

동특성 해석에 기반한 이동용 안테나 김발 안정화 시스템

이기남^{*†} · 이병호^{*} · 이 증^{*} · 김지억^{*} · 송재복^{**}

^{*} LIG 넥스원 기계연구센터, ^{**} 고려대학교 기계공학부

Stabilization System for Mobile Antenna Gimbal based on Dynamic Characteristics Analysis

Ki-Nam Lee ^{*†}, Byoung-Ho Lee^{*}, Jeung Lee^{*} and Jie-Eok Kim^{*} and Jae-Bok Song ^{**}

^{*} LIG Nex1, ^{**} Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.

(Received December 3, 2012 ; Revised May 4, 2013 ; Accepted May 6, 2013)

Key Words: NCW(네트워크중심전), External Disturbance(외란), Analysis of the Dynamic Model(동특성 분석), Stabilization Algorithm(안정화 제어), PI² Control(비례-적분-적분 제어)

초록: 최근에 들어 전술환경이 모든 요소들을 네트워크로 연결하는 NCW 환경으로 변화하면서 위성을 이용한 대용량 고속의 위성통신이 매우 중요하게 부각되었다. 고품질의 위성링크를 제공하기 위해서는 플랫폼의 안정화 기술이 선행되어야 한다. 기존의 안정화 제어기술은 주로 PI제어기를 사용하는 선박용이 주류를 이루었다. 이에 비해 보다 더 빠른 응답특성이 요구되는 지상용 단말의 경우 빠른 시간 안에 위성을 추적할 수 있도록 안테나 구동속도가 빨라야 하며, 외란을 감지하는 센서와 감지된 외란을 보상하면서 위성지향을 유지할 수 있도록 하는 알고리즘이 필요하다. 본 연구에서는 안테나 시스템의 동역학 특성을 분석하여 지상용 단말에 적합한 저주파 영역에서 높은 격리도를 갖는 PI² 제어기를 포함하는 안정화 제어루프를 제안한다.

Abstract: Recently, as the tactical environment has changed to one of network-centric warfare, where all components are connected through a network, much emphasis has been placed on the use of an artificial satellite for achieving high communication speeds. To provide a high-quality artificial satellite link, stabilization is very important in a platform. Previous stabilization control techniques used PI control, which is commonly used for vessels. However, for ground terminals that require a higher communication speed, the antenna should move faster to track an artificial satellite within a short period of time. Moreover, the terminals must be equipped with proper sensors and algorithms so that they can detect and compensate for external disturbances while tracking the artificial satellite. In this study, through the analysis of the dynamic model of an antenna system, a stabilization algorithm for ground terminals was proposed; this algorithm shows high isolation performance in the low-frequency range and includes PI² control.

- 기호설명 -

1. 서론

ϕ : 고각좌표계의 피치각
 θ : 방위각좌표계의 요각
 ω_a : 방위각 각속도
 ω_e : 고각 각속도
 J : 관성모멘트
 D : 관성상승모멘트

최근에 전술 환경은 위성과 연결되어 전투에 필요한 요소들을 네트워크 상에서 공유하고 통합하는 NCW(network centric warfare) 환경으로 변하고 있다. 이와 같은 환경에서는 신뢰성 있는 데이터 통신을 위한 위성지향 안테나 시스템이 필요하므로, 김발의 제어를 통한 안테나의 자세 안정화 기술 개발이 필수적이다.

