

# 수평유지장치의 $H_{\infty}$ 제어

## $H_{\infty}$ Control of Level Maintaining Device

吳榮津\* · 徐榮秀\*\*

(Young Jin Oh · Young Soo Suh)

**Abstract** - This paper is concerned with level control of a upper plate in a vehicle. The objective of control is to maintain the upper plate at level regardless of road slopes. The road slope is detected using an accelerometer-type inclinometer and  $H_{\infty}$  control method is used to simultaneously reduce effects of road slopes and sensor noises. By the simulation, it is shown that the upper plate is successfully maintained at level.

**Key Words** :  $H_{\infty}$  infinite control, Level maintaining Device, inclinometer

### 1. 서 론

공장자동화가 발전함에 따라 공장내부를 자율적으로 이동하는 자율이동체 (Autonomous Vehicle)에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다 [1]. 이러한 자율이동체가 사용되는 가장 큰 목적 중의 하나는 물체를 운반하는 것이다. 물체를 운반할 때, 바닥에 경사가 있으면 물체가 흘러내리거나 하는 등의 문제점이 발생할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 바닥의 경사때문에 생기는 자율이동체의 경사를 검지하여, 자율이동체에 붙은 판을 항상 수평으로 유지하게 하는 장치의 제어를 제안한다. 자율이동체에 붙은 판을 항상 수평으로 유지하기 위해서는 이동체의 경사를 검출하고, 이를 보정해 줄 필요가 있다.

경사계로는 수은 등의 액체를 이용한 경사계가 주를 이루어 왔는데, 최근의 반도체 기술의 발달로 초소형의 IC 형태를 가지는 가속도계를 사용해 중력가속도 벡터를 직접 측정해 경사정도를 알아내는 것이 가능해 졌다. 본 논문에서는 가속도 센서인 ADXL202를 사용하여 경사각을 측정하고 이를 통해 자율이동체의 수평유지를 이루고 있다.

가속도 센서를 사용한 자세제어의 문제는 항공 분야에서 고가의 장비를 사용한 연구가 많이 되어 왔고, 최근에는 저렴한 반도체 센서의 등장으로 이동 로봇분야에서도 연구되기

시작하였다 [2]. 또한 수평유지에 관한 연구로는 발사체 플랫폼을 시간지연제어기를 이용하여 수평제어하는 연구 [3] 등이 있다. 이 논문에서는 PID 제어기와 외란관측기를 결합하여 수평유지를 행하고 있다. 발사체 플랫폼과는 달리 자율이동체에 사용되는 저가형의 가속도계로 경사를 측정할 때에는 자체의 진동 등에 의한 경사계의 센서잡음을 효과적으로 보상할 필요가 있다. 이동체가 완만한 경사를 가진 길을 다닌다는 가정하에 경사에 의한 영향을 저주파의 신호로 보고, 경사계의 잡음을 고주파의 신호로 모델링 하는 것이 가능하다. 이 두 가지 신호 모두를 효과적으로 제거하기 위해서는 PID 제어기는 설령 존재한다고 하더라도 쉽게 찾을 수 없다. 본 논문에서는 주파수 영역의 외란 제거를 목적으로  $H_{\infty}$  제어기 [4]를 사용하여, 이동체의 판이 항상 수평을 유지하는 제어를 설계하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 대상으로 생각하는 수평유지장치에 대한 간단한 소개를 한다. 3장에서는 수평유지를 위한  $H_{\infty}$  제어기를 설계한다. 4장에서는 모의실험을 통해 제안된  $H_{\infty}$  제어기의 성능을 테스트하고, 5장에서 결론은 내린다.

### 2. 수평유지장치

본 논문에서 다루고 있는 수평유지장치를 설치한 자율이동체가 그림 1 및 그림 2에 나타나 있다.

그림 1 및 그림 2의 자율이동체는 전면의 초음파센서를 이용하여 장애물을 회피하면서 실내를 이동한다. 본 논문에서 관심을 가지고 있는 부분은 자율이동체의 윗판으로서, 이동체가 놓여있는 길의 경사각에 관계없이 항상 윗판을 수평으로 유지하는 것이 수평유지장치의 목적이다.

