

# 신호 압축법을 이용한 시선안정화 제어용 짐벌의 동특성 규명

김문식\*, 유기성\*\*, 윤정주\*\*\*, 이민철#

## Identification of Dynamic Characteristics of Gimbals for Line-of-Sight Stabilization Using Signal Compression Method

Moon Sik Kim\*, Gi Sung Yoo\*\*, Jung Joo Yun\*\*\* and Min Cheol Lee#

### ABSTRACT

The line-of-sight(LOS) stabilization system is a precision electro-mechanical gimbals assembly for suppressing vibration due to its environment and tracking the target in a desired direction. This paper describes the design of gimbals system to reject the disturbance and to improve stabilization. The controller consists of a DSP with transducer and actuator interfaces. Unknown parameters of the gimbals are estimated by the signal compression method. The cross-correlation coefficient between the impulse response from the assumed model and the one from model of the gimbals is used to obtain the better estimation. The quasi-impulse response through linear element included in the gimbals could be obtained by the signal compression method. The unknown parameter of the linear element could be estimated as comparing the bode plots for impulse response from gimbals with them from model's response.

**Key Words** : Line-of-sight stabilization (시선안정화), Gimbals (짐벌), Cross-correlation coefficient (상호상관계수), Signal compression method (신호 압축법)

### 1. 서론

무인 항공기(UAV : unmanned aerial vehicle)란 용어는 1980년대 말부터 미국 국방부에서 UAV의 회수 여부나 조종방식을 떠나 모든 무인 항공기를 통칭하여 정의하고 있다.<sup>1</sup> 유인 비행기는 조종사 인명 손실의 위험이 상존하며, 열악한 환경에서 작업을 하기에는 위험이 따르지만, UAV는 인명 손실

의 위험이 작다는 큰 장점을 가지고 있다. 이로 인해 UAV는 군에서는 군사적인 정찰기로 활용을 하고 있으며, 민간에서는 항공 영상을 얻거나, 광범위한 장소를 감시하는 목적으로 사용된다.<sup>2</sup> 이러한 무인항공기의 경우 영상 시스템은 지상의 관리자에게 필요한 정보를 제공해 주는데 중요한 역할을 하며, 항공기의 무인항행을 위해 필수적인 장비이다. 특히 시선안정화(LOS : line of sight) 시스

☞ 접수일: 2007년 3월 2일; 게재승인일: 2008년 3월 25일  
\* 부산대학교 지능기계공학과  
\*\* 포항산업과학연구원 기전자동화연구실  
\*\*\* 현대모비스 샤프부품설계팀  
# 교신저자: 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구원  
E-mail: mclee@pnu.edu Tel. (051) 510-2439

템은 CCD 카메라와 같은 영상 센서를 이용하여 센서의 시선이 추적하고자 하는 목표물을 지향하면서, 동시에 시스템이 동작하는 환경하의 모든 외란에 대해 시선의 상태가 안정 되도록 영상센서의 방향을 정밀 제어하는 장치로 무인항공기 분야에서 매우 중요하다.

국내에서는 대학 및 무인 항공기 개발 업체를 중심으로 무인 항공기용 짐벌(gimbals)을 개발하고 있으며 최근에는 군사용으로도 개발이 이루어지고 있다. 하지만 짐벌에 대한 동특성 규명과 같은 학술적인 연구는 미비한 상태이며 최근에 유압식 짐벌 시스템에 대해  $H_{\infty}$  와 같은 고급 제어의 적용에 대한 연구가 진행되고 있다. 국외에서는 미국 등을 중심으로 무인 항공기와 그에 따른 짐벌 시스템의 제작과 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 짐벌 시스템을 장착한 무인 정찰기가 군사용으로 개발되어 정밀 정찰 영상의 획득과 사격 통제 정확도 향상 용도로 실전에 배치되고 있다. 특히 국내외적으로 짐벌 시스템을 장착한 무인 항공기는 군사적 용도 이외에도 엔터테인먼트 산업과 관련하여 방송/영화 촬영, 스포츠 관련 산업 등에도 사용되고 있다.

하지만 기체에 장착된 짐벌 시스템은 기체에서 발생하는 진동이 영상 센서를 진동시켜 고화질, 고선명의 영상을 얻기가 어렵다. 또한 영상 신호를 이용해서 특정 목표물을 추적하는 실시간 무인 감시, 항법 제어, 항공기 추적 시스템에도 영상 센서가 장착된 모체의 이동에 따른 진동이나 마찰력 등 여러 외란들이 시선 안정화 제어를 어렵게 한다. 특히 강인성을 지닌 슬라이딩 모드 제어 등 고급제어 알고리즘을 적용하기 위해서는 시스템의 동특성을 나타내는 기본적인 모델식이 필요하다. 모델식이 실제 시스템에 가까울수록 제어부분에서의 불확실한 동특성에 대한 보상을 할 수가 있으며, 제어성능을 높일 수 있기 때문이다. 이에 진동, 외란 등 비선형성분이 어느 정도 존재하더라도 그 시스템의 선형적인 모델식을 구하는 것이 필요하다.

이에 본 논문에서는 무인 항공기를 위한 시선 안정화 시스템에 필요한 짐벌을 개발하고 그 동특성을 규명하고자 한다. 짐벌의 동특성 규명에는 짐벌의 비선형 요소를 제외한 선형 요소의 미지의 파라미터를 추정할 수 있는 신호 압축법을 이용한다. 이를 통해 무인 항공기의 시선 안정화 제어 시

스템의 설계를 위한 짐벌의 동특성을 규명하고자 한다.

## 2. 시스템 구성

### 2.1 기구부

짐벌의 기구부는 기어, 타이밍 벨트, 링크 구조로 설계 제작 되었다. Fig.1 은 개발된 짐벌의 기구적인 개념도를 나타내며, Fig.2 는 실제 짐벌 시스템을 나타낸다. 짐벌은 세가지 방향의 회전 운동이 가능하고 짐벌의 회전운동에 따른 카메라의 시점 변화를 방지하기 위하여 회전 운동의 중심이 카메라의 시점 중심과 일치하도록 기구부를 설계한다. 그리고 2 축의 각도 센서를 장착하여 짐벌에 가해지는 진동 특성을 파악할 수 있게 한다. 장착된 각도 센서는 롤, 피치축의 각도 정보를 얻는데 사용된다.

롤(roll)과 피치(pitch)축은 2 개의 DC 모터를 장착하여 제어할 수 있게 하고, 요(yaw)축은 RC 모터를 장착하여 사용자가 조종기에 의해 임의대로 운전할 수 있도록 설계한다. 특히 본 짐벌 시스템은 영상 떨림 보정 기능이 내장된 디지털 캠코더를 사용하여 영상 특성이 기존 짐벌에 비해 뛰어나며 롤축의 자유도를 추가하여 기체의 롤축 회전 운동에 대해서도 물체 추적과 같은 기능을 구현할 수 있도록 설계하였다. 짐벌의 기구학적인 사양은 Table 1 에, 운동학적인 사양은 Table 2 에 나타내었다. 또한 각축에 사용된 구동 모터의 사양은 Table 3 에 나타내었다.

