_y^*, \epsilon_z^*$)를 획득한다. MATLAB 가상 모델을 이용하여 생성한 영상 거리 오차(ϵ_y, ϵ_z)와 가상시뮬레이터를 이용하여 재 생성된 영상 거리 오차($\epsilon_y^*, \epsilon_z^*$)를 비교하여 목표 추적 알고리즘을 검증한다.

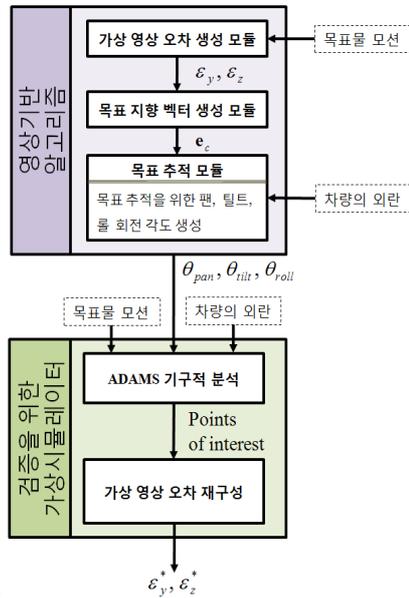


Fig. 7 Process of verifying the target-tracking algorithm

4.2 가상 영상 오차 생성

실제 시스템에서는 카메라 영상으로부터 영상에 포착된 목표물의 중심과 뷰 파인더의 중심까지 거리 오차의 픽셀을 이용하여 계산이 되어야 하지만, 가상 모델을 통한 거리 오차를 계산하기 위해서는 가상의 영상 투영면과 목표물의 가상 투영면에서의 위치가 계산되어야 한다. 이를 위해 정의된 점 및 변수들은 Fig. 8 과 같다. 영상 장치의 기준 좌표계의 원점(P_1)과 목표물의 위치(P_2)를 이용하여 $\overline{P_1P_2}$ 를 생성하고, 영상 중심(P_3)과 투영 평면 내의 임의의 점(P_4, P_5)을 이용하여 $\overline{P_1P_3}$ 에 수직인 평면 $P_3P_4P_5$ 를 생성한다. $\overline{P_1P_2}$ 의 연장선과 평면 $P_3P_4P_5$ 의 교점을 이용하여 투영 목표물(P_6)의 위치를 구하고 영상 중심(P_3)과의 위치 차이를 이용하여 영상 거리 오차(ϵ_y, ϵ_z)를 획득한다.

직선과 평면을 구성하는 점 P_1, P_2, \dots, P_5 이 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_5, y_5, z_5)$ 로 정의 될 때 교점을 구하는 방법은 식 (9), (10)과 같다.

$$\begin{aligned} x &= x_2 + \frac{-(ax_2 + by_2 + cz_2 + d)}{a(x_2 - x_1) + b(y_2 - y_1) + c(z_2 - z_1)}(x_2 - x_1) \\ y &= y_2 + \frac{-(ax_2 + by_2 + cz_2 + d)}{a(x_2 - x_1) + b(y_2 - y_1) + c(z_2 - z_1)}(y_2 - y_1) \\ z &= z_2 + \frac{-(ax_2 + by_2 + cz_2 + d)}{a(x_2 - x_1) + b(y_2 - y_1) + c(z_2 - z_1)}(z_2 - z_1) \end{aligned} \quad (9)$$

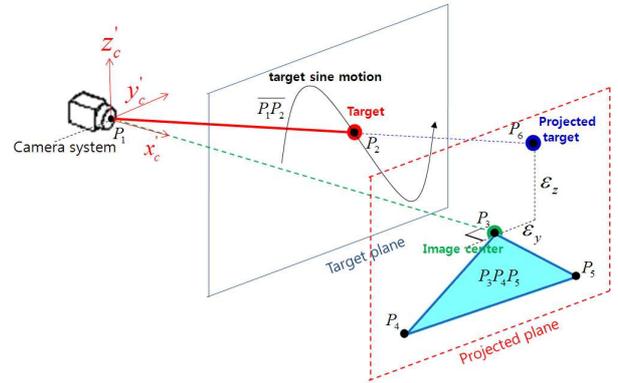


Fig. 8 Points and variable definitions to create virtual camera image errors

$$\begin{aligned} a &= (y_4 - y_3)(z_5 - z_3) - (y_5 - y_3)(z_4 - z_3) \\ b &= (x_4 - x_3)(z_5 - z_3) - (x_5 - x_3)(z_4 - z_3) \\ c &= (x_4 - x_3)(y_5 - y_3) - (x_5 - x_3)(y_4 - y_3) \\ d &= -x_3y_4z_5 + x_3y_5z_4 + x_4y_3z_5 - x_4y_5z_3 + x_5y_4z_3 - x_5y_3z_4 \end{aligned} \quad (10)$$