\* 準 會 員 : 蔚山大學 電氣電子情報시스템學科 碩士課程

\*\* 正 會 員 : 蔚山大學 電氣電子情報시스템學科 助教授 · 工博

接受日字 : 2002年 8月 7日

最終完了 : 2002年 11月 21日

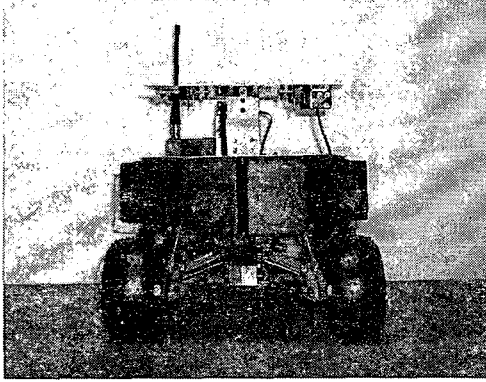


그림 1 이동체의 정면  
Fig. 1 Front of the vehicle

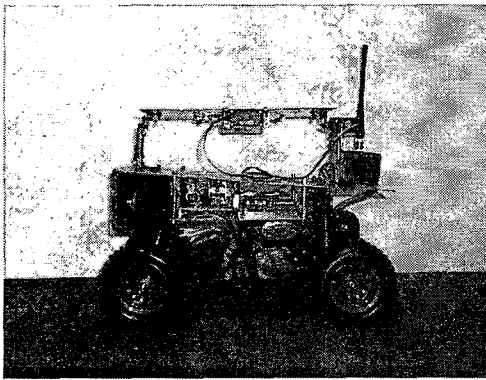


그림 2 이동체의 측면  
Fig. 2 Side of the vehicle

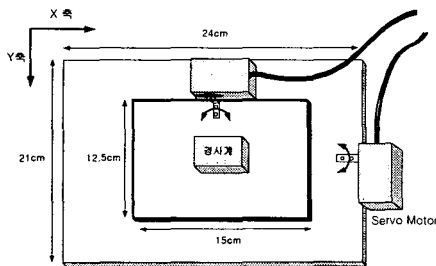
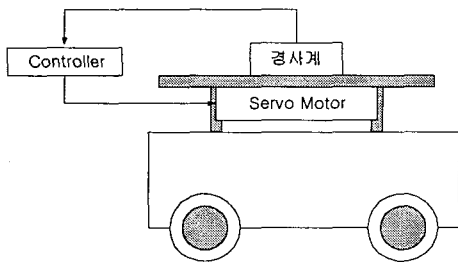


그림 3 수평유지장치 개요도  
Fig. 3 Diagram of the level maintaining device

그림 3에서 보듯이, 경사계로 차체의 경사각을 감지하여, 서보모터(Servo Motor)로 윗판을 수평으로 유지하고 있다. 대상으로 하는 수평유지장치는  $x, y$  의 두 축의 수평유지가 가능하나 본 논문에서는 이동체의 진행방향으로만 경사 (즉,  $y$  축을 회전축으로 하는 회전)가 생긴다고 가정한다.

윗판과 수평면(중력 가속도의 수직면)과의 각을 윗판 경사각  $\theta(t)$  라고 정의한다 (그림 4).

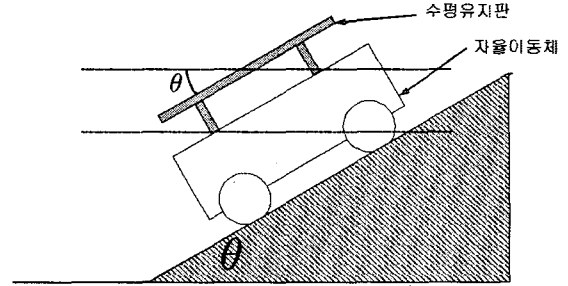


그림 4 윗판 경사각  $\theta(t)$   
Fig. 4 Inclination of the upper plate

경사계와 서보 모터를 사용한 제어기가 없는 경우에는 윗판 경사각  $\theta(t)$ 는 차체의 경사각과 동일하다. 차체의 경사각은 바닥의 경사각과 비례하므로 제어기가 없는 경우에는 윗판 경사각  $\theta(t)$ 는 바닥의 경사각과 비례한다. 본 논문에서는 바닥의 경사각의 변화를 일종의 외란으로 보고, 이 외란의 영향이  $\theta(t)$ 에 미치는 영향이 작게 되는 제어기를 설계한다. 제어기를 포함한 시스템이 그림 5에 주어져 있다.

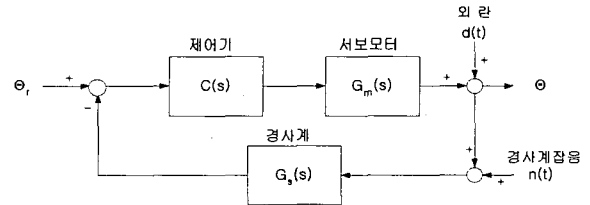


그림 5 수평유지장치 제어시스템  
Fig. 5 Level maintaining device control system

그림 5에서 제어기, 서보모터, 경사계의 전달함수는 각각  $C(s), G_m(s), G_s(s)$ 로 나타낸다. 윗판의 목표각도를  $\theta_r(t)$ 로 나타낸다. 본 논문에서는 윗판의 수평유지가 목표이므로  $\theta_r(t) = 0$ 으로 둔다. 바닥의 경사는 외란  $d(t)$ 로 모델링한다. 그림 5에서 제어기가 없으면 (즉,  $C(s) = 0$ 이면),  $\theta(t)$ 는 바닥경사각과 비례함을 알 수 있다. 또한 외란 이 없을 때에는 서보모터의 출력이 윗판 경사각을 결정함을 알 수 있다.

