

## 입체영상 촬영을 위한 드론용 짐벌시스템 제어

김민<sup>1</sup> · 변기식<sup>1</sup> · 김관형<sup>2\*</sup>

### Gimbal System Control for Drone for 3D Image

Min Kim<sup>1</sup> · Gi-Sig Byun<sup>1</sup> · Gwan-Hyung Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Control and Instrumentation Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

<sup>2</sup>Department of Computer Engineering, Tongmyong University, Busan 48520, Korea

#### 요 약

본 논문은 드론 같은 움직임이 불규칙한 환경에서 깨끗하고 안정된 입체영상을 촬영하기 위해서는 드론용 짐벌 시스템 제어 안정화기 설계가 필요하다. 짐벌 시스템은 카메라 모듈을 지지하는 구조와 외부로 부터의 진동을 차단 하면서 정확한 각도를 추종하는 센서 등으로 구성된다. 움직임이 불규칙한 촬영장비나, 비행중인 드론에는 매우 다양한 주파수 성분의 진동의 발생으로 인해 안정된 영상물을 촬영하기에 어려움이 많다. 이러한 다양한 주파수 성분의 진동을 제어하기 위해 일반적으로 rolling-pitching-yawing 운동에 대하여 일반적인 PID 제어를 설계하여 안정적으로 제어하지만, 드론용 짐벌시스템 구조가 변경되거나 시스템 일부 요소가 변경되게 되면 기존에 설계된 PID 제어 파라미터를 재조정을 해야 되는 경우가 빈번하게 있다. 이런 문제점을 개선하기 위해 본 논문에서 제기된 제어 기법인 지적 PID제어를 통하여 움직임과 짐벌시스템의 진동제어를 수행하여 외부 환경의 변화에 강인한 제어기법을 제시하고자 한다.

#### ABSTRACT

This paper is designed to develop a Gimbal control stabilizer for drones Gimbal system control for drone for 3D image to make sure clean image in the shaking and wavering environments of drone system. The stabilizer is made of tools which support camera modules and IMU(Inertial Measurement Unit) sensor modules follow exact angles, which can brock vibrations outside of the camera modules. It is difficult for the camera modules to get clean image, because of irregular movements and various vibrations produced by flying drones. Moreover, a general PID controller used for the movements of rolling, pitching and yawing in order to control the various vibrations of various frequencies needs often to readjust PID control parameters. Therefore, this paper aims to conduct the Intelligent-PID controller as well as design the Gimbal control stabilizer to get clean images and to improve irregular movements and various vibrations problems referenced above.

**키워드** : 드론, 짐벌 시스템, 안정화기, 지적 PID제어, 입체영상

**Key word** : Drone, Gimbal System, Stabilizer, Intelligent-PID, 3D Image

Received 30 October 2016, Revised 05 November 2016, Accepted 12 November 2016

\* Corresponding Author Gwan-Hyung Kim(E-mail:taichiboy1@gmail.com, Tel:+82-51-629-1182)

Department of Computer Engineering, Tongmyong University, Busan 48520, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2016.20.11.2107>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

최근 들어 드론, 자율주행 자동차, 무인선 등 무인 이동체 산업이 미래 신 성장 분야로 급부상하고 있다. 그 중에서 드론(drone)은 보급 속도가 빠르며, 산업전반에 걸쳐 주목을 받으면서 용도가 다양하게 사용되고 있다. 특히 재해예방, 농업용, 산업현장관리, 스포츠 활동과 방송 등의 영상제작에 효용성이 입증되고 있다[1, 2].

드론시스템은 일반적으로 드론 하부에 장착된 카메라로부터 외부와 내부에서 발생하는 외란에서도 깨끗하고 안정된 영상을 획득하기 위해서는 짐벌시스템의 안정화기 설계가 필요하다. 특히 원거리의 입체영상 촬영을 위해서는 카메라 외부 내부의 크고 작은 진동에서 안정화는 매우 중요한 부분으로 작용한다.

본 논문에서는 짐벌시스템의 안정화 제어를 위해 i-PID제어기를 사용하여 파라미터  $h$  와  $\alpha$  의 설정 가능 범위를 확인하고, 기존의 PID 제어기 보다 안정화기의 우월성을 확인 하고자 한다.