4.3 MATLAB/ADAMS co-simulation 을 이용한 가상 시뮬레이터 구현 및 알고리즘 검증

Fig. 9 는 3 축 영상 장치를 포함한 기동형 경계 로봇과 차량 운동을 재현하는 6 자유도 steward platform 이 결합된 ADAMS 가상 모델을 나타낸다. 또한, Fig. 10 은 알고리즘 검증을 위해 ADAMS 가상 모델과 MATLAB 으로 구현된 가상 영상 에러 생성 모듈로 구성된 가상 시뮬레이터 MATLAB/ADAMS Co-Simulation 모델을 나타낸다.

가상 시뮬레이터를 이용하여 알고리즘을 검증하기 위해서, MATLAB 으로 구현한 목표 추적 알고리즘을 이용하여 획득한 팬, 틸트, 롤 축의 회전 각도를 가상 시뮬레이터의 ADAMS 모델에 입력한다. 차량의 외란과 목표물의 모션은 MATLAB 알고리즘 계산에 사용한 차량의 외란 및 목표물의 모션과 동일하게 입력한다. 4.2 절에서와 같이 투영 목표물을 구하기 위해 Fig. 8 에서 정의된 P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 를 Fig. 9 와 같이 ADAMS 모델에 정의한다. ADAMS 모델에서 측정된 P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 를 식 (9),(10)을 이용하여 투영 목표물을 생성하고, 가상의 카메라 영상 중심과의 위치 차이를 이용하여 영상 거리 오차($\epsilon_y^*, \epsilon_z^*$)를 재생성 한다.

5. 목표 추적 알고리즘 검증을 위한 시뮬레이션

5.1 외란이 없는 경우에 대한 목표 추적 알고리즘 검증

단계적 검증을 위해서 우선 차량의 외란이 없는

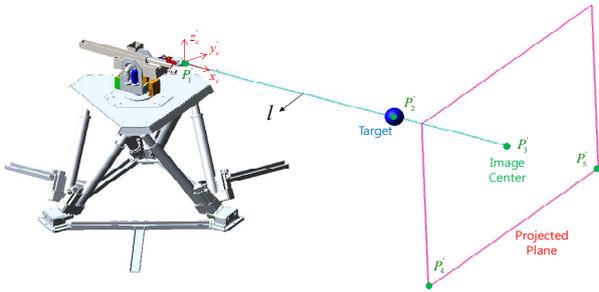


Fig. 9 Virtual model of a mobile surveillance robot using ADAMS

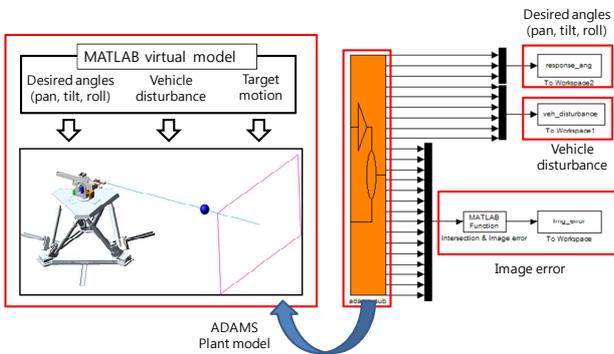


Fig. 10 ADAMS/MATLAB Co-simulation model

경우에 대해서 목표 추적 시뮬레이션을 수행하였다. 목표물의 이동 모션은 전역 좌표계의 원점으로부터 x_G 방향으로 3m 에 위치하고 y_G 방향으로 $0.5 * t m$, z_G 방향으로 $0.5 * \sin(\pi t) m$ 인 정현파 함수로 설정하고, 외란은 모든 각도가 0° 가 되도록 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 11 은 외란이 없는 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 팬 축의 회전 각도는 수평방향으로 일정하게 이동하는 목표물을 추적하기 위해 계속 증가하는 경향을 보인다. 틸트 축의 회전 각도는 목표물의 정현파 함수 운동과 동일한 주기로 움직이는 경향을 보인다. 롤 축의 회전각도는 외란이 없으므로, 0° 를 나타내고 있다.