### 2.2 센서신호처리 및 제어부

시선 안정화를 위한 짐벌의 전용 제어기의 구성은 크게 센서 신호 처리부와 제어부로 나누어 개발한다. 센서 신호 처리부는 짐벌 각 축에 가진 되는 진동의 크기와 방향을 알기 위해 2 축 각도 센서의 신호를 처리하여 제어부에 전송하는 역할을 담당한다. 제어부는 센서 신호 처리부에서 전송한 2 축 가속도 센서 정보를 입력으로 이용하여 각축의 모터를 제어하는 역할을 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 32 비트 고속 신호 처리 프로세서인 TI 사의 TMS320VC33-150 을 기반으로 전용 제어기를 제작한다.

Fig. 3(a)는 본 논문에서 개발된 DSP 제어 시스템을 Fig. 3(b)는 DSP 제어 시스템 구성을 보여준

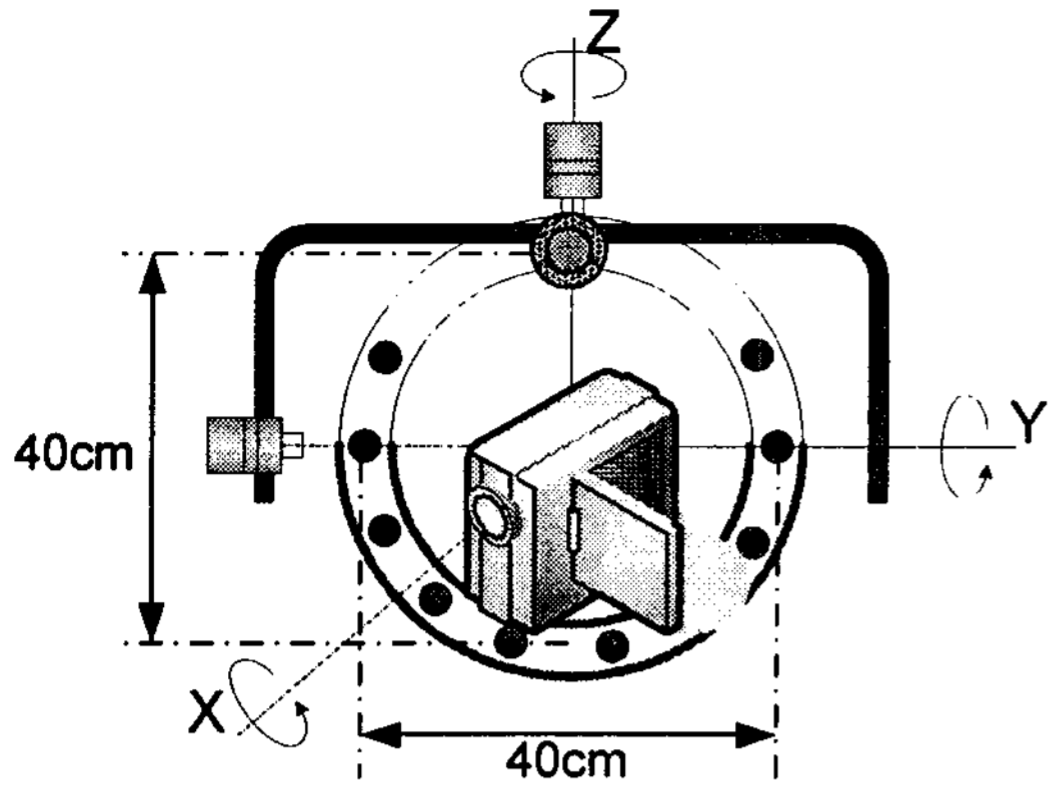


Fig. 1 Layout of the gimbals

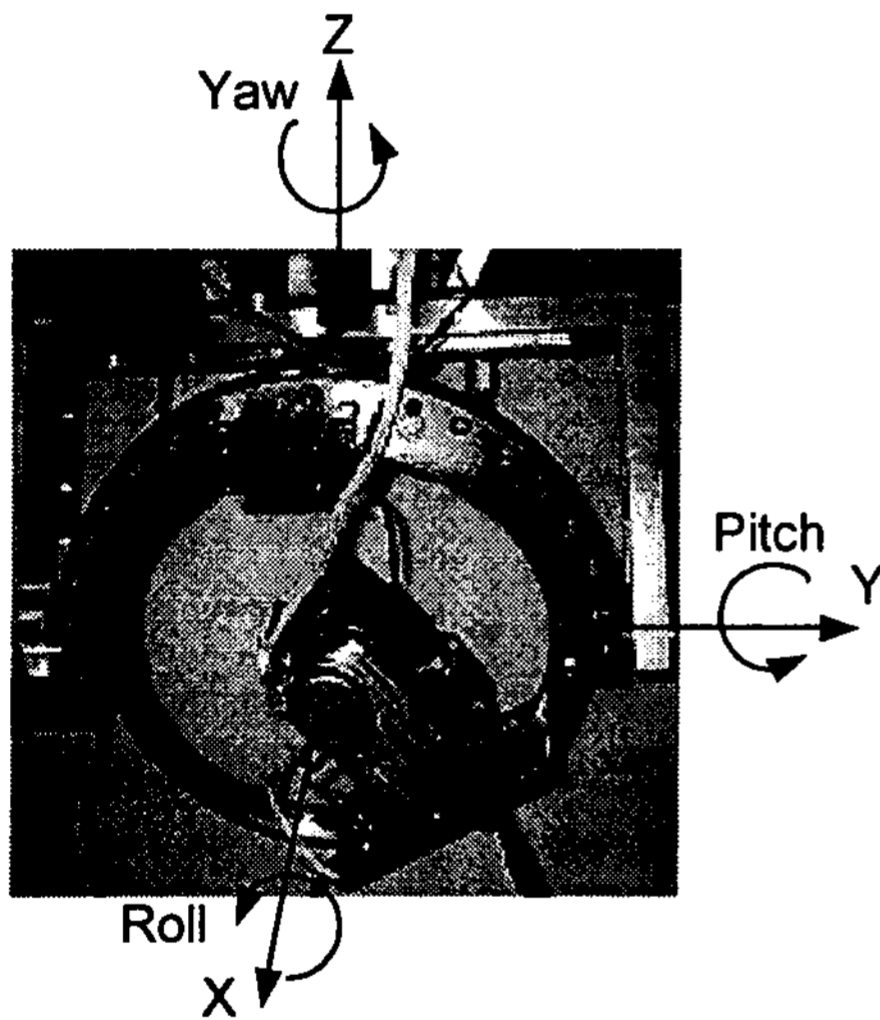


Fig. 2 Picture of the gimbals

Table 1 Parameter of the gimbals design

Item	Specification
Radius of Roll Axis	20cm
Radius of Pitch Axis	20cm
Radius of Yaw Axis	25cm
Payload of Camcorder	0.435kg