위치서보모터의 운동방정식은 식 (1)과 일치시스템으로 구했는데, 이는 개루프상태에서의 스텝입력을 가해서 나온 출력에서 구하였다.

$$G_m(s) = \frac{b_m}{s + a_m} \quad (1)$$

여기서  $a_m = 12.12$  및  $b_m = 12.12$ 이고, 시스템의 입력은 서보모터의 PWM 신호이고, 출력은 서보모터를 통한 윗판의 움직임이다.

경사계는 가속도계인 ADXL202을 사용한다고 가정한다. ADXL202는 다음과 같이 특정 방향으로의 동적 및 정적인 가속도를 측정하는 센서이다.

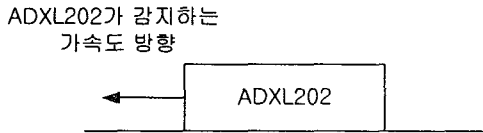


그림 6 ADXL202에 의한 가속도 검출  
Fig. 6 Acceleration detection by ADXL202

ADXL202가  $\theta$ 만큼 경사진 곳에 놓여 있으면,  $g \sin \theta$  만큼의 중력가속도가 ADXL202에 의해서 감지되게 된다.

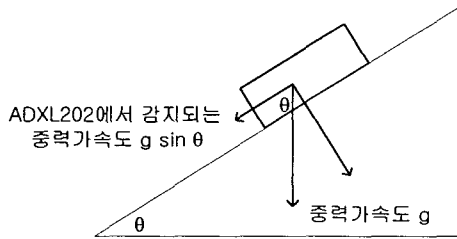


그림 7 ADXL202의 경사계로서의 사용  
Fig. 7 Use of ADXL202 as an inclinometer

경사각  $\theta$ 가 크지 않을 때에는  $\sin \theta \approx \theta$ 로 생각할 수 있으므로 가속도계의 출력은 경사각에 비례해서 나온다고 생각할 수 있다. 이러한 방식으로 구하는 경우, 윗판이 급격히 움직일 때에는 그 움직임에서 생기는 각가속도가 중력가속도에 더해져 정확한 경사각을 얻을 수 없는 단점이 있다. 이러한 각가속도의 영향 및 자체의 진동 등으로 생기는 오차를 센서의 잡음  $n(t)$ 로 나타내었다.

경사계의 운동방정식도 일차 시스템으로 표현하였고, 밴드폭은 데이터북에 나와 있는 50Hz 가 되도록 계수를 선택하였다.

$$G_s(s) = \frac{k_s(b_s s + 1)}{a_s s + 1} \quad (2)$$

여기서  $a_s = 0.02$ ,  $b_s = 0.9$  및  $k_s = 10$  이고, 시스템의 입력은 윗판의 경사정도이고, 출력은 가속도계의 전압이다.

### 3. $H_\infty$ 제어기의 설계

이 장에서는 수평유지를 위한 제어기의 설계를 다룬다. 제

어의 목적은 그림 5의  $\theta(t)$  를 외란  $d(t)$  와 경사계잡음  $n(t)$  에 관계없이 0에 가까운 값을 유지하는 것이다. 이 제어의 목적을  $H_\infty$  norm으로 나타내기 위해서는  $d(t)$  와  $n(t)$  의 성질을 알 필요가 있다. 먼저, 외란  $d(t)$  는 바닥의 경사각과 자율 이동체의 속도와 관련이 있다. 예를 들어, 자율 이동체가 그림 8과 같이 경사진 바닥을 0.5 m/s 로 달리면 (0초일 때, 0의 위치에 있었다고 가정),

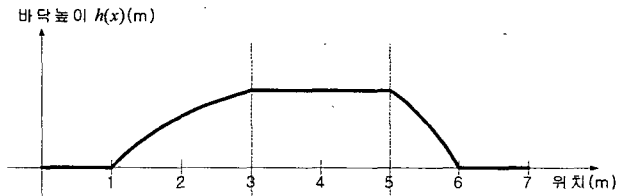


그림 8 자율이동체가 달리는 바닥의 높이의 예  
Fig. 8 Example of height profile

$t$  초일때의 위치는  $x = 0.5t$ 이고 이 지점에서의 바닥높이는  $h(0.5t)$  가 된다. 이러한 바닥을 달리는 자율이동체가 경험하는 경사를 외란  $d(t)$  로 나타내면  $d(t) = \frac{dh(x)}{dx} \Big|_{x=0.5t}$  로 계산되고, 그 그래프는 다음과 같다.

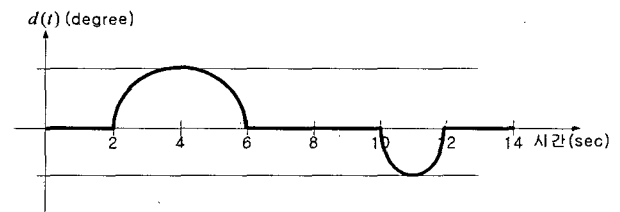


그림 9 외란  $d(t)$  의 예  
Fig. 9 Example of disturbance  $d(t)$

자율 이동체가 다니는 길의 바닥이 울퉁불퉁하고 이동체의 속도가 빠를수록,  $d(t)$  의 고주파 성분이 많아지게 된다. 자율 이동체가 다니는 길의 바닥이 완만한 경사로 되어있고(대부분의 실내 바닥이 그렇듯이), 자율 이동체의 속도가 빠르지 않다고 가정하면,  $d(t)$  의 성분은 대부분 저주파 성분이 모여있다고 할 수 있다. 따라서  $d(t)$  에 대해서 다음과 같은 가정을 둔다.