Fig. 12 는 외란이 없는 경우에 대한 목표 추적 알고리즘의 MATLAB 을 이용하여 획득한 영상 거리 오차 (ϵ_y, ϵ_z)와 ADAMS 모델을 이용하여 재생성된 영상 거리 오차($\epsilon_y^*, \epsilon_z^*$)를 비교한 결과를 나타낸다. MATLAB 과 ADAMS 를 통해 획득한 영상 거리 오차 사이의 RMS(Root Mean Square) 에러를 구하기 위해 식 (11)을 사용하였으며, l_M 과 l_A 는 각각 MATLAB 과 ADAMS 를 통해 획득한 영상 거리 오차를 이용하여 구해낸 목표물까지의

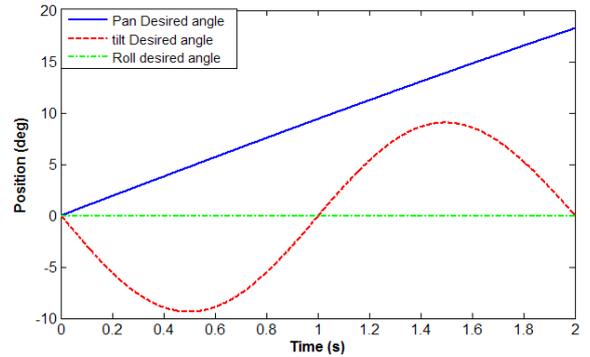


Fig. 11 Non-disturbance tests result of the target-tracking algorithm

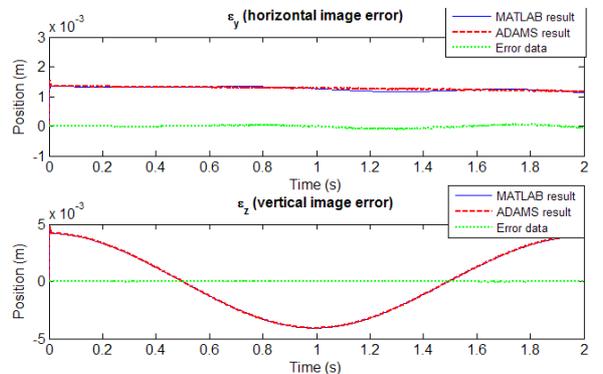


Fig. 12 Image error from non-disturbance test simulation

거리를 나타낸다. 영상 거리 오차의 RMS 에러는 $2.52 \times 10^{-5} m$ 가 된다. 따라서, 외란이 없는 환경에서 목표 추적 알고리즘이 제대로 작동된다는 것을 알 수 있다.

$$l_{M_i} = \sqrt{\epsilon_{y_i}^2 + \epsilon_{z_i}^2}$$

$$l_{A_i}^* = \sqrt{\epsilon_{y_i}^{*2} + \epsilon_{z_i}^{*2}} \tag{11}$$

$$RMS_{error} = \sqrt{\frac{(l_{M_1} - l_{A_1}^*)^2 + (l_{M_2} - l_{A_2}^*)^2 + \dots + (l_{M_n} - l_{A_n}^*)^2}{n-1}}$$

5.2 정현파 외란에 대한 목표 추적 알고리즘 검증
외란이 작용하는 경우의 목표 추적 알고리즘을 검증하기 위해 정현파 외란은 Fig. 13 에 정의된 것과 같이 롤(ϕ_{roll}), 피치(ϕ_{pitch}), 요(ϕ_{yaw})를 모두 $5^\circ \sin(\pi t)$ 로 설정하고, 히브(r_{v_z})를 $0.1 * \sin(\pi t) m$ 로 설정하고, 목표물은 5.1 에서와 동일한 조건의 정현파 모션을 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 14 는 정현파 외란에 대한 목표 추적 알고리즘 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