Table 2 Kinematical limitation of the gimbals

Motion	Excursion
Roll	$\pm 30^\circ$
Pitch	$\pm 80^\circ$
Yaw	$\pm 80^\circ$

Table 3 Specification of motors mounted on the gimbals

Motion	Torque	Speed
Roll	13 kg.cm	0.13 sec/60°
Pitch	13 kg.cm	0.13 sec/60°
Yaw	13 kg.cm	0.13 sec/60°

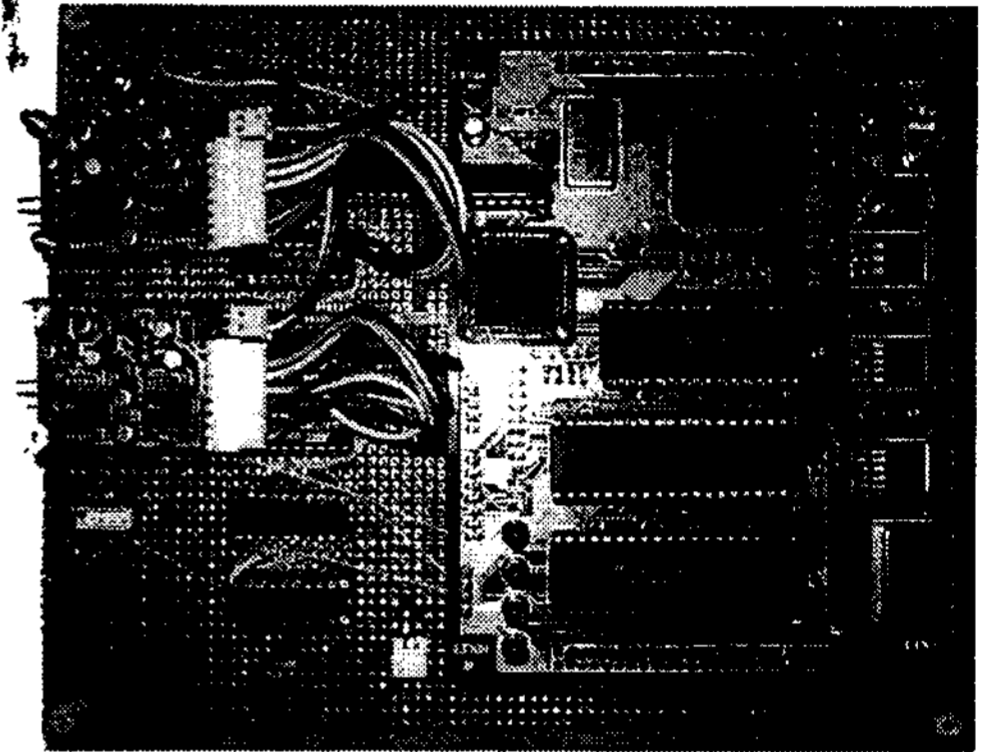


Fig. 3(a) DSP motion control board

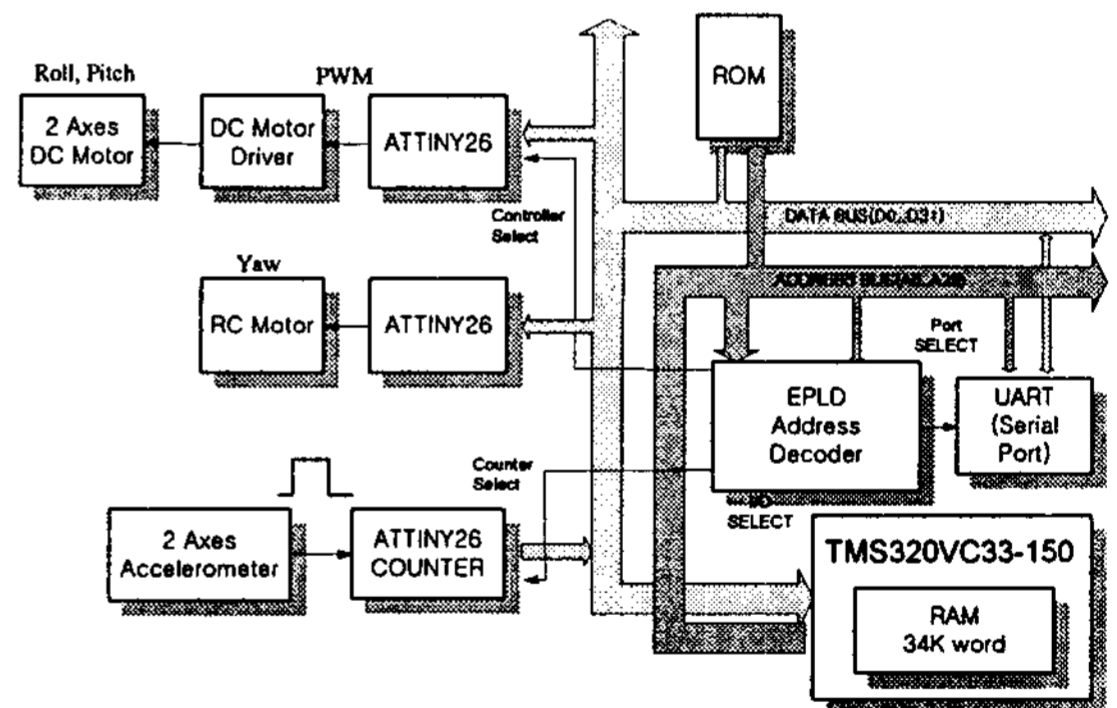


Fig. 3(b) Schematic diagram of the DSP motion control board

다. DSP 제어 시스템은 Texas Instrument 사에서 개발된 최대 150MIPS 의 연산 속도를 가지는 TMS 320VC33-150 을 사용하였다. 또한 이 DSP 는 내부에 32Kword 의 램을 내장하고 있어 외부에 별도의 프로그램 및 데이터 램을 필요로 하지 않는다. 이는 DSP 회로 설계에 있어 상당한 편리를 제공한다.