가정 I :  $|d(jw)|$ 는  $w \geq 1$  rad/sec에서는 무시할 수 있는 정도로 작다.

바닥의 경사에 관계없이 윗판 경사각  $\theta$ 를 0으로 유지하기 위해서는  $T_{db}$  ( $d$ 에서  $\theta$ 까지의 페루프 전달함수)를 가능한 한 작게 만들어야 한다. 이것은 가정 I를 사용하여, 다음과 같은  $H_\infty$  norm조건으로 나타낼 수 있다.

$$\text{minimize } \|w_1 T_{d\theta}\|_{\infty} \quad (3)$$

여기서 가중치 함수  $w_1$ 은 다음과 같이 2차의 Butterworth 필터로 선택하였다 [5].

$$w_1(s) = \frac{105}{s^2 + 1.414s + 1} \quad (4)$$

그림 10에  $w_1(j\omega)$ 의 Bode 그래프가 주어져 있는데,  $|w_1(j\omega)|$ 의 값이  $\omega$ 가 1 rad/sec 이하일 때에는 큰 값을 가지고,  $\omega$ 가 1 rad/sec 이상일 때에는 작은 값을 가지도록 되어 있다. 따라서, (3)의  $H_{\infty}$  norm을 작게하면,  $\omega$ 가 1 rad/sec 이하일 때의  $|T_{d\theta}(j\omega)|$ 의 값이 작아지게 된다.

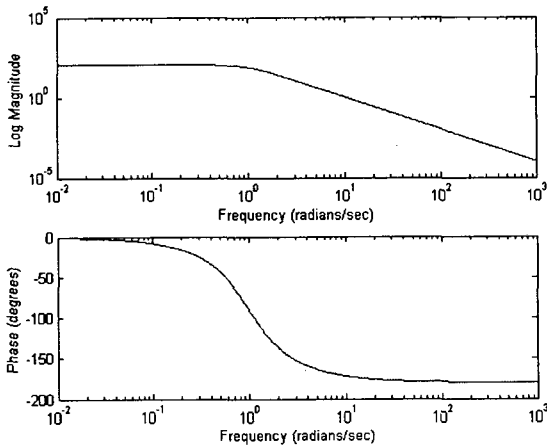


그림 10  $w_1(j\omega)$ 의 Bode 그래프  
Fig. 10  $w_1(j\omega)$  Bode plot

가속도계인 경사계는 센서 자체의 오차와 이동체의 진동에 서 오는 오차를 포함하고 있다. 센서 자체의 오차는 전주파 수에서 일정한 백색잡음의 형태를 가진다 [6,7]. 사용되는 경 사계는 가속도계이기 때문에 이동체의 진동의 영향을 크게 받는데, 바퀴의 모터 등의 진동에 의해 나타나는 잡음은 고주 파의 성분으로 모델링할 수 있다. 이동체의 움직일 때에는, 센서 자체의 백색잡음보다 모터 등의 진동에 의한 고주파 성 분이 훨씬 더 크기 때문에, 가속도계의 잡음을 나타내는  $n(t)$ 는 고주파 성분이 크다고 가정할 수 있다.

가정 II :  $|n(j\omega)|$ 는  $\omega \leq 100$  rad/s 에서는 작은 값을 가진 다.

따라서 경사계의 잡음이 윗판 경사각에 미치는 영향을 작 게 하는 조건은, 다음과 같은  $H_{\infty}$  norm조건으로 나타낼 수 있다.

$$\text{minimize } \|w_2 T_{n\theta}\|_{\infty} \quad (5)$$

여기서  $T_{n\theta}$ 는  $n$ 에서  $\theta$ 까지의 페루프 전달함수이고,  $w_2$ 는 다음과 같이 2차의 Butterworth 필터로 선택하였다.

$$w_2(s) = \frac{55s^2}{s^2 + 141.4s + 10000} \quad (6)$$

그림 9에  $w_2(j\omega)$ 의 Bode 그래프가 주어져 있다.

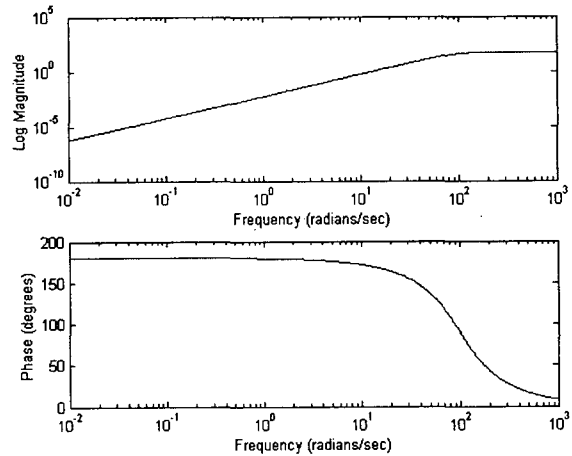


그림 11  $w_2(j\omega)$ 의 Bode 그래프

Fig. 11  $w_2(j\omega)$  Bode plot

식 (3) 및 (5)를 정리하면 다음과 같은  $H_{\infty}$  제어기  $C(s)$ 의 설계 문제가 된다.