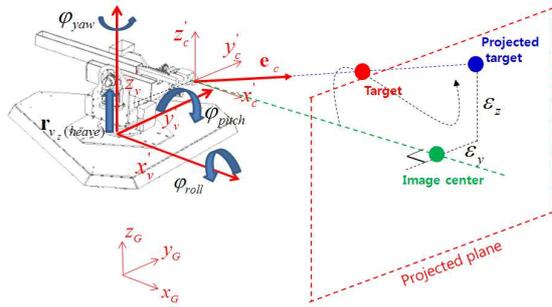


Fig. 13 Reproduction of virtual image errors

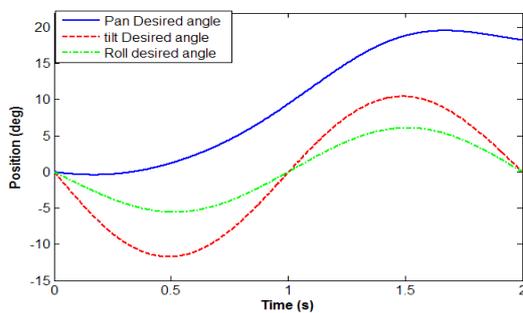


Fig. 14 Sine function disturbance test results of the target-tracking algorithm

팬 축의 회전 각도는 수평 방향으로 이동하는 목표물을 추적하기 위해 목표물의 이동 방향으로 회전 각도가 증가하는 경향을 보이며, 차량의 요 외란을 보상하기 위한 회전 각도가 더해져 S 커브 형태의 경향을 보인다. 틸트 축의 회전 각도는 차량의 피치, 히브 외란을 보상하기 위해 회전 각도의 방향이 차량의 피치, 히브 외란과 반대인 경향을 보이며, 수직 방향으로 이동하는 목표물을 추적하기 위한 회전 각도가 더해져 크기가 증가하는 경향을 보인다. 롤 축의 회전각도는 차량의 롤 외란을 보상하기 위해 차량의 롤 외란과 크기가 같고 방향이 반대인 경향을 보이며, 이는 외란이 없었던 5.1 시뮬레이션과의 차이점이라 할 수 있다.

Fig. 15 는 정현파 외란에 대한 목표 추적 알고리즘의 MATLAB 을 이용하여 획득한 영상 거리 오차 (ϵ_y, ϵ_z)와 ADAMS 모델을 이용하여 재생성된 영상 거리 오차 ($\epsilon_y^*, \epsilon_z^*$)를 비교한 결과를 나타낸다. 영상 거리 오차 사이의 RMS 에러 는 $3.31 \times 10^{-5} m$ 이다. 5.1 절과 마찬가지로 0 에 가까운 매우 작은 값을 얻었으므로, 정현파 외란에 대한 목표 추적 알고리즘이 제대로 작동한다는 것을 알 수 있다.

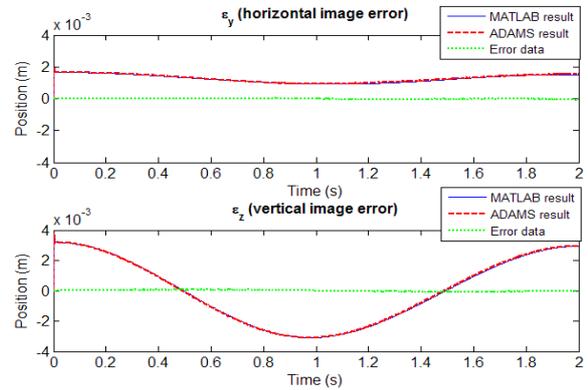


Fig. 15 Image error from sine function disturbance test simulation

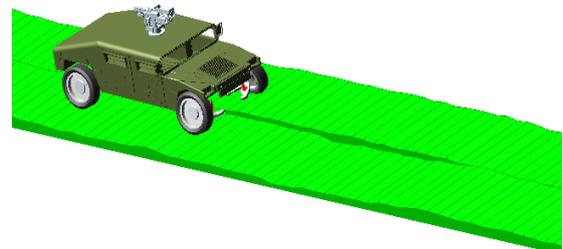


Fig. 16 ADAMS HMMWV model

5.3 HMMWV 차량의 외란에 대한 목표 추적 알고리즘 검증

HMMWV(High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle)⁽⁹⁾는 미국에서 개발된 군용차량으로 다양한 도로 및 지형에서 주행이 가능한 차량이다. 따라서, 실제 환경을 모사하기 위하여 기동형 경계 로봇이 HMMWV 위에 탑재 되었다고 가정을 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 차량에 의한 외란을 구하기 위해서 Fig. 16 과 같은 ADAMS HMMWV 모델을 이용하여 ISO D 등급(ISO 8608)⁽¹⁰⁾의 주행로를 10km/h 주행하는 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 17 은 HMMWV 차량의 롤, 피치, 히브 모션을 나타내며,검증을 위해 이를 외란으로 인가하고 목표물의 이동 모션은 5.1 절과 5.2 절에서와 동일한 조건의 정현파 모션을 목표추적 알고리즘에 적용하였다.