짐벌의 각 축의 기울어진 각도 정보를 얻기 위해 Analog Device 사의 칩 형태로 제작된 2 축 가속도센서인 ADXL202 를 사용하였다. 이 센서를

이용해서 짐벌의 롤, 피치축의 각도 정보를 알 수 있는데 각축의 각도 정보는 PWM 듀티비가 지면에 대해 기울어진 각도만큼 변화하는 형태로 출력된다. 이와 같은 PWM 출력 방식은 기존의 전압 출력 방식과는 달리 별도의 A/D 컨버터 회로 없이 마이크로 컨트롤러에 직접 인터페이스 할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서는 이 PWM 출력의 펄스폭을 ATMEL 사의 ATTINY26 으로 측정하여 데이터 버스 형태로 DSP 에 전송하는 방식으로 제작하였다.

짐벌의 롤축, 피치축 구동용 DC 모터의 제어를 위해 DC 모터 드라이버를 직접 개발하였다. 이를 위해 IOR사의 high/low side driver N-FET 을 사용하여 정격전압 10V 에서의 허용전류가 최대 11A 이고 순간 최대 전류는 90A 인 DC 모터 드라이버를 개발하였다. 일반적으로 DC 모터를 PWM 신호로 구동할 때는 PWM 주파수가 클수록 모터의 진동이 감소하여 부드러운 동작이 가능한데 개발된 DC 모터 드라이버는 약 33MHz 까지의 PWM 입력을 받을 수 있어 모터 구동시 진동을 최소화 할 수 있다. 이러한 특징은 기존의 상용 DC 모터 드라이버보다 우수한 특징이라 할 수 있다.

### 3. 신호 압축법에 의한 짐벌의 동특성 규명

#### 3.1 신호 압축법의 원리

단일 입출력을 가지는 임의의 선형 시스템의 미지 파라미터는 그 시스템의 전달함수와 같은 특성을 나타내는 임펄스응답에 의하여 구할 수 있다. 그러나 임펄스 신호를 실제 시스템에 적용하기에는 시스템에 무리가 따른다. 신호 압축법에서는 이러한 점을 개선시켜 쉽게 임펄스응답을 얻을 수 있는 방법을 제시한다. 파라미터의 추정 방법으로는 보드선도 비교법과 상호상관계수를 적절히 응용한다.<sup>3-5</sup>

시스템의 주파수 응답을 측정하기 위한 입력 신호는 넓은 주파수 범위에서 평탄한 파워 스펙트럼을 가지는 것이 바람직하다. 필요한 주파수 영역까지 임펄스 특성을 가진 파형을 푸리에 변환하고 주파수 영역에서 위상 지연을 가져오는 수학적인 신장필터를 통과시키면, 주파수 특성이 일정한 파워를 가지면서 위상 지연을 가진 신호를 만들 수 있다. 이 신호를 역 푸리에 변환에 의해 시간 영역으로 바꾸면, Fig. 4 와 같은 진폭의 크기는 작고, 시

간적으로 긴 시험신호가 구해진다. 여기서 구한 시험 신호를 측정대상인 시스템에 입력하여 측정 한 출력을 주파수 영역에서 위상 전진을 가지는 필터를 통과시킨 후 역푸리에 변환시키면 시간영역에서의 임펄스응답이 구해진다. 이러한 방법으로 등가 임펄스응답을 구하는 것을 신호 압축법이라 하고, 그 개략도는 Fig. 5 와 같다.<sup>3-5</sup>

신호 압축법을 이용하면 선형 성분의 경우 교환법칙이 성립하므로 압축과정에서 신장필터와 압축필터의 상쇄가 이루어져 선형 성분의 임펄스응답이 구해진다. 그러나 비선형 성분의 경우 교환법칙이 성립하지 않아 신장필터와 압축필터의 상쇄가 이루어지지 않으므로 압축과정에 의해 시간영역으로 바뀌어도 비선형 성분은 선형 성분의 임펄스응답과는 다른 영역에서 많이 나타난다. 이러한성질을 이용하면 비선형 시스템에서 선형 성분과 비선형 성분이 분리될 수 있어 선형 성분만