## II. 본 론

### 2.1. 연구배경

짐벌시스템은 드론의 외란과 구동체 운동 등으로 전단되는 rolling, pitching, yawing에 대한 진동을 억제하여 영상의 흔들림을 제거하고 원하는 표적 방향으로 영상장비를 유지하는 장치를 말하며, 짐벌시스템의 구성은 카메라 모듈과 안정화 구동장치로 나눌 수 있다. 이러한 짐벌시스템을 그림 1에 제시하였다.



Fig. 1 The Gimbal system

드론으로부터 카메라 모듈에 전달되는 진동을 제거하기 위해서는 rolling, pitching, yawing에 대한 진동 제

어가 필요하다. 일반적으로 rolling, pitching, yawing 운동과 같은 회전운동 제어를 위하여 모터 등에 PID (Proportional-Integral-Derivative, 비례-적분-미분)제어를 수행하여 진동을 흡수한다. 그러나 PID제어 기반은 제어대상에 시간지연이 존재하거나 시스템 등의 동특성이 변화하면 PID 파라미터의 재설정이 필요하다[1, 2].

본 논문에서는 Intelligent-PID(i-PID)제어기법을 적용하여 제어의 안정성을 확인하고 PID 제어를 대체할 수 있는 제어기법을 제시한다.

### 2.2. 시스템 구성

본 논문에서 제안하는 짐벌시스템은 기존 짐벌시스템을 기반으로 구성되며 카메라 자세를 측정하기 위해 자이로와 가속도 센서가 융합된 관성 측정 장비(IMU, Inertial Measurement Unit)로 구성된다[3]. 설계한 짐벌시스템의 프레임워크를 그림 2에 제시하였다.

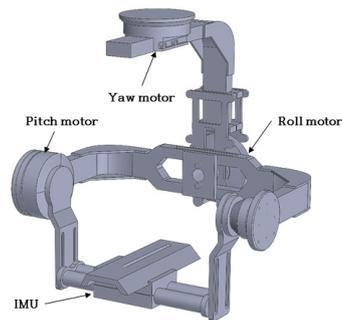


Fig. 2 The Gimbal system Architecture

그림 3은 짐벌시스템의 전체 구성도이며, 3축의 BLDC 모터, BLDC 모터 드라이버, IMU, Mega2560 Soc 보드로 구성된다.

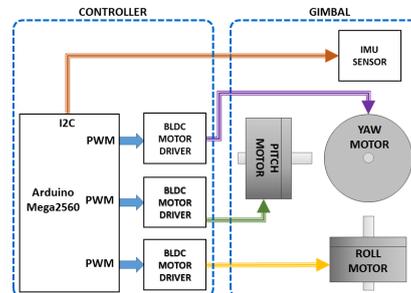


Fig. 3 The Gimbal system controller block

### III. 시스템 구현 및 실험

#### 3.1. 짐벌시스템 모델

rolling, pitching, yawing과 같은 회전 운동하는 짐벌 시스템의 대한 운동방정식을 유도하기 위하여 드론의 좌표계를  $D(i, j, k)$  라 하고, 짐벌의 좌표계를  $G(r, p, y)$ 라 하여 각 좌표계의 축에 대한 각속도 벡터들을 식(1)과 같이 표현된다.

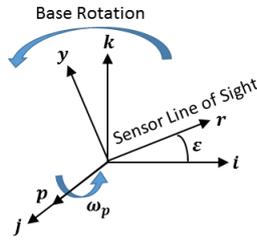


Fig. 4 A single-axis rotation motion for drone/gimbal system

$$\vec{\omega}_D = \begin{bmatrix} \omega_i \\ \omega_j \\ \omega_k \end{bmatrix}, \vec{\omega}_G = \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_p \\ \omega_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

그림 4와 같이 짐벌 좌표계의  $p$  축에 있는 구동모터에 의한 회전운동 방정식을 유도해 본다.  $p$  축이 각도  $\epsilon$  만큼 회전할 때 짐벌 축의 각속도를 드론 축의 각속도 함수로 나타내면 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} \omega_r &= \omega_i \cos \epsilon - \omega_k \sin \epsilon \\ \omega_p &= \omega_j + \dot{\epsilon} \\ \omega_y &= \omega_i \sin \epsilon + \omega_k \cos \epsilon \end{aligned} \quad (2)$$