Fig. 18 은 HMMWV 차량 외란에 대한 목표 추적 알고리즘의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 팬 축의 회전 각도는 5.1 과 5.2 절에서와 동일하게 수평 방향으로 이동하는 목표물의 이동 방향을 추종하기 위해 회전 각도가 증가하는 경향을 보이지만, 요 외란이 상대적으로 작기 때문에

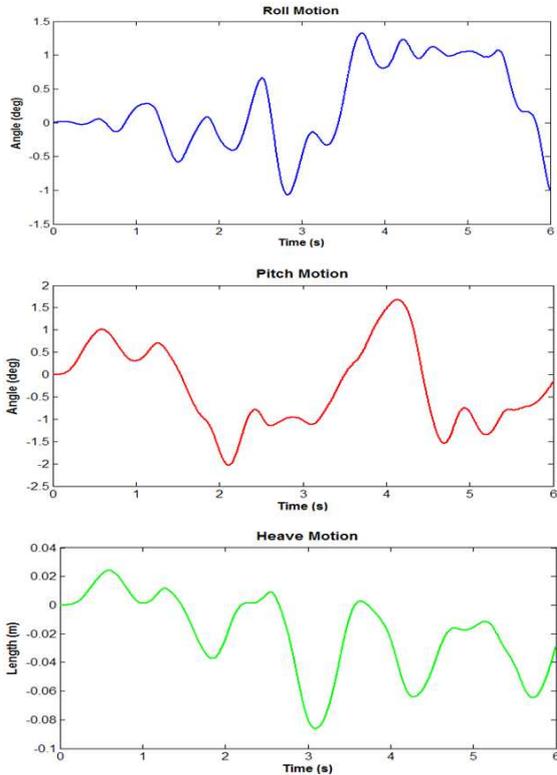


Fig. 17 HMMWV driving test in rough terrain run simulation

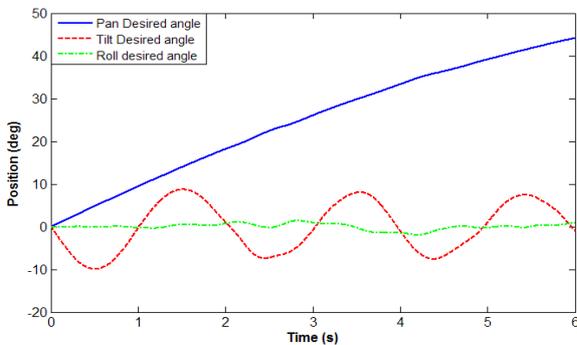


Fig. 18 HMMWV disturbance test results of the target-tracking algorithm

5.2 절의 정현파 외란을 적용할 때와는 달리 S 커브 형태를 보이지는 않는다. 틸트 축의 회전 각도는 정현파로 이동을 하는 목표물을 추적하기 위해 기본적으로 정현파 곡선을 그리고 있으며, 차량의 피치, 히브 외란을 보상하기 위해 파형 중간에 크고 작은 굴곡이 나타나는 경향을 보인다. 롤 축 회전각도는 차량의 롤 외란을 보상하기 위해 차량의 롤 외란과 크기가 유사하고 방향이 반대인 경향을 보인다. 이를 통해 롤 보상의 중요성을 알 수 있다.