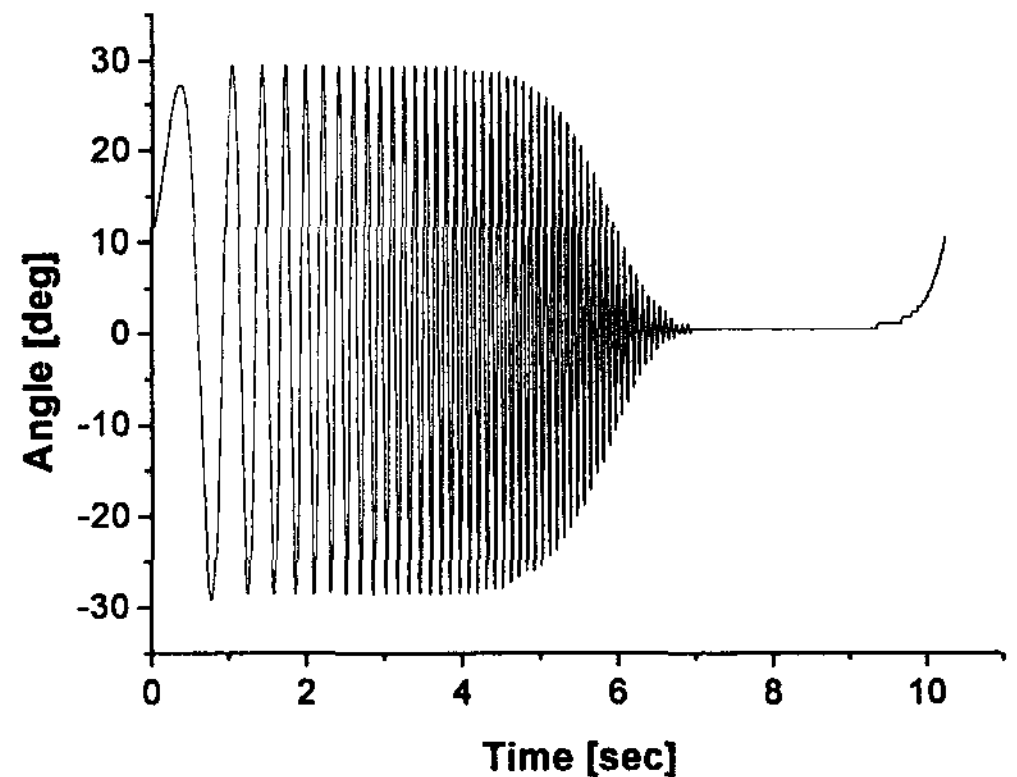


Fig. 4 Test signal of signal compression method

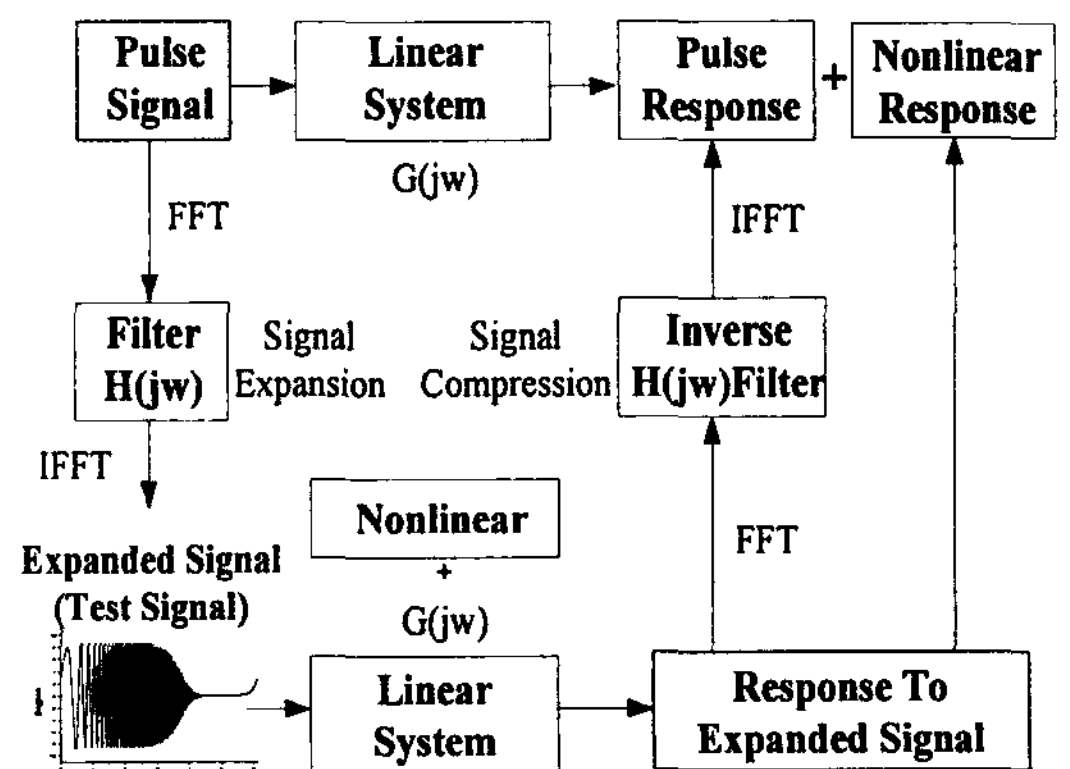


Fig. 5 Principle of signal compression method

의 임펄스응답을 구할 수 있다. 본 논문에서는 주파수의 제곱에 비례하는 위상 특성을 가진 필터를 사용하였다.  $N$  점의 이산 시험신호를 구하기 위해 특정 대상이 필요로 하는 주파수 영역까지는 임펄스 특성을 가진 파워스펙트럼을 가지면서, 신장필터에 의해 곱해짐으로 위상 지연을 가져오도록 하였다. 이러한 특성을 만족하는 파워 스펙트럼은 데이터의 개수  $n(0 \leq n < N)$ 에 대하여 주파수 영역으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$X(n) + jY(n) = P(n) \times H(jn), \quad 0 \leq n \leq N/2 - 1 \quad (1)$$

$$X(n) + jY(n) = X(N - n) - jY(N - n), \quad N/2 + 1 \leq n \leq N - 1 \quad (2)$$

$$X(n) + jY(n) = 0, \quad n = N/2 \quad (3)$$

여기서,  $P(n)$ 은 시험신호의 파워스펙트럼을 나타내는 함수이며,  $H(jn)$ 은 신장필터를 나타내는 함수로서 각각 식 (4) 및 (5)와 같다.

$$P(n) = 60 \exp \left[ - \left( \frac{n}{a} \right)^{12} \right], \quad 0 \leq n \leq N/2 - 1 \quad (4)$$

$$H(jn) = \exp \left[ - \frac{12n^2}{b} j \right] \quad (5)$$

식 (4)에서  $a$ 를 적절히 선택함으로써 측정에 필요로 하는 주파수 영역까지 평탄한 파워스펙트럼을 얻을 수 있다. 시험 신호를 구할 때의 시간지연 성분은 식 (5)의  $b$ 에 의해 선택되어진다.

### 3.2 상호상관계수를 이용한 미지파라미터의 추정

비선형 성분이 포함된 시스템의 경우에 있어, 신호 압축법에 의해 구한 선형 성분의 등가적인 임펄스응답을 이용하여 미지 파라미터를 추정할 수 있다. 즉, 등가적인 임펄스응답의 보드(bode)선도와 측정하고자 하는 시스템과 같은 차수를 가진 모델의 전달함수에 대한 보드선도의 비교를 수행하여 근사적으로 일치할 때까지 모델식의 파라미

터를 변화시켜 미지 파라미터의 근사값을 추정한다. 이렇게 육안으로 보드선도의 일치되는 정도를 비교함으로써 추정된 근사값을 구할 수 있으나, 추정값의 계인 오차를 줄이기 위해서 추정된 근사값을 전후해서 파라미터를 세밀하게 가변하면서 모델의 임펄스응답과 실험에서 구한 임펄스응답의 상호상관계수를 취하여 상호상관계수의 값이 가장 클 때의 파라미터를 추정값으로 선정한다. 이때 상호상관계수의 값이 가장 크다는 것은 두 신호가 가장 일치됨을 의미한다.

이상과 같은 방법으로 고유주파수와 감쇠계수를 유도하면 이것을 이용하여 시스템 파라미터를 유도할 수 있다. Fig. 6은 상호 상관계수를 이용한 동특성 규명 과정을, Fig. 7은 시험 신호에 대해