최근까지는 이러한 안정화 제어를 위해 시스템의 모델 분석과 제어기 설계에 대한 다양한 연구

[†] Corresponding Author, leekinam@lignex1.com
 © 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

가 진행되어 왔다.^(1~5) 2축 김발에 대한 운동 방정식이 제시되었으며,⁽¹⁾ 자이로 센서와 PI 제어를 이용한 속도 및 위치제어 방법에 대한 연구가 진행되었다.⁽²⁾ 또한, 적응제어,⁽³⁾ 슬라이딩모드제어,⁽⁴⁾ LQG/LTR 등⁽⁵⁾을 적용한 안정화 제어가 구현되었다. 그러나 지금까지의 연구에서는 주행 시 발생하는 진동을 김발에서 보상한다거나 김발의 안정화만을 고려하였다. 이와 관련하여 이동체의 움직임과 지면의 진동 요소를 고려한 김발의 설계와 제어 방법에 대한 연구를 수행할 필요가 있다.

본 연구에서는 이동체의 동특성 데이터를 바탕으로 안테나 김발 시스템을 설계하고, 이를 기반으로 안정화 제어를 구현하였다. 이를 위하여 포장 및 비포장 도로에서의 차량 각속도 데이터를 측정하였으며, 주파수 해석을 통하여 이동체 및 안테나에 인가되는 외란의 원인을 분석하였다. 또한, 이를 바탕으로 2자유도의 안테나 김발 장치를 설계하고, 비례-적분-적분 제어를 적용하여 안정화 제어를 구현하였다. 더불어, 제안한 제어 방법을 적용한 실험을 통해 시스템의 신뢰성을 검증하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 주행 환경 중 측정된 동특성 데이터의 분석 결과를 바탕으로 설계된 2자유도 김발 구조의 설계에 대하여 설명하고, 3장에서는 이의 제어 시스템에 대하여 기술한다. 또한 4장에서는 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제시된 구조의 성능을 검증하고, 5장에서 결론을 도출한다.

2. 안테나 김발 시스템 설계

2.1 주행 환경 분석

안테나 김발 시스템을 설계하기 위해서는 주행 중 노면에 의한 흔들림과 충격에 대한 주파수 분석이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 주행 환경 및 속도에 따른 이동체의 진동 데이터 수집을 위해 Fig. 1의 1.25톤 차량을 이용하였고, 안테나 김발 시스템을 설치할 위치에 IMU 센서를 장착하여 포장 및 비포장 도로 주행 시 발생하는 각속도를 측정하였다.

본 실험에서는 차량이 10, 20, 28km/h의 속도로 포장 및 비포장 도로에서 주행할 때 발생하는 각속도를 측정하였다. 이때 각속도 데이터는 1.5kHz의 샘플링 주파수로 수집하였으며, 차단 주파수가 60Hz인 Butterworth 10차 LPF(low pass filter)를 사용하여 불필요한 데이터를 제거하였다.

Table 1 Maximum values of disturbance

Parameters	x-axis	y-axis	z-axis
Angular velocity ($^{\circ}/s$)	12.3	12.7	20.7
Angular acceleration ($^{\circ}/s^2$)	898.7	309.9	173.9