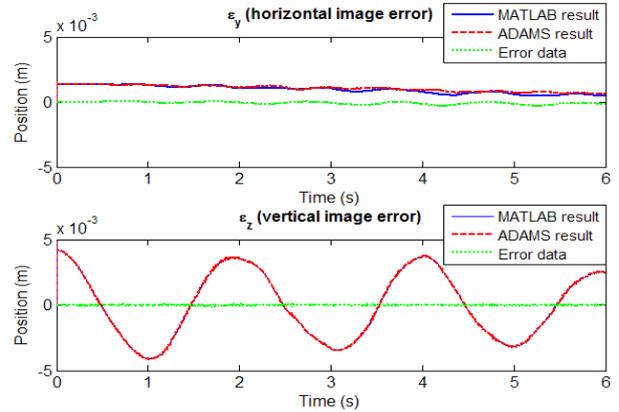


Fig. 19 Image error from HMMWV disturbance test simulation

Fig. 19는 HMMWV 차량 외란에 대한 목표 추적 알고리즘의 MATLAB 을 이용하여 획득한 영상 거리 오차(ϵ_y, ϵ_z)와 ADAMS 모델을 이용하여 생성된 영상 거리 오차($\epsilon_y^*, \epsilon_z^*$)를 비교한 결과를 나타내며, 영상 거리 오차 사이의 RMS 에러는 $6.72 \times 10^{-5} m$ 이다. HMMWV 차량의 외란에 목표 추적 알고리즘을 적용한 경우의 RMS 에러가 5.1 절과 5.2 절에서 발생하는 RMS 에러에 비해 상대적으로 큰 이유는 HMMWV 주행 시뮬레이션을 통해 얻어진 외란 데이터를 3 차 스플라인으로 보간하는 과정에서 발생하는 데이터 오차 때문이다. 하지만, RMS 에러 범위가 10^{-5} 이기 때문에 실제 환경을 모사한 HMMWV 차량 주행에서도 목표 추적 알고리즘이 제대로 작동한다는 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 기동형 경계 로봇의 효율적인 경계 감시 임무 수행을 위해 3 축 영상 장치를 2 축 경계 로봇에 적용하는 설계 안을 제시하였고, 이에 상응하는 영상 기반 목표 추적 알고리즘을 제안하였다. 또한, 기동형 경계 로봇의 가상 시뮬레이션을 이용하여 제안한 영상 기반 목표 추적 알고리즘을 검증하였다.

경계로봇으로부터 일정거리 앞에서 목표물이 정현파로 움직일 때 영상 거리 오차 사이의 RMS 에러값을 비교하여 알고리즘을 검증하였으며, 외란이 없는 경우 RMS 에러는 $2.52 \times 10^{-5} m$ 이며, 정현파 함수 외란을 적용한 경우 RMS 에러는 $3.31 \times 10^{-5} m$ 이고, HMMWV 차량 주행시 발생하는

외란을 적용한 경우에 대해서는 RMS 에러가 $6.72 \times 10^{-5} m$ 로 매우 작은 값을 나타내었다. 이를 통해 본 연구에서 제안한 목표 추적 알고리즘의 타당성을 검증 하였다.

3 축 영상 안정화 장치를 기동형 경계 로봇에 적용함으로써, 기존 경계 로봇의 롤 외란 안정화에 대한 한계를 극복할 수 있는 가능성을 보였다.

추후 연구로는 본 논문에서 제안한 영상 기반 목표 추적 알고리즘을 실제 하드웨어 실험 장비를 통해 검증하는 것이다.

참고문헌

- (1) Fitts, J.M., 1973, "Aided Tracking as Applied to High Accuracy Pointing Systems," *IEEE Trans. On Aerospace and Electronics Systems*, Vol. AES-9, No. 3, pp. 350~368.
- (2) RUE, A.K., 1974, "Precision Stabilization Systems," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems*, Vol. AES-10, No. 1, pp. 34~42.
- (3) Bigley, W.J. and Rizzo, V.J., 1987, "Wideband Linear Quadratic Control of a Gyro-Stabilized Electro-Optical Sight System," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 20~24.
- (4) Lee, D. Y., Kim, S. S., Kwon, J. J. and Park, S. H., 2010, "Development and Testing of Mobile Surveillance Robot Using Vehicle Motion Simulator," *Proc. of the 5th Asian Conference on Multibody Dynamics*.
- (5) Choi, D. H. and Lee, S. S., 2010, "Multiphysics Simulation of Stabilized Remote Controlled Weapon System on Coast Guard Naval Ships," *Proc. of the 5th Asian Conference on Multibody Dynamics*.
- (6) Kim, S. S., Oskar, W., Kwon, J. J., Kim, D. H. and Diana, W., 2009, "Development of a Motion Simulator for Testing a Mobile Surveillance Robot," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No. 4, pp. 1065~1070.
- (7) Kim, M. H., Kim, S. S., Im, Y. R., Lee, D. Y. and Park, S. C., 2010, "Development of the 3 Axis Vision Stabilization System for Unmanned Mobile Robot," *Proc. of the 10th International Conference on Motion and Vibration Control*.
- (8) 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.
- (9) Aardema, J., 1988, *Failure Analysis of the Lower Rear Ball Joint on the High-Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle(HMMWV)*, U.S. Army TACOM RD&E Center Warren, Michigan, Technical Report No. 13337.
- (10) Choi, G. J. and Heo, S. J., 2006, "Classification of the Korean Road Roughness," *Trans. of the KSAE*, Vol. 14, No. 5, pp.115~120.