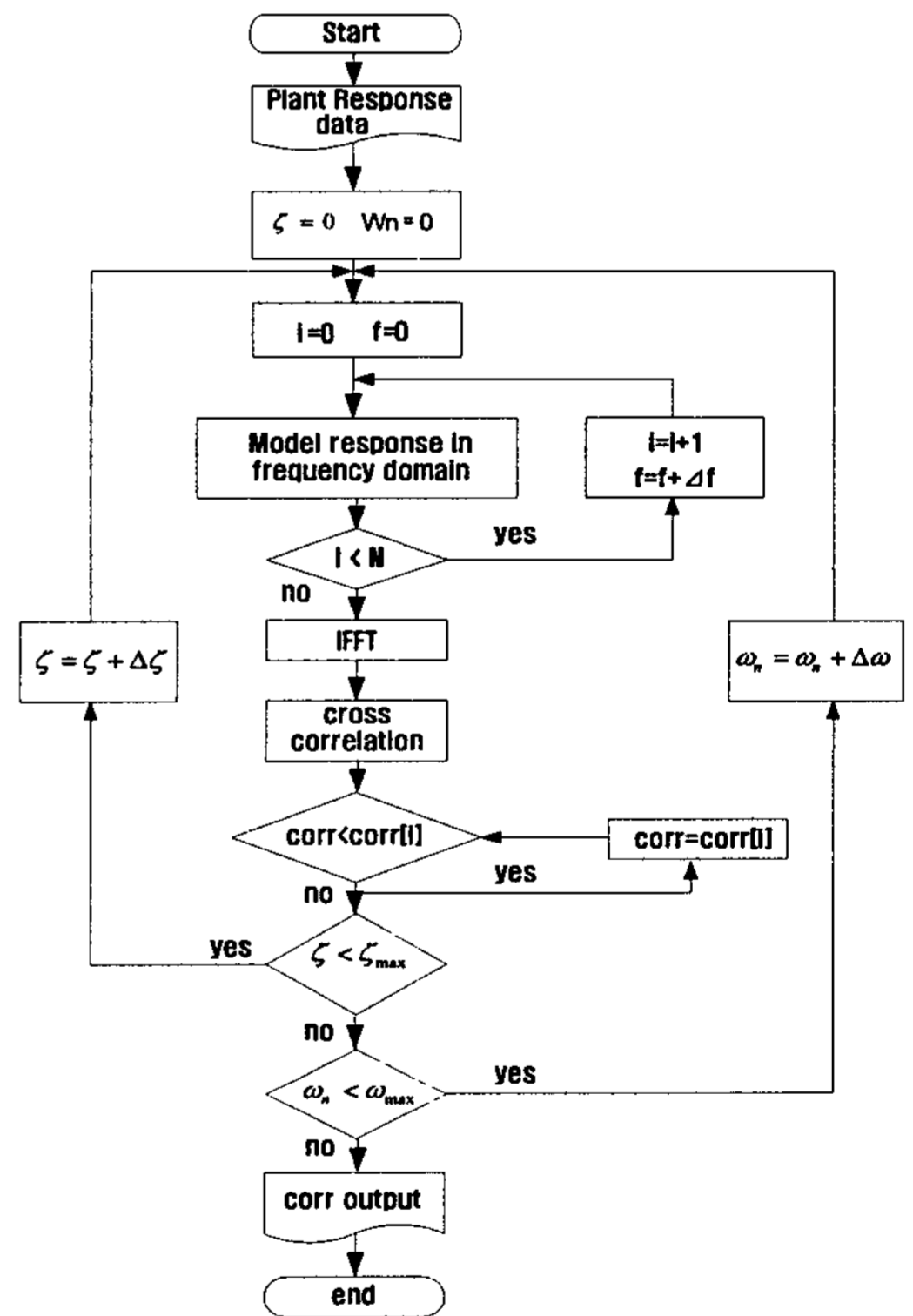


Fig. 6 Flow chart of the identification algorithm

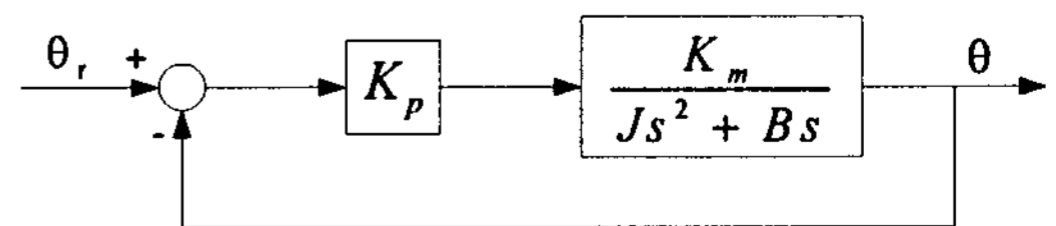


Fig. 7 Diagram for the proportional control

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{\theta_r(s)} = \frac{K_p K_m}{Js^2 + Bs + K_p K_m} \quad (6)$$

$$= \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

비례제어를 수행하는 제어블록선도를 나타낸다. 이때 시스템의 전달 함수는 식 (6)과 같이 나타내어진다. 여기서  $K_m$ 은 모터 토크 비례 상수이고  $K_p$ 는 비례 제어 게인을 나타낸다. 식 (6)에서 등가관성모멘트  $J$ 와 등가점성마찰계수  $B$ 는 식 (7)과 같은 관계를 가진다.

$$J = \frac{K_p K_m}{\omega_n^2} \quad (7.a)$$

$$B = 2\zeta\omega_n J \quad (7.b)$$

### 3.3 실험 결과

Fig. 8 과 Fig. 9 는 각각 Fig. 4 의 시험신호를 5ms 마다 기준 각도값으로 짐벌에 인가할 때 비례제어를 Fig. 7 과 같은 비례 제어를 수행하여 얻어진 응답 신호이다. 이들 시스템 응답을 Fourier 변환한 다음 압축필터를 통과시킴으로써 등가 임펄스응답을 얻을 수 있다. Fig. 10 과 Fig. 11 은 각각 롤, 피치축의 실제 시스템과 모델링된 시스템의 등가 임펄스응답의 파워 스펙트럼을 나타낸다. 고주파 영역으로 갈수록 게인의 크기가 커지는 것은 시험 신호의 게인 특성이 임펄스와는 달리 차단주파수 이하에서는 게인의 크기가 급속히 줄어듦으로 생긴 보상된 값에 의한 것이다. Fig. 10, Fig. 11 에서 원으로 표시한 부분이 게인의 크기가 큰 주파수 영역을 나타낸다. 각축의 추정된 미지 파라미터는 Table 4 에 나타낸다. 롤 축의 동특성의 경우는 상호상관계수가 0.924 로 추정한 모델식이 비교적 근사식으로 이용될 수 있으나, 피치 축의 동특성의 경우는 상호상관계수가 0.857 로 다소 오차가 있음을 알 수 있다. 이는 압축한 신호 가운데 저주파 영역에서의 비선형성분이 완전히 분리되지 않고 선형성분에 일부 포함되어 나타나는 현상으로 판단된다. 모델식의 오차부분은 강인성제어에서 보상할 수 있도록 설계하면, 시선안정화 제어에 추정된 모델식의 파라미터 값이 유용하게 이용될 것으

로 판단된다.

## 4. 결론

본 논문에서는 카메라가 장착된 무인항공기의 시선 안정화를 위해 짐벌과 전용 제어기를 제작하고 개발된 짐벌을 2 차 선형시스템으로 가정하여 각축의 미지 파라미터를 추정하였다.