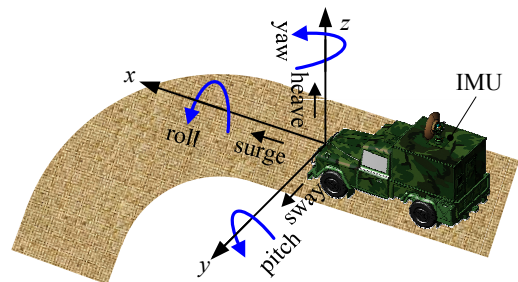


Fig. 1 Experimental environment for road test

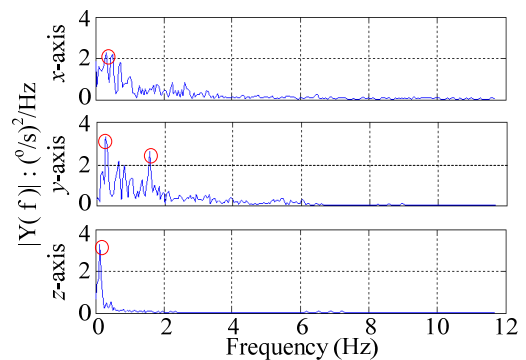


Fig. 2 FFT analysis results of angular velocity

여러 번의 주행 시험 결과, 차량이 비포장도로에서 최고속도(28km/h)로 주행하였을 때 각속도의 변화가 가장 크게 나타났으며, 특히 z 방향으로 상대적으로 심한 외란이 발생하였다. 또한, 측정된 각속도를 미분하여 각가속도 데이터를 추출한 결과, 각 축의 최대 각속도와 각가속도는 Table 1과 같이 z축에서 $20.7^{\circ}/s$, x축에 $898.7^{\circ}/s^2$ 로 나타났다.

수집한 차량의 각속도(비포장도로, 28km/h)에 대한 FFT(Fast Fourier Transform) 분석 결과는 Fig. 2와 같다. 즉, 주행에 의하여 안테나로 전달되는 x, y, z 방향의 진동의 주파수는 각각 1Hz 이하, 0.3Hz, 그리고 0.1Hz의 비교적 저주파 영역에 집중되어 있음을 알 수 있다. 그러므로, 위성지향 안테나의 방위각 안정화를 위한 김발 시스템은 저주파 영역의 외란을 고려하여 최대 각가속도가 $1000^{\circ}/s^2$ 로 설계되어야 한다.

2.2 시스템 구조 및 구성

본 연구에서는 앞 절에서 수행한 주행 환경 분석을 토대로 Fig. 3과 같이 1Hz의 저주파 영역에서

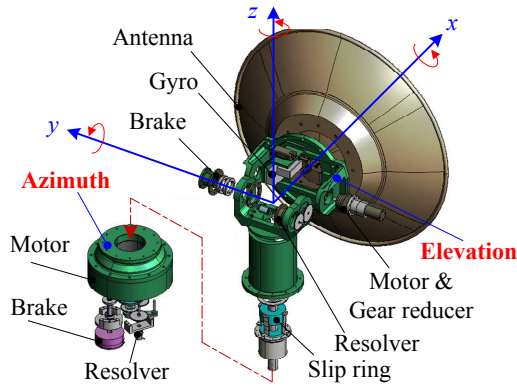


Fig. 3 Design of antenna gimbal

높은 이득을 갖고 우수한 절연 성능을 보일 수 있는 2 자유도(방위각 및 고각) 김발 구조의 안테나 시스템을 설계하였다. 일반적으로 안테나의 안정화 제어를 위해서 3 자유도의 김발 구조가 사용되지만, 차량에 장착되는 안테나의 경우에 Fig. 3 과 같이 x 축 방향으로의 회전은 고려할 필요가 없으므로 2 자유도 김발 구조를 채택하였다.⁽⁶⁾ 설계된 안테나 시스템은 차량의 회전을 고려하여 방위각(Azimuth)의 조절은 360° 연속 회전이 가능하도록 하였고, 국내에서 위성을 지향할 수 있도록 -10° ~ +120° 의 고각(Elevation)을 조절할 수 있게 설계하였다.

본 설계에서는 안테나 방위각의 360° 연속회전 시 발생할 수 있는 케이블의 파손을 방지하기 위하여 방위각 조절을 위한 관절에 슬립링(Slip ring)을 적용하였다. 또한, 방위각 제어 시에 백래시(backlash)를 최소화하기 위해서 모터와 링크를 직접 연결하였고, 고각 제어를 위한 관절은 100:1의 감속기를 사용하여 구동하였다. 응급 상황에서의 장비 보호를 위해 브레이크를 삽입하였으며, 자이로 센서를 설치하여 방위각과 고각의 각속도를 측정할 수 있도록 하였다. 본 안테나 시스템에는 정밀한 속도 제어를 위해 BLDC 모터를 사용하였다.