그리고, 짐벌의 관성행렬을 다음과 같이 두자.

$$J = \begin{bmatrix} J_r & J_{rp} & J_{ry} \\ J_{rp} & J_p & J_{yp} \\ J_{ry} & J_{yp} & J_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,  $J_r, J_p, J_y$ 는 각각  $r, p, y$ 축에 대한 관성모멘트이고,  $J_{rp}, J_{ry}, J_{yp}$ 를 관성 곱모멘트 라고 하자. Newton의 법칙에 의하여 토크방정식은 식(4)와 같다.

$$\vec{T} = \frac{d}{dt} (\vec{P}) + \vec{\omega}_G \times \vec{P} \quad (4)$$

여기서  $\vec{P}$ 를 각 운동량이라 하고 식(5)와 같이 정의한다.

$$\vec{P} = J \vec{\omega}_G = \begin{bmatrix} J_r \omega_r + J_{rp} \omega_p + J_{ry} \omega_y \\ J_{rp} \omega_r + J_p \omega_p + J_{yp} \omega_y \\ J_{ry} \omega_r + J_{yp} \omega_p + J_y \omega_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_r \\ P_p \\ P_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

따라서 짐벌의 각 축에 대한 토크는 식(4)에서 각속도벡터와 운동량벡터의 벡터곱을 통하여 식(6)으로 유도된다.

$$\vec{T} = \begin{bmatrix} \dot{P}_r + \omega_p P_y - \omega_y P_p \\ \dot{P}_p + \omega_p P_r - \omega_y P_r \\ \dot{P}_y + \omega_p P_p - \omega_y P_r \end{bmatrix} \quad (6)$$

특히, 짐벌의  $p$ 축에 대한 토크방정식은 식(7)과 같다.

$$\tau = \dot{P}_p + \omega_y P_r - \omega_r P_y \quad (7)$$

여기서  $\tau$  는 모터로부터 짐벌 링크에 인가되는 토크이며, 식 (5)의 항들을 대입하여 식(8)과 같이 정리한다.

$$\begin{aligned} J_p \dot{\omega}_p &= \tau + (J_y - J_r) \omega_r \omega_y + J_{ry} (\omega_r^2 - \omega_y^2) \\ &\quad - J_{yp} (\dot{\omega}_y - \omega_p \omega_r) - J_{rp} (\dot{\omega}_r + \omega_p \omega_y) \end{aligned} \quad (8)$$

만일, 짐벌의 축에 대하여 무게분포가 대칭적이라면 관성 곱모멘트가 0, 즉  $J_{rp} = J_{ry} = J_{yp} = 0$  이므로, 식 (8)은 다음과 같이 된다.

$$J_p \dot{\omega}_p = \tau + (J_y - J_r) \omega_r \omega_y \quad (9)$$

여기에 식(2)의  $\omega_r, \omega_y$ 를 대입하여, 드론의 기본축 외란에 대한 짐벌  $p$ 축의 회전운동 방정식을 다음과 같이 얻는다.

$$\begin{aligned} J_p \dot{\omega}_p &= \tau + (J_y - J_r) \cdot (\omega_i \cos \epsilon - \omega_k \sin \epsilon) \\ &\quad \cdot (\omega_i \sin \epsilon + \omega_k \cos \epsilon) \end{aligned} \quad (10)$$

#### 3.2. i-PID제어기법의 개요

회전운동하는 짐벌의 링크에 대한 제어기를 설계하기 위하여, 본 논문에서는 모델링 없이 제어기를 설계하는 방법에 대하여 기술한다[4-7].

일반적으로 시스템 동적방정식은 입력  $u(t)$  와 시스템 출력  $y(t)$  에 관한 반드시 선형이라고 할 수 없는 미분방정식으로 표현되어 있다고 한다.

$$y^{(m)}(t) = g(y^{(m-1)}, \dots, \dot{y}, y, u^{(l)}, \dots, \dot{u}, u) \quad (11)$$

와 같이 표현되는데, 이 식은 아주 짧은 시간동안 유효한

$$y^{(n)}(t) = G(t) + \alpha u(t) \quad (12)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $n$ 은 일반적으로 1 또는 2가 되며,  $\alpha$ 는 설계자가 결정하는 값이고,  $G(t)$ 는  $y(t)$ ,  $u(t)$  및 이들의 고계미분의 함수로서 제어대상의 모든 정보가 들어있는 미지의 항으로 임의 시간에 입력  $u(t)$ 와 측정값  $y^{(n)}(t)$ 을 이용하여 실시간으로 추정할 수 있다.