본 논문에서 개발한 짐벌 시스템은 구조적 특성 및 저가형 가속도 센서의 특성으로 인해 비선형 성분을 많이 포함하고 있다. 일반적으로 고신뢰성의 센서를 사용하는 안정적 구조의 기계시스템의 경우 신호압축법을 이용한 추정 모델의 상호상관계수가 0.95 이상인 것에 비하면 본 논문의

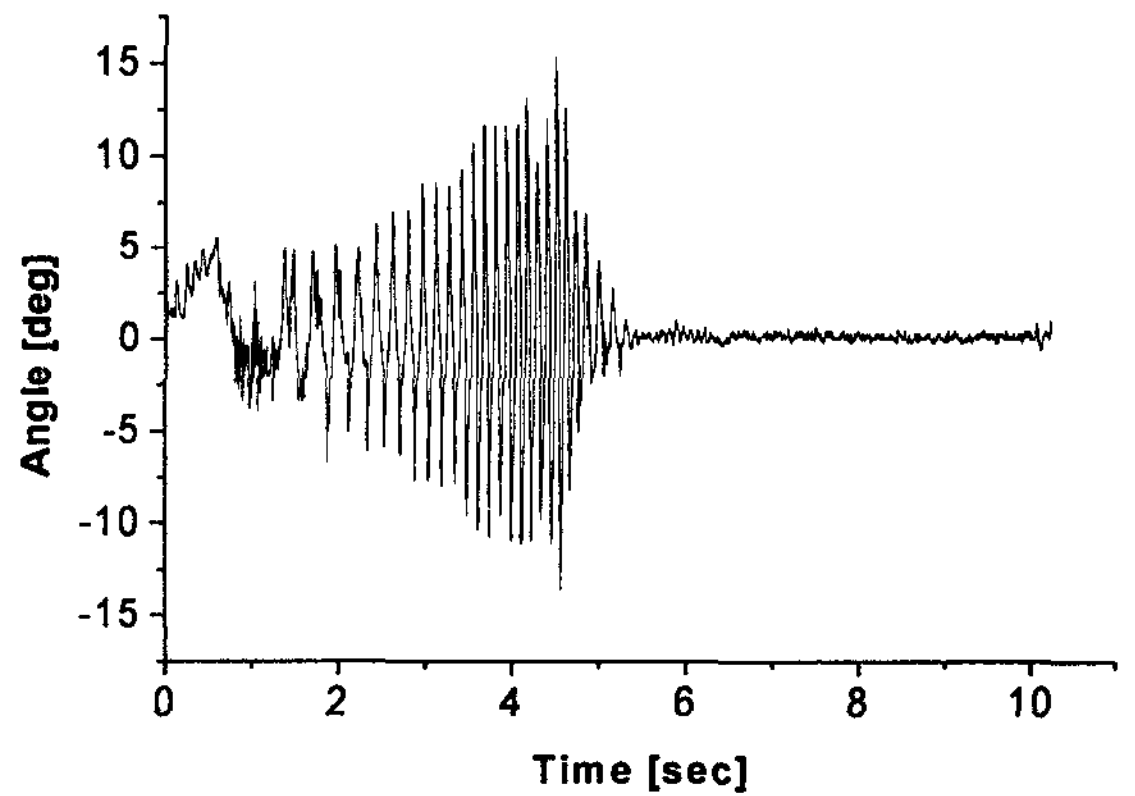


Fig. 8 Response of roll axis for test signal

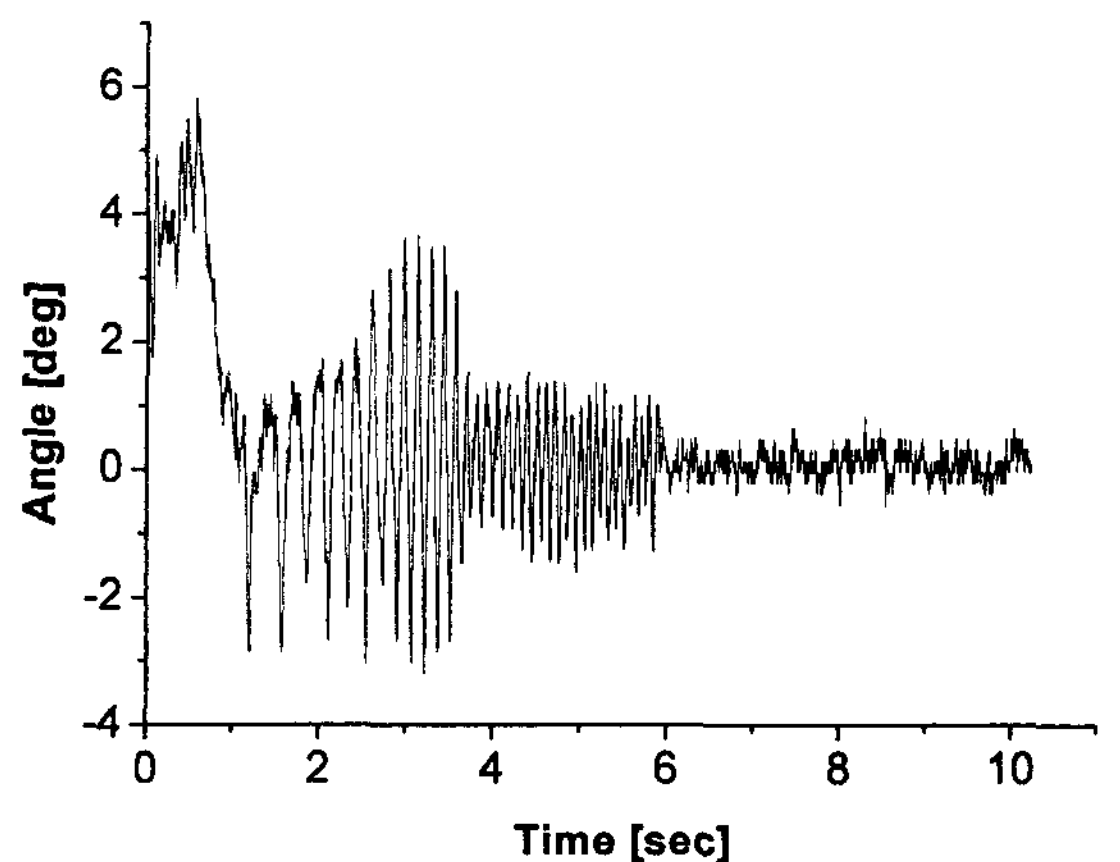


Fig. 9 Response of pitch axis for test signal

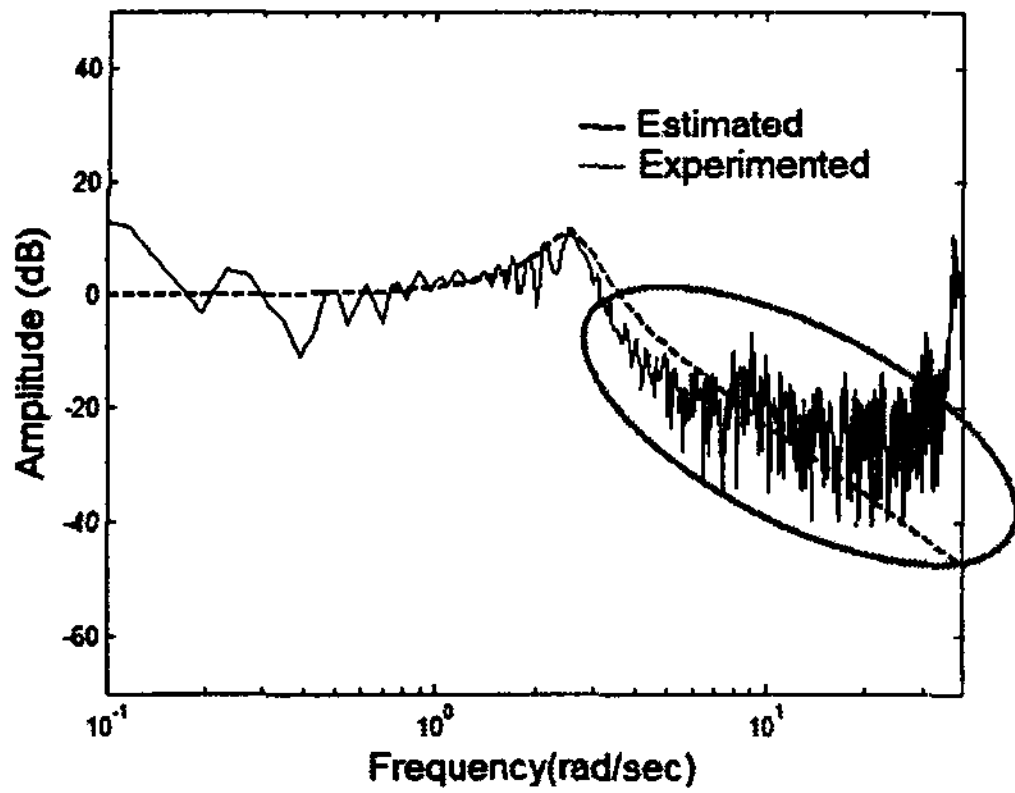


Fig. 10 The power spectrum of the roll motion

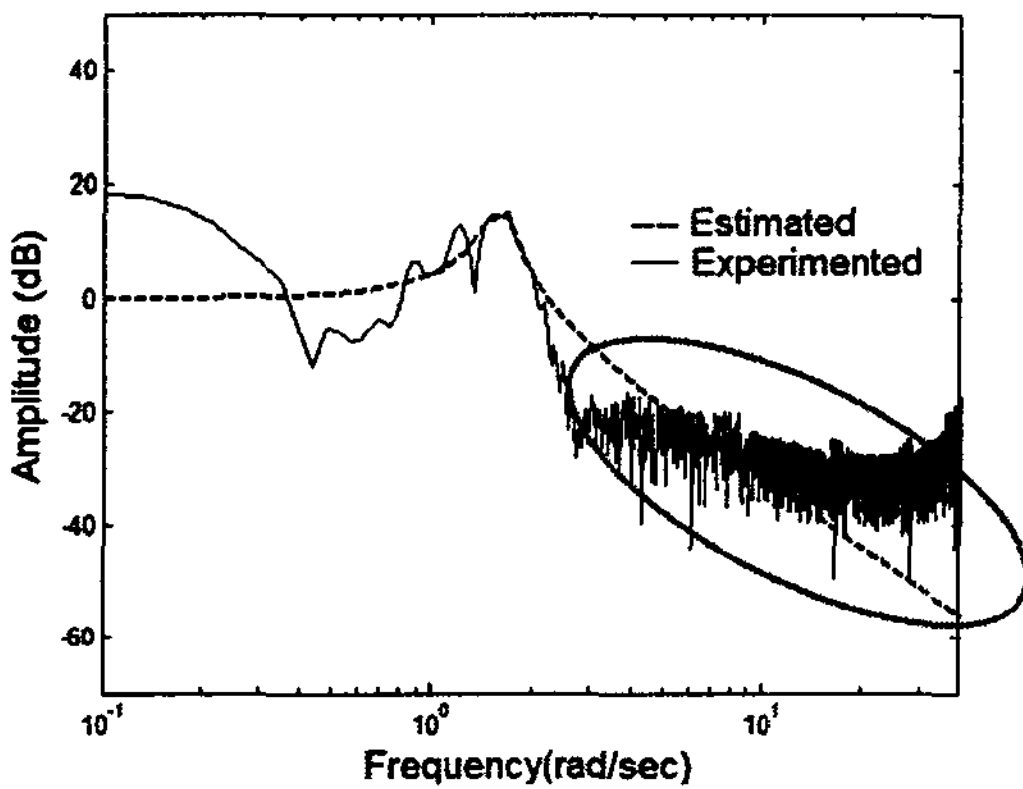


Fig. 11 The power spectrum of the pitch motion

Table 4 Estimated unknown parameters of the gimbals

parameter	roll	pitch
Cross-correlation coefficient	0.924	0.857
$\omega_n$ (rad/sec)	3.7	3.1
$\zeta$	0.17	0.18
$K_p$	1.5	0.5
$K_m$	5.53	5.53
$J$ (kg·m <sup>2</sup> )	0.61	0.29
$B$ (kg·m <sup>2</sup> /s)	0.77	0.32

결과로 짐벌을 2 차 선형시스템으로 근사화 하기에는 다소 무리가 따른다. 하지만 센서 특성으로 인한 비선형 성분뿐 아니라 시스템 동특성의 불확실