- (i) 페루프가 내부 안정해야 한다.
- (ii)  $\|w_1 T_{d\theta}\|_{\infty}$ 를 가능한 한 작게 한다.
- (iii)  $\|w_2 T_{n\theta}\|_{\infty}$ 를 가능한 한 작게 한다.

전달함수  $T_{d\theta}(s)$ 와  $T_{n\theta}(s)$ 는 감도함수 (sensitivity function)  $S(s)$  및 상보감도함수 (complimentary sensitivity function)  $T(s)$ 와 관련이 있다.

$$T_{d\theta}(s) = \frac{1}{1 + G_m(s)C(s)G_s(s)} = S(s) \quad (7)$$

$$T_{n\theta}(s) = \frac{-G_m(s)C(s)G_s(s)}{1 + G_m(s)C(s)G_s(s)} = -T(s) \quad (8)$$

따라서, 수평 유지 문제는 다음의 혼합 감도 문제(mixed sensitivity problem)로 나타낼 수 있다.

혼합 감도 문제 : 페루프를 내부 안정하게 하는 제어기 중 에서, 식 (9)의  $H_{\infty}$  norm을 최소화하는  $C(s)$ 를 찾는 문제 이다.

$$\left\| \begin{matrix} w_1(s)S(s) \\ w_2(s)T(s) \end{matrix} \right\|_{\infty} \quad (9)$$

위의 문제를 풀기 위해서 일반화 시스템  $P(s)$ 를 사용한다.

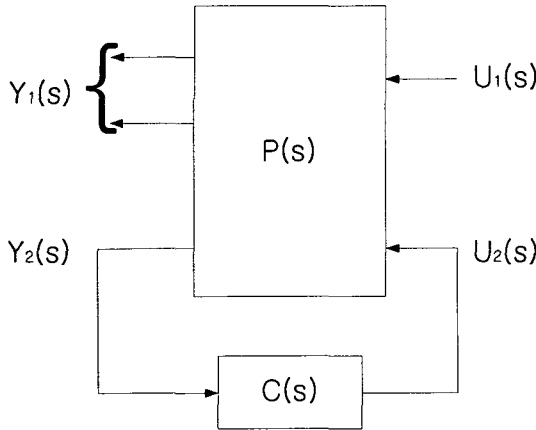


그림 12 일반화 시스템  $P(s)$  및 제어기  $C(s)$   
Fig. 12 Generalized system  $P(s)$  and controller  $C(s)$

제어기를 연결한 폐루프의  $u_1$ 에서  $y_1$ 의 전달 함수가  $\begin{bmatrix} w_1 S \\ w_2 T \end{bmatrix}$ 가 되도록  $P(s)$ 를 구축하는데,  $P(s)$ 의 전달함수는 다음과 같다.

$$P(s) = \begin{bmatrix} w_1(s) & -w_1(s)G_m(s)G_s(s) \\ 0 & w_2(s)G_m(s)G_s(s) \\ I & -G_m(s)G_s(s) \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (9)를 최소화하는 제어기를 구하는 문제는 표준적인  $H_{\infty}$  제어기를 구하는 문제로서 제어기는 두 개의 Riccati 방정식에서 구할 수 있다 [8]. 제어기의 계산은 MATLAB의  $\mu$  toolbox의 hinfsyn 함수 [9]를 사용하여 구하였다. 식 (10)은 hinfsyn을 사용하기 위해 만족해야 하는 조건중의 하나인  $D_{21}$ 이 완전계수(full rank) 여야 한다는 조건을 만족하지 않기 때문에,  $D_{21}$ 에 다음과 같이 거의 영에 가까운 값을 더하였다.

$$D_{21} = 0.00000000001 \quad (11)$$

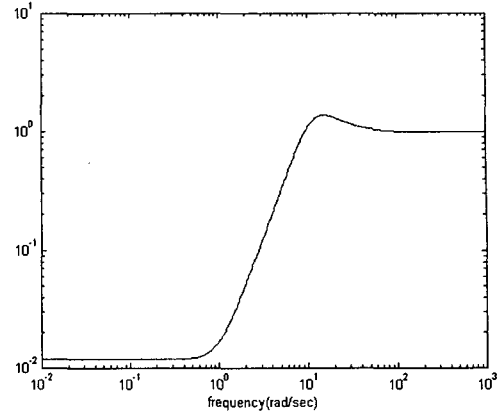
구해진 제어기  $C(s)$ 는 다음과 같다.