만일,  $G(t)$ 를 추정할 수 있다면 페루프 제어시스템에서 제어대상의 바람직한 출력을 위하여 제어입력은 다음과 같이 결정한다. 특히,  $n=2$  일 경우 식(12)으로부터 식(13)으로 전개된다[8, 9].

$$u(t) = \frac{1}{\alpha} \left( -G(t) + \ddot{y}^*(t) + K_P e(t) + K_I \int e(\tau) d\tau + K_D \dot{e}(t) \right) \quad (13)$$

여기서

- $y^*(t)$ 는 제어대상의 출력이 추종해야 하는 목표신호
- $e(t) = y^*(t) - y(t)$ 는 추종오차
- $K_P, K_I, K_D$ 는 일반적인 PID 제어기 이득

이다. 한편  $G(t)$ 는 식(12)로부터  $y^{(n)}(t) - \alpha u(t)$  이므로 식(13)에 대입하여 페루프 응답의 오차방정식 식(14)와 같다.

$$\ddot{e}(t) + K_P e(t) + K_I \int e(\tau) d\tau + K_D \dot{e}(t) = 0 \quad (14)$$

양변에 라플라스변환을 적용하면 다음과 같은 페루프 특성방정식을 얻는다.

$$e(s) = s^3 + K_D s^2 + K_P s + K_I \quad (15)$$

그러므로 식(15)이 안정으로 되도록  $K_P, K_I, K_D$ 를 설정하면  $e(t) \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ 로 된다.

실제로, 식(13)의  $G(t)$ 는 미지이기 때문에 식(12)를 이용하여 실시간으로 계산해야 할 필요가 있다. 이를 위해 식(12)의  $u(t)$  대신에 충분히 작은 값을 가지는 시간  $h(>0)$  만큼 이전의 값  $u(t-h)$ 를 사용하여 다음과 같이  $G(t)$ 를 추정한다.

$$G(t)|_e = \ddot{y}(t) - \alpha u(t-h),$$

$$\text{(단, } u(t-h) \approx u(t) \text{)} \quad (16)$$

이 값을 식(13)에 대입하여 페루프 제어시스템에서 제어대상의 바람직한 출력을 위하여 실제의 제어입력을 다음과 같이 결정한다.

$$u(t) = \frac{1}{\alpha} \left( -\ddot{y}(t) + \alpha u(t-h) + K_P e(t) + K_I \int e(\tau) d\tau + K_D \dot{e}(t) \right) \quad (17)$$

이 제어기에 의해 구현된 제어시스템 구조를 그림 5에 나타낸다.

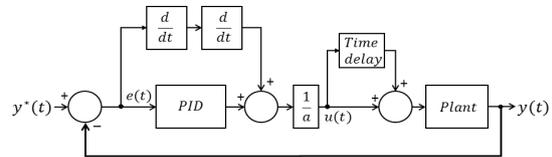


Fig. 5 i-PID controller

### 3.3. i-PID제어기의 설계

먼저, 고전적인 PID 제어기의 오차신호나 플랜트의 출력신호에  $K_P, K_I, K_D$  파라미터값을 조합의 알고리즘으로 제어신호를 구성한다.

식(17)을 기반으로 하는 기본 i-PID제어기를 설계하고, 외란 특성을 관찰하기 위해 PID 출력 측에 step 외란을 추가하여 구성하였다.  $\alpha$  파라미터는 0.5로 고정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위한 Simulink 블록도는 그림 6과 같다.

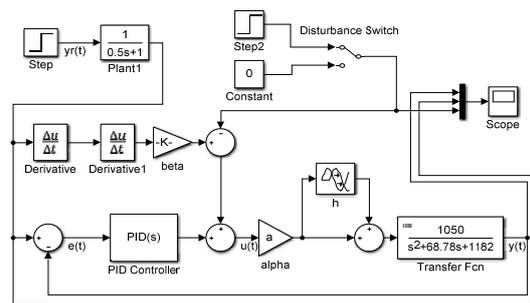


Fig. 6 Simulink Block diagram for simulink

본 논문에서는 i-PID의 파라미터 중에  $\alpha$  파라미터는 고정으로 하고,  $h$  파라미터는 0.1과 0.001 변경하여 시뮬레이션을 수행했다.