성 등을 외란으로 간주하고 관측기를 통하여 외란을 제어기에 반영하는 SMCSPO(Sliding Mode Control with Sliding Perturbation Observer)와 같은 제어를 설계하여 본 짐벌 시스템에 적용한다면 요구하는 제어 성능을 구현할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 SMCSPO 의 경우 추정 모델식의 오차에도 불구하고 뛰어난 제어 성능을 나타낸다고 알려져 있다. 따라서 본 논문에서 추정한 파라미터는 향후 SMCSPO 제어기 설계에 있어 짐벌의 2 차 선형 모델로 사용될 수 있을 것이다.

### 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

1. Jang, J. S., "Characteristics of UAV Development Trend," Aeronautics Industry Research Report, Vol. 50, pp. 62-71, 1999.
2. Kim, S. B., Son, Y. H. and Lee, H. J., "Arrival of UAV Era and Development Strategy," KIDA, pp. 9-14, 2000.
3. Park, M. K. and Lee, M. C., "Identification of Motion Platform Using the Signal Compression Method with Preprocessor and its Application to Sliding Mode Control," KSME International Journal, Vol. 16, No. 11, pp. 1379-1394, 2002.
4. Aoshima, N., "Measurement of Flow Control System Characteristics by Signal Compression Method," Trans. of SICE, Vol. 22, No. 12, pp. 1298-1304, 1986.
5. Aoshima, N., "Microprocessor-Based System Identification by Signal Compression Method," D. Reidel Pub. Com., pp. 81-103, 1986.