$$C(s) = \frac{M(s)}{F(s)}, \text{ where} \quad (12)$$

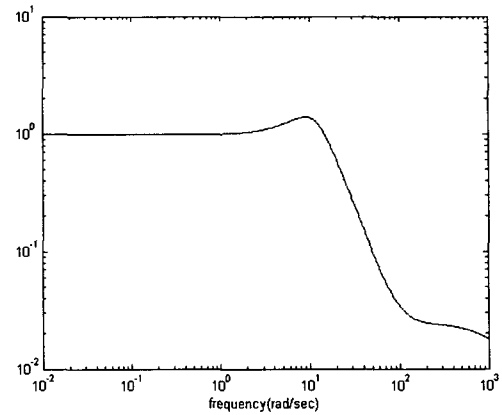
$$M(s) = 1.18 \times 10^{-6} s^5 + 2.479 \times 10^{-4} s^4 + 0.02446 s^3 + 1.001 s^2 + 13.28 s + 50.02$$

$$F(s) = 10^{-16} s^6 + 4.913 \times 10^{-6} s^5 + 0.005557 s^4 + 0.4088 s^3 + 6.558 s^2 + 8.866 s + 5.986$$

제어기를 연결했을 때의  $|S(j\omega)|$ ,  $|T(j\omega)|$ 는 다음과 같다.



(a)  $|S(j\omega)|$



(b)  $|T(j\omega)|$

그림 13  $|S(j\omega)|, |T(j\omega)|$ 의 그래프

Fig. 13  $|S(j\omega)|, |T(j\omega)|$  graph

그림 13에서  $|S(j\omega)|$ 는  $\omega \leq 1$  rad/sec 일 때 작은 값을 가져 바닥 경사의 영향을 줄이고 있음을 알 수 있다. 또한  $|T(j\omega)|$ 는  $\omega \geq 100$  rad/sec 일 때 작은 값을 가져 경사계의 진동 등에 의한 잡음을 효과적으로 제거하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 모의 실험

3장에서 구한 제어기는 6차인데 아주 빠른 다이내믹스와 느린 다이내믹스가 혼재되어, 계산하는데 수치적인 어려움이 있기 때문에, Balanced truncation을 이용하여 저차로 근사화하였다 [10]. Balanced truncation은 시스템의 차수를 줄이는 근사화 기법의 하나로서, 먼저 시스템을 Balanced realization의 형태로 바꾸어, 가장 시스템에 영향을 적게 미치는 부분을 잘라내어 차수를 낮추는 방법이다. Balanced truncation은 근사화하는데 필요한 계산량이 작고, 비교적 근사오차가 작은 근사화 방법이다.

식 (12)의 6차의 제어기의 Hankel 특이치 (singular value)는 다음과 같이 주어진다.

4.9973, 1.1349, 0.1201, 0.1046, 0.0084, 0.0002

위의 값에서 Hankel 특이치의 값이 0.2이하에 해당하는 부분을 제거하여, 다음과 같은 2차의 근사화된 제어기를 얻을 수 있다.

$$C_{reduced}(s) = \frac{1.785s + 7.223}{s^2 + 1.337s + 0.935} \quad (13)$$

Balanced truncation의 성질 [10]에서 다음과 같이  $C(s)$ 와  $C_{reduced}(s)$ 는 큰 차이가 나지 않음이 보장되어 있다.

$$\|C(s) - C_{reduced}(s)\|_{\infty} \leq 2(0.1201 + 0.1046 + 0.0084 + 0.0002) = 0.4666$$

이 제어기를 사용하였을 때 페루프는 내부안정성은 보장되지 않기 때문에 확인을 해 보아야 되는데, 다행히도 (13)의 제어기를 사용한 경우 페루프는 내부 안정하였고,  $|S(j\omega)|$ ,  $|T(j\omega)|$ 는 다음과 같다.