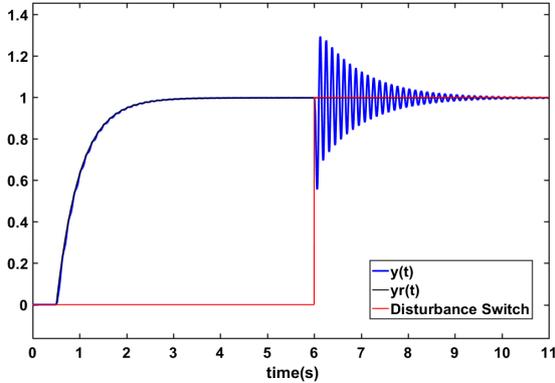


Fig. 7 Results of  $\alpha = 0.5, h = 0.1$  parameters

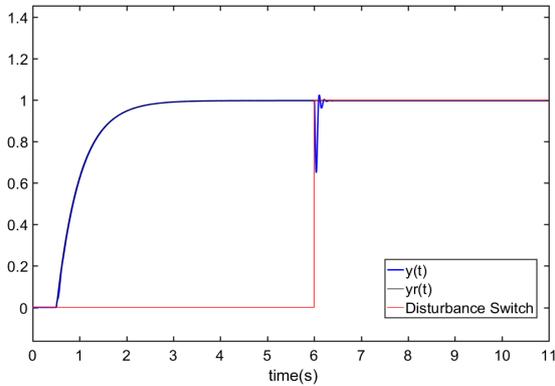


Fig. 8 Results of  $\alpha = 0.5, h = 0.001$  parameters

시뮬레이션 결과 그림 7의  $h = 0.1$  경우 외란 입력에 따라 진동이 크게 발생하여 불안정한 결과를 나타내며, 그림 8의  $h = 0.001$  일 때는 외란 입력에도 빠른 속도로 정착하는 것을 시뮬레이션 수행 결과를 통해 확인하였다. 최적의 제어가 얻어지기 위해  $h, \alpha$  파라미터를 시스템에 맞춰 설정이 필요하다.

### 3.4. i-PID제어기의 실험

$h$  파라미터 변경에 따른 시뮬레이션 결과를 바탕으로 Arduino Mega2560 보드에 Simulink 블록을 설계하여 짐벌 플랫폼에 실험을 진행하였다. 실험에 활용한 Simulink 블록 다이어그램을 그림 9에 제시하였다.

시뮬레이션 결과값인  $h, \alpha$  파라미터를 기반으로 설계하고 짐벌의 한축을 step 입력에 따른 PID와 iPID제어기를 교대로 실험을 진행한 결과 그림 10과 같이 나타났다.

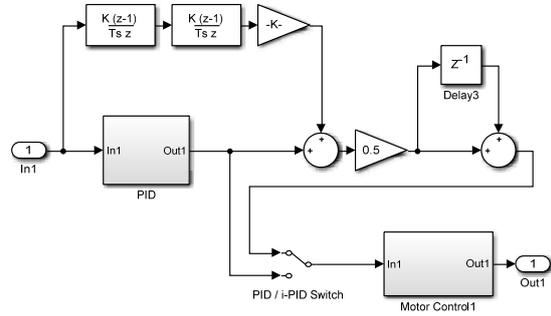


Fig. 9 PID & i-PID Simulink Block diagram

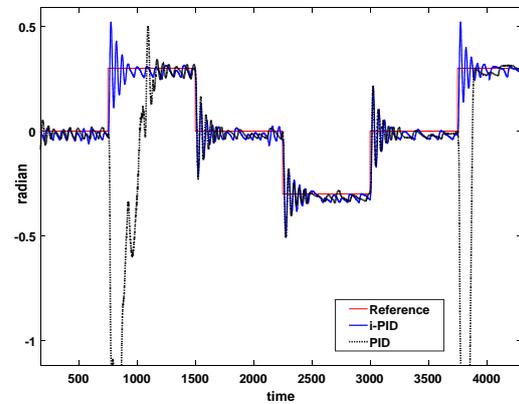


Fig. 10 Results of PID, i-PID

전통적인 PID제어기로 제어할 경우 자세가 불안정한 경우가 발생하였으나, i-PID제어기의 경우 입력에 따른 위치 제어가 비교적 안정화 되는 것을 확인 하였다. 결국 강인성의 관점에서 i-PID가 우수하다고 할 수 있다.