2.3 김발 기구학 및 운동 방정식

설계된 2자유도 김발 시스템에서 차량에 인가되는 외란과 안테나의 방위각 및 고각은 Fig. 4와 같이 차량 좌표계(Vehicle coordinate), 방위각좌표계(Azimuth coordinate), 그리고 고각 좌표계(Elevation coordinate)로 표현할 수 있다. 또한, 정의된 좌표계 설정에 따른 방위각 및 고각의 자세 정보는 오일러 각도 표기법에 의해 식 (1-2)로 표현할 수 있다. 이때, ω_v , ω_a , ω_e 는 각각 차량의 외란 각속도, 방위각 및 고각의 각속도를 의미한다.

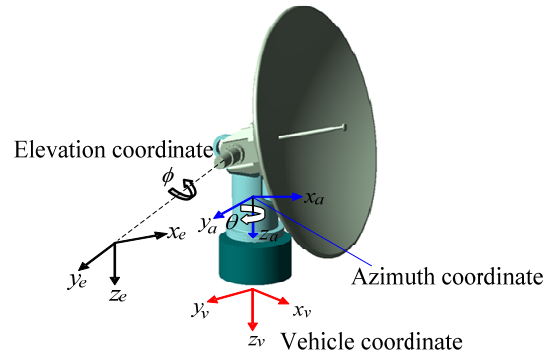


Fig. 4 Three coordinates of antenna gimbal system

$$\omega_a = \begin{bmatrix} \omega_{ax} \\ \omega_{ay} \\ \omega_{az} \end{bmatrix} = {}^vR_a \omega_v = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{vx} \\ \omega_{vy} \\ \omega_{vz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\omega_e = \begin{bmatrix} \omega_{ex} \\ \omega_{ey} \\ \omega_{ez} \end{bmatrix} = {}^aR_e \omega_a = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{ax} \\ \omega_{ay} \\ \omega_{az} \end{bmatrix} \quad (2)$$

본 연구에서는 안테나 말단의 흔들림 정보를 보상해야 하므로, 자이로 센서는 안테나 최종 말단에 부착되어 있다. 이 때, 자이로 센서 값은 좌표 변환을 통해 방위각과 고각의 각속도 나타낸다. 2축 김발의 마찰 특성을 무시하고, 김발의 무게 중심이 김발의 각 관절 회전 중심위에 놓여있다고 가정할 때, 식 (3)과 같이 고각의 관성 행렬을 J_A , 방위각의 관성 행렬을 J_E 로 표기할 수 있다. 위와 같은 가정에서 고각 및 방위각 조절을 위한 필요토크 τ_e 와 τ_a 는 식 (4-5)를 통하여 계산할 수 있다.⁽¹⁾

$$J_A = \begin{bmatrix} J_{ax} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{xy} & J_{ay} & D_{yz} \\ D_{xz} & D_{yz} & J_{az} \end{bmatrix}, \quad J_E = \begin{bmatrix} J_{ex} & d_{xy} & d_{xz} \\ d_{xy} & J_{ey} & d_{yz} \\ d_{xz} & d_{yz} & J_{ez} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\tau_e = J_{ey} \dot{\omega}_{ey} \quad (4)$$

$$\tau_a = (J_{ez} + J_{ax} \sin^2 \omega_{az} + J_{az} \cos^2 \omega_{az} - D_{xz} \sin 2\omega_{az}) \dot{\omega}_{ez} \quad (5)$$

3. 제어시스템

본 연구에서 제안한 제어 시스템은 Fig. 5에서 보듯이, 속도 루프(Velocity loop)와 안정화 루프(Stabilization loop) 그리고 위치 루프(Position loop)로 구성된다. 정밀한 자세 정보를 취득하기 위해

광섬유 자이로(Fiber optic gyroscope)를 적용함으로써 기존의 기계식 또는 레이저식 시스템보다 높은 성능의 제어 시스템을 소형으로 구현하였다. 또한, 컴퍼스(Compass)와 틸트(Tilt) 센서를 추가로 탑재하여 예측하지 못한 상황에서도 차량이 본 위치를 찾을 수 있도록 하였다.