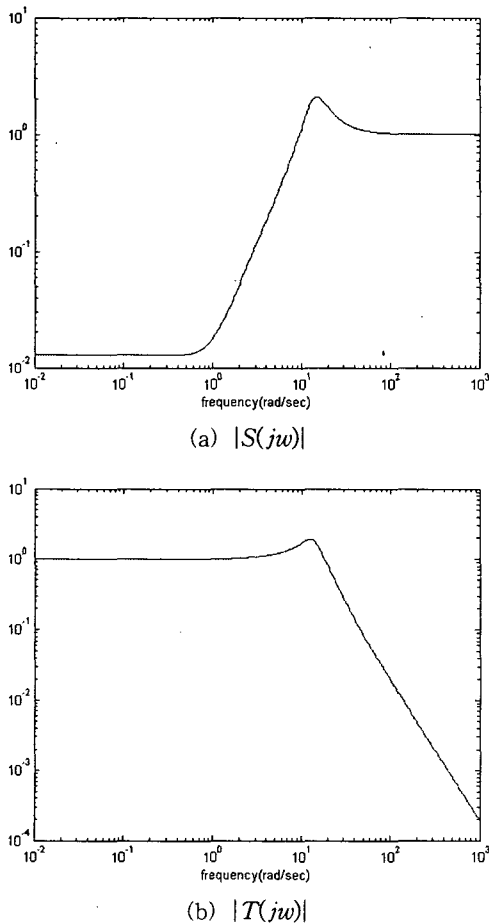


그림 14  $C_{reduced}(s)$ 를 사용했을 때의  $|S(j\omega)|$ ,  $|T(j\omega)|$ 의 그래프

Fig. 14  $|S(j\omega)|$ ,  $|T(j\omega)|$  graph using  $C_{reduced}(s)$

6차의 제어기를 사용했을 때의 그림 13과 비교하면, 비슷한 특성을 가짐을 알 수 있다. 제안된 제어기의 성능을 테스트하기 위해 모의 실험을 행하였다. 외란  $d(t)$ 에는 0.5 rad/sec의 다음과 같은 사인파를 사용해, 이동체가 완만히 경사진 길을 가는 상황을 재현하였다.

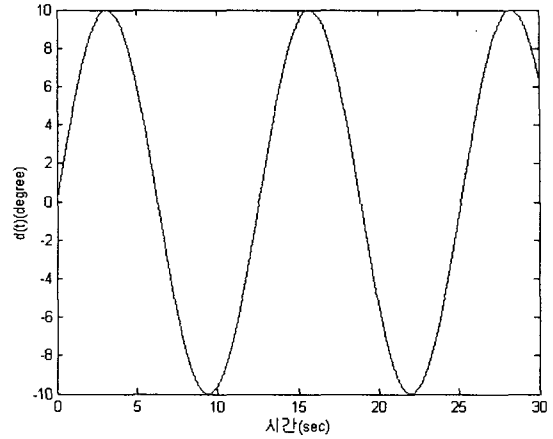


그림 15 모의 실험을 위한  $d(t)$

Fig. 15  $d(t)$  for simulation

경사각 잡음  $n(t)$ 는 백색 잡음 (white noise)을 high pass filter에 통과시켜 고주파에 잡음이 있는 상황을 고려하였다.

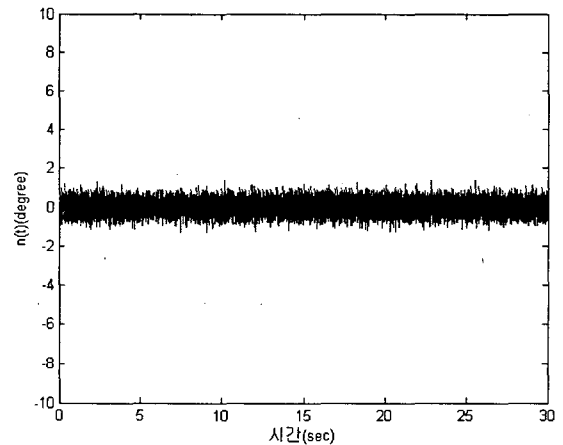


그림 16 모의 실험을 위한  $n(t)$

Fig. 16  $n(t)$  for simulation

식 (13)의 제어기를 사용하였을 때 위의 경사각의 그래프가 다음에 주어져 있다.

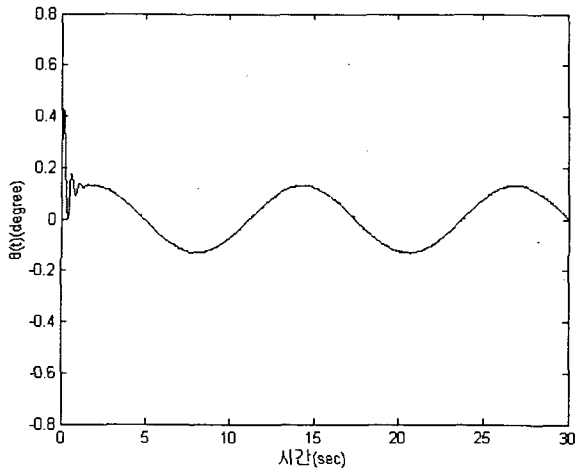


그림 17 모의 실험의  $\theta(t)$   
 Fig. 17  $\theta(t)$  for simulation

그림 17에서 보듯이 고주파 성분인 경사계, 잡음  $n(t)$ 는 거의 완벽하게 제거되고, 바닥의 경사계에 의한 외란  $d(t)$ 는 1/100로 감쇄됨을 알 수 있다. 비교를 위하여 간단한 PI 제어기를 사용한 경우를 그림 18 및 19에 표시하였다. 그림 18에서는 고주파 경사계 잡음  $n(t)$ 는 잘 제거하고 있으나 외란  $d(t)$ 는 1/20로 감쇄되어 제안한 제어기보다 경사의 영향을 효과적으로 제거하지 못하고 있음을 알 수 있다. 그림 19에서는 반대로  $n(t)$ 의 제거가 미흡함을 알 수 있다. 단순한 1차 제어기로는 고주파 성분의 경사계 잡음  $n(t)$ 와 저주파 외란  $d(t)$ 를 동시에 제거하는 것이 쉽지 않음을 알 수 있다.