## IV. 결론

본 논문에서는 i-PID 제어기의 적용과정에서 사용자의 지정해야 하는 파라미터  $h, \alpha$ 의 대략적인 범위를 확인하고, 이 범위 내에서 시뮬레이션과 실제 플랫폼을 통하여 적절한 파라미터를 알아내는 과정에서 유효한 것을 확인하였다. Arduino mega2560과 짐벌시스템을 구성하여 진동억제에 i-PID를 이용하여 안정화기 결과를 확인하였다. 기존 PID제어기의 파라미터 설정에는 많은 연구가 진행되어 왔지만, 최적의 제어를 위해서는

그 파라미터의 선정과정이 간단하다고 말 할 수는 없다. 이에 반해 기존 PID에서 i-PID 제어기만 추가하여도 진동억제에 대해 우월성을 확인하였다. 현재 짐벌시스템을 제작하여, i-PID제어기로 진동억제 실험을 계속 하고 있으며,  $\alpha$  파라미터의 최적 조건을 계속 연구하여 다른 시스템에도 적용할 계획이다.

## REFERENCES

- [1] G. S. Byun and H. R. Cho, "The Stabilization Loop Design for a Dron-Mounted Camera Gimbal System Using Intelligent-PID Controller," *The journal of the Korea institute of intelligent transport systems*, vol.15 no.1, pp.102-108, Jan. 2016.
- [2] M. Kim, G. S. Byun, G. H. Kim and M. H. Choi, "The Stabilizer Design for a Drone-Mounted Camera Gimbal System Using Intelligent-PID Controller and Tuned Mass Damper," *International Journal of Control and Automation*, vol.9, no.5, pp.387-394, Sep. 2016.
- [3] B. Ekstrand, "Equations of motion for a two-axes gimbal system," *Aerospace and Electronic System*, IEEE Transactions on, vol.37, no.3, pp.1083-1091, Aug. 2001.
- [4] M. Fliess and C. Join, "Intelligent PID controllers," in *Proc. of the 16<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Control and Automation*, pp.326-331, Jun. 2008.
- [5] M. Fliess and C. Join, "Model-free control and intelligent PID controllers: toward a possible trivialization of nonlinear," in *Proc. of the 15<sup>th</sup> IFAC Symposium on System Identification*, pp.1531-1541, Apr. 2009.
- [6] B. D. Novel, M. Fliess, C. Join, H. Mounier and B. Steux, "A mathematical explanation via 'intelligent' PID controllers of the strange ubiquity of PIDs," in *18<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Control and Automation*, Marrakech, Morocco, 2010.
- [7] W. W. Choe, "Intelligent PID Controller and its application to Structural Vibration Mitigation with MR Damper," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol.64, no.8, pp.1224-1230, Aug. 2015.
- [8] M. Abdo, A. R. Toloei, A. R. Vali and M. R. Arvan, "Modeling, control and simulation of cascade servo system for one axis gimbal mechanism," *International Journal of Engineering*, vol.27, no.1, pp.157-170, Jan. 2014.
- [9] Esfandiari, Lu, *Modeling and Analysis of Dynamic Systems*, Second Edition, CRC Press, Apr. 2014.



김 민(Min Kim)

2012년 부경대학교 제어계측공학과 공학석사  
2012년 ~ 현재 부경대학교 제어계측공학과 박사과정  
※관심분야 : 신호처리, 임베디드시스템, 네트워크



변기식(Gi-Sig Byun)

1990년 Wichita State University 전기공학과 공학박사  
1990년 ~ 현재 부경대학교 공과대학 제어계측공학과 교수  
※관심분야 : 신호처리, 디지털제어, 센서네트워크



김관형(Gwan-Hyung Kim)

2001년 한국해양대학교 전자통신공학과 공학박사  
2000년 ~ 현재 동명대학교 컴퓨터공학과 전임강사  
※관심분야 : 최적제어, 인공지능, 신호처리