제안된 제어 시스템의 속도제어 루프는 Fig. 6과 같이 엔코더 신호를 이용하여 모터의 속도를 제어하며, 서보 드라이버의 PI 제어를 통해 모터에 인가되는 전류를 제어한다. 본 루프는 시스템의 최고 속도를 기준으로 설계되었으므로, 안테나 김발 시스템의 고유진동수의 1/2인 35Hz의 대역폭을 갖는다.

안정화 루프는 Fig. 7과 같이 2장에서 분석한 요구사항에 맞추어 1Hz 외란에 대하여 -40dB의 안정화 성능을 갖도록 구현하였다. 이동체의 흔들림에 의한 각속도는 자이로에 의해 측정되며, 비례-적분-적분 제어기(PI²)를 적용하여 저주파 영역에서 강인한 결과를 나타낼 수 있도록 하였다.

안정화 제어를 위해 사용한 비례-적분-적분 제어기는 저주파 영역의 외란에 대하여 고주파 영역

외란보다 큰 이득을 갖도록 하기 위해 적용되었다. ω_n 이 각각 n번째 적분이득이고, K_p 가 비례이득일 때, PI² 제어기의 전달함수는 다음과 같다.

$$G(s) = K_p \frac{(s + \omega_1)(s + \omega_2)}{s^2} \tag{5}$$

따라서 Fig. 8의 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이, 1kHz 이상의 고주파 영역에서는 PI 제어를 추종하고, 1kHz 이하의 저주파 영역에서는 큰 이득으로 제어가 가능하다는 것을 알 수 있다.

본 제어 시스템의 위치루프는 Fig. 9과 같이 구현된다. 정밀한 위치제어를 위하여 최대 측정오차가 0.01°인 고정밀 리졸버를 적용함으로써, 시스템 요구 사항인 K_a 대역 오차범위 0.2°를 만족시킨다.

4. 안정화 제어 시뮬레이션 및 실험

4.1 시뮬레이션

제안한 시스템의 안정화 성능을 검증하기 위하여 MATLAB의 Simulink를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이때, 실제 주행 시 차량에 인가되는 외란과 유사한 가진을 입력하기 위하여, 베이스 모션에는 2장에서 수행한 주행환경 실험의 12Hz 미만의 데이터 중 피크 점을 나타내는 데이터를 적용하였다. 제안된 김발 시스템은 Fig. 10과 같이 제어하였다. 여기서, p_a 와 q_a 는 Base Motion에 의한 속도 벡터를 고각 성분과 방위각 성분으로 나타낸 벡터 성분이고, r_a 와 r_b 는 방위각 성분을 직교하는 벡터로 나눈 성분이다.