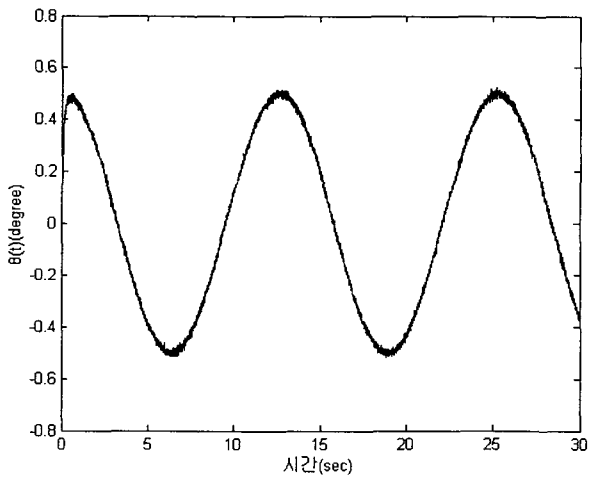


그림 18 비례게인=0.1, 적분게인=1의 경우  
 Fig. 18 Case of P=0.1, I=1

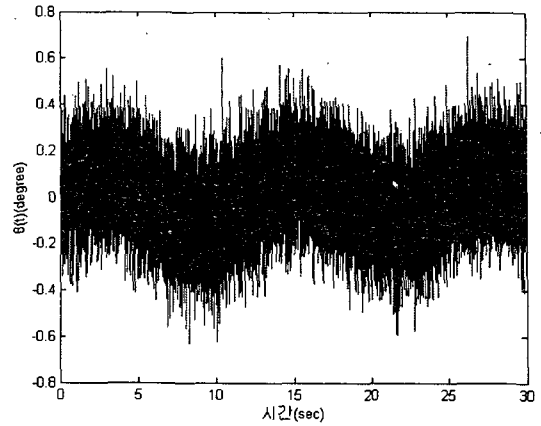


그림 19 비례게인=10, 적분게인=1의 경우  
 Fig. 19 Case of P=10, I=1

### 5. 결 론

본 논문에서는 자율이동체의 수평유지를 위한  $H_\infty$  제어를 제안하였다. 자율이동체가 경사진 곳을 이동할 때에도 이 경사를 측정하여 자율이동체의 윗판을 항상 수평을 유지하는 제어를 제안하였다. 경사는 저가의 가속도계 형태의 경사계를 사용하여 측정하였는데, 이러한 가속도계로 측정할 때에는 차체의 진동 등에 의한 센서의 잡음을 효과적으로 제거하는 것이 중요하다. 이를 위해 바닥의 경사에 의한 외란을 저주파의 신호로 보고, 경사계의 잡음을 고주파의 신호로 보아, 이 두 신호를  $H_\infty$  norm 조건으로 나타내어,  $H_\infty$  제어를 설계하였다. 모의 실험을 통해 제안된  $H_\infty$  제어기가 경사계의 잡음에도 불구하고 바닥의 경사의 영향을 효과적으로 줄여, 윗판이 수평상태를 유지하는 것을 확인하였다.

### 감사의 글

이 논문은 2002년 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] 박규철, 정학영, "이동로봇의 항법장치," 전기학회지 제 50권, 8호, pp. 25-30, 2001.
- [2] B. Barshan and H.F. Durrant-Whyte, "Inertial Navigation Systems for Mobile Robots," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 11, pp. 328-342, June 1995.

[3] 홍길호, 정경민, 김준식, 오준호, “루프형성 시간지연제어를 이용한 플랫폼의 수평제어,” 한국자동제어학술회의 논문집, pp. 1025-1030, 1994.

[4] J. C. Doyle, B. A. Francis and A. R. Tannenbaum, Feedback Control Theory, Macmillan Publishing Co., 1992.

[5] W. Siebert, Circuit, Signals, and Systems, The MIT Press, 1985.

[6] F. Mohd-Yasin, C. E. Korman and D. J. Nagel, “Measurement of noise characteristics of MEMS accelerometers,” Semiconductor Device Research Symposium, pp. 190-193, 2001.

[7] Analog Device Data Sheet: ADXL 202 Low Cost Dual Axis iMEMS Accelerometers with Digital Output

[8] J.C. Doyle, K.Glover, P.P. Khargonekar, and B.A. Francis, “State-space solutions to standard  $H_2$  and  $H_\infty$  control problems,” IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 34, pp. 831-847, 1989.

[9] G. Balas et al.,  $\mu$  Analysis and Synthesis Toolbox User’s Guide, The Mathworks, 2001

[10] M. Green and D. J. N. Limebeer: Linear Robust Control, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1995.

## 저 자 소 개



### 오 영 진(吳榮津)

1976년 10월 27일생. 2002년 울산대 공대 제어계측과 졸업. 2002년~현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학과 석사과정.



### 서 영 수 (徐榮秀)

1967년 10월 6일생. 1990년 서울대 공대 제어계측과 졸업. 1992년 동 대학원 제어계측과 졸업(석사). 1997년 동경대학교 계수공학과 졸업(공학박). 2000~현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 조교수