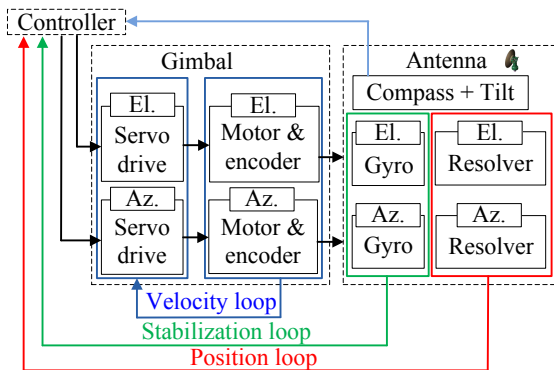


Fig. 5 Block diagram of antenna gimbals system

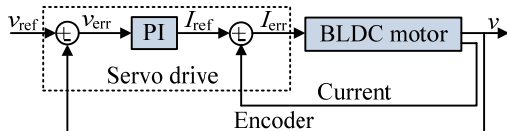


Fig. 6 Block diagram of velocity loop

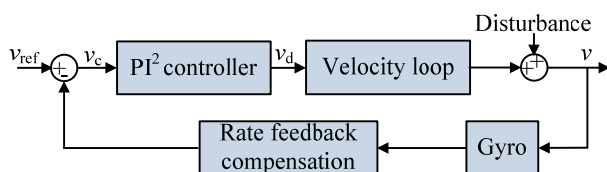


Fig. 7 Block diagram of stabilization loop

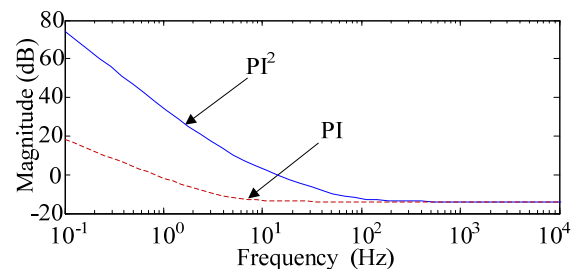


Fig. 8 Simulation data of PI² controller

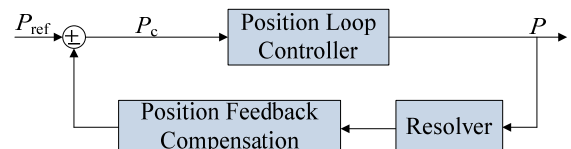


Fig. 9 Block diagram of position loop

Table 2 Gimbal parameters

Inertia matrices	Value (kg·m ²)
$J_A = \begin{bmatrix} J_{ax} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{xy} & J_{ay} & D_{yz} \\ D_{xz} & D_{yz} & J_{az} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3.9806 & 0.0158 & -0.2457 \\ 0.0158 & 3.5115 & -0.1379 \\ -0.2457 & -0.1379 & 1.0718 \end{bmatrix}$
$J_E = \begin{bmatrix} J_{ex} & d_{xy} & d_{xz} \\ d_{xy} & J_{ey} & d_{yz} \\ d_{xz} & d_{yz} & J_{ez} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.7037 & 0.0002 & 0 \\ 0.0002 & 0.5433 & 0.0075 \\ 0 & 0.0075 & 0.5790 \end{bmatrix}$

Table 3 PI² controller parameters

Parameters	Value	Unit	Note
ω_1	25.1	rad/s	1 st integral gain
ω_2	408.4	rad/s	2 st integral gain

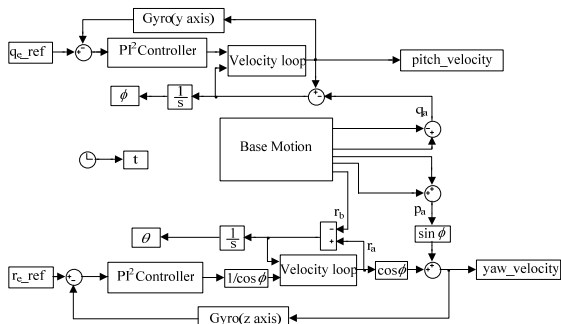


Fig. 10 Block diagram for simulation

2자유도 김발 시스템의 관성모멘트가 Table 2와 같을 때, 가진에 따른 안테나 안정화를 위한 각 관절의 회전량은 식 (3-4)를 통하여 계산할 수 있다. 베이스 모션으로 인한 가진이 인가될 때, 김발의 거동은 전류 구동 방식의 속도루프를 거쳐 다시 자이로에 의해 각속도를 피드백 받아 PI² 제어기를 통해서 안정화가 이루어진다. 이 때, PI² 제어기에서 사용한 적분 이득은 실험적으로 구한 Table 3의 데이터를 사용하였다.

시뮬레이션 결과 Fig. 11 (a), (b)와 같이 안정화 제어를 하지 않았을 경우에는 베이스 모션에 의한 가진이 그대로 전달되어 안테나는 15.71%/s의 속도로 최대 5°의 각도 변화(오차)가 발생한다. 반면에, 안정화를 제어를 적용하였을 경우에는 최대 오차가 0.049°, 0.15°/s로 감소하여, 목표인 -40dB(1/100배)의 성능을 만족하였다.

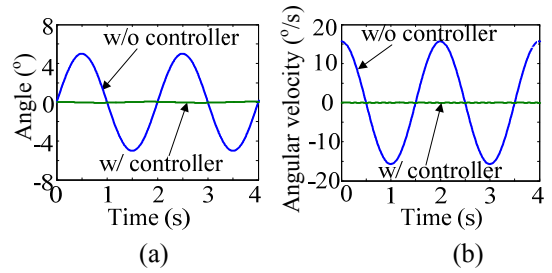


Fig. 11 Simulation data: (a) position, and (b) velocity

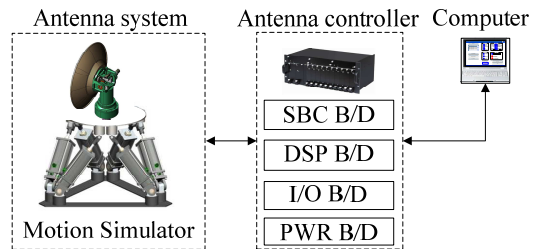


Fig. 12 Experimental setup

4.2 실험장치의 구성

실험장치는 Fig. 12와 같이 이동체의 흔들림을 모사하는 모션 시뮬레이터와 그 상단에 장착되는 2자유도 안테나 김발 시스템, 그리고 안테나 제어기, 운용 컴퓨터 등으로 구성된다. 모션 시뮬레이터는 노면에서의 주행을 모사하기 위해 자체 개발한 6자유도 스투어트 플랫폼(stewart platform)을 사용하였다. 개발된 스투어트 플랫폼은 125kg의 가반중량에 대해 최대 800°/s의 각속도와 1000°/s²의 각 가속도로 구동이 가능하다. 안테나 제어기는 SBC(Single Board Computer) 보드와 알고리즘을 저장 및 처리하는 DSP 보드, 신호의 입출력을 저장하는 I/O 보드, 전원장치인 PWR 보드로 구성된다.

4.3 실험 결과

개발된 안정화 시스템의 성능 검증을 위하여, 자이로 센서에 대한 모터의 추종성능 및 이를 통한 안테나의 구동성능을 확인하였다. 안테나 추적 각속도를 3°/s로 설정하였고 수동 추적 시험을 실시하여 모터의 입력 각속도 대비 자이로 센서로 측정된 안테나의 출력 각속도를 분석한 결과, Fig. 13와 같이 최대오차 0.01°/s의 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있었다. 더불어 두 값 사이에는 시간지연이 거의 발생하지 않음을 확인하였다. 또한 모터의 입력 각 대비 리졸버로 측정된 출력 각변위를 측정된 결과 Fig. 14와 같이 시간이 지남에 따라 최대오차가 0.1°이하로 나타나는 것을 알 수 있었다. 따라서 제어시스템은 제대로 추종성능을 발휘함을 확인하였다.

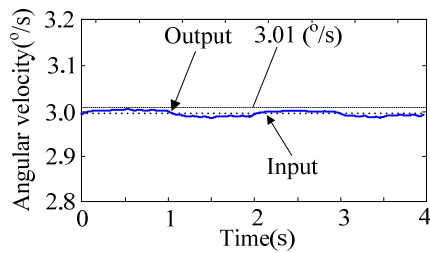


Fig. 13 Experimental results: gyro sensor tracking

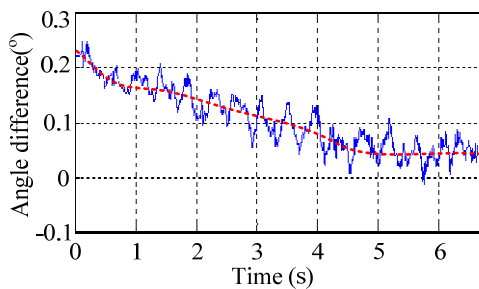


Fig. 14 Experimental results: angle error

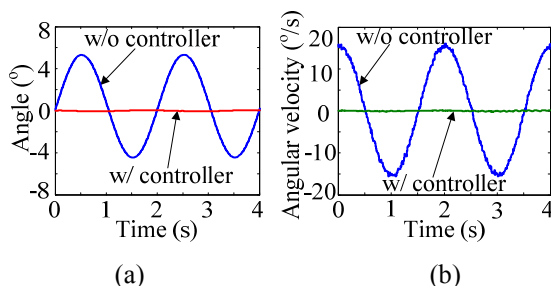


Fig. 15 Experimental results: (a) position, and (b) velocity

위와 같이 수동 추적시험으로 시스템을 검정한 후, Fig. 12의 안정화 실험장치를 이용하여 차량 이동을 모사한 안정화 실험을 수행하였다. 그 결과 Fig. 15 (a), (b)와 같이 안정화 제어를 하지 않았을 경우에는 베이스 모션에 의한 가진이 그대로 전달되었지만, 안정화 제어를 적용하였을 경우에는 외란에 대한 보상이 이루어져 Ka 대역 최대오차 0.2°를 만족함을 확인하였다. 그리고 최대 각속도 오차가 0.15°/s로 감소하여 시뮬레이션 값과 유사한 결과가 나옴을 알 수 있다. 본 실험을 통하여 제시된 해석모델이 유용함을 검증하였고, 차량의 자세 변화율 1Hz, 20°/s에서 목표로 하였던 안정화

율인 -40dB(1/100배)를 만족함을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 동특성 해석에 기반한 이동용 안테나 김발 안정화 시스템을 개발함으로써 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 비포장도로에서의 주행 환경 분석을 통해, 주행 시 차량에 발생하는 외란을 최적으로 보상할 수 있는 안테나 김발 시스템을 설계/제작하였다.

(2) 1~20Hz의 저주파 영역에서 높은 격리도를 갖는 고이득의 PI^2 제어를 안정화 루프에 적용하여 -40dB 이하의 안정화율을 만족하는 제어가 가능하였다.

(3) 주행 환경에 대한 고려를 통해 기존의 김발 장치에 초점을 맞춘 연구에서 벗어나 실제적으로 적용하였을 때 상황을 고려하였다.

참고문헌

- (1) Yoon, S. and Lundberg, J.B., 2001, "Equations of Motion for a Two-Axes Gimbal System," *IEEE Transaction*, Volume 37, No. 3, pp. 1083~1091.
- (2) Lee, K. N., Song, J. B., Lee, B. H., Lee, J. and Kim, J. E., 2012, "Stabilization Control of Mobile Antenna System Based on Dynamic Characteristics Analysis," *Spring Conference of the Korean Society of Precision Engineering*, pp.209~210.
- (3) Lin, C. L. and Hsiao, Y. H., 2001. "Adaptive Feedforward Control for Disturbance Torque Rejection in Seeker Stabilization Loop," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 108~121.
- (4) Kang, M. S. and Cho, Y. W., 2010, "Stabilization Control of Line of Sight of OTM Antenna," *Trans. KIEE*, Vol. 59, No. 11, pp. 2073~2082.
- (5) Seong, K. J., Kang, H. G., Yeo, B. Y. and Lee, H. P., 2006, "The Stabilization Loop Design for a Two-Axis Gimbal System Using LQG/LTR Controller," *SICE-ICASE International Joint Conference*, Busan, Korea, pp. 755~759.
- (6) Debruin, J., 2008, "Control Systems for Mobile Satcom Antennas," *IEEE Control Systems Magazine*, pp.86~101.