ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 67, No. 6, pp. 773~781, 2018
http://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.6.773

드론 기반의 전력선 추적 제어 시스템

Drone-based Power-line Tracking System

정 종 민* · 김 재 승* · 윤 태 성** · 박 진 배†
(Jongmin Jeong · Jaeseung Kim · Tae Sung Yoon · Jin Bae Park)

Abstract - In recent years, a study of power-line inspection using an unmanned aerial vehicle (UAV) has been actively conducted. However, relevant studies have been conducting power-line inspection with an UAV operated by manual control, and they have developed just power-line detection algorithm on aerial images. To overcome limitations of existing research, we propose a drone-based power-line tracking system in this paper. The main contributions of this paper are to operate developed system under configured environment and to develop a power-line detection algorithm in real-time. Developed system is composed of the power-line detection and the image-based tracking control. To detect a power-line in real-time, a region of interest (ROI) image is extracted. Furthermore, clustering algorithm is used in order to discriminate the power-line from background. Finally, the power-line is detected by using the Hough transform, and a center position and a tilt angle are estimated by using the Kalman filter to control a drone smoothly. We design a position controller and an attitude controller for image-based tracking control, and both controllers are designed based on the proportional-derivative (PD) control method. The interaction between the position controller and the attitude controller makes the drone track the power-line. Several experiments were carried out in environments where conditions are similar to actual environments, which demonstrates the superiority of the developed system.

Key Words : Drone, Image-based control, Power-line detection, Tracking control

1. 서 론

전 세계적으로 전력 소비량이 증가함에 따라서, 신뢰성 있는 전력 공급을 위한 전력선의 안전은 상당히 중요한 주제이다[1]. 모든 전력 회사들은 주기적으로 전력선을 점검해야만 하고, 이를 위해 상당히 많은 시간과 금액을 소모하고 있다. 산업 현장에서는 여전히 전력선 점검을 위해 고전적인 방법들을 활용하고 있으며, 그 중 하나는 멀리서 망원경을 이용하여 전력선을 점검하는 것이다[2]. 하지만, 이 방법은 부정확하며, 많은 인력을 필요로 하다는 단점이 존재한다. 다른 방법으로는 헬리콥터를 이용하여 근접 거리에서 전력선을 검사하는 방법이지만, 이것 또한 많은 금전적인 비용이 발생한다[3]. 최근 들어, 많은 연구자들이 전력선 점검을 위한 모바일 로봇을 개발해왔으며, 이 방법들은 기존 방법들에 비하여 효율성 면에서 장점을 가진다[4-6]. [4]에서는, expliner라는 원격 조종 로봇을 개발했으며, 이를 고전압선의 유지보수를 위해 활용하였다. Expliner는 충분한 기동성을 가졌을 뿐 아니라, 로봇 팔을 이용하여 장애물을 넘어갈 수 있는 기능도 탑재되어 있다. [5]에서는, 전력선 점검의 목적을 위한 biped mechanism을 새롭게 소개하였다. [6]에서는 전력선에 붙어 움직이는 점검용 로봇을 개발하였으며, 전력선을 가까운 거리에서 효과적으로 점검할 수 있음을 증명하였다. 하지만, 이러한 기존 시스템들은 로봇이 전력선에 매달려 이동하기 때문에 하중으로 인해 전력선이 손상을 입을 수 있다.

이러한 약점들을 극복하기 위하여, 최근에는 무인비행체가 전력선 점검용 로봇으로 주목받고 있고, 이에 따라 많은 연구자들이 무인비행체를 이용하여 전력선을 점검하기 시작하였다[7-14]. [7]에서는 조종사가 원격으로 조종하는 헬리콥터를 이용하여 전력선의 사진을 촬영하였으며, 이를 오프라인으로 분석하였다. [8]에서는 원격 조종에 의해 운용되는 드론을 이용하여 전력선을 점검하는 시스템을 소개하였다. 또한, 클라이밍과 비행 기능을 융합한 새로운 개념의 로봇도 전력선 점검에 활용 된 바 있다[9]. 이러한 시스템들은 수동 조종을 필요로 하며, 조종사의 실수로 인하여 비행체가 전력선과 충돌할 우려가 있으며, 이로 인해 정전과 같은 심각한 문제를 초래할 수 있다는 문제점이 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 자동으로 운용되는 드론을 전력선 점검에 활용하려는 시도가 보이고 있다. [12]에서는, 드론을 이용하여 전력선 점검을 수행하기 위한 전력선 검출 알고리즘을 개발하였다. 허프(Hough) 변환과 칼만(Kalman) 필터를 융합한 방법

† Corresponding Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Korea.
E-mail: jbpark@yonsei.ac.kr
* School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Korea.
** Department of Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon, Korea.
Received : February 27, 2018; Accepted : May 17, 2018

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers

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.

을 통해 무인 비행체에 의해 촬영 된 항공 영상에서 전력선을 검출하였다. 유사하게, [13]에서는, 허프 변환과 퍼지 군집화 과정으로 구성 된 전력선 검출 알고리즘을 개발하였으며, 녹화 된 항공 영상을 이용한 실험을 통하여 성능을 검증하였다. [14]에서는, 쿼드로터 기반의 전력선 점검 시스템이 소개 되었지만, 알고리즘 개발보다는 시스템의 하드웨어 구조에 집중하였다. 앞서 언급한 연구들은 주로 항공 영상에서의 전력선을 검출하는 알고리즘을 개발하거나 드론 기반의 전력선 점검을 수행하기 위한 하드웨어 구조들에 대해 집중하고 있다. 전력선을 효과적이고 안전하게 점검하기 위해서는, 드론은 전력선 검출 알고리즘을 통해 얻은 정보들을 활용하여 전력선을 추적하며 비행하면서 전력선에 대한 영상을 얻어야만 한다. 기존에는 전력선 검사를 위하여 망원경을 통해 전력선의 상태를 확인하거나, 드론을 수동으로 조종하여 전력선에 대한 영상 정보를 취득한 후에 오프라인으로 전력선의 상태를 분석하였다[15, 16]. 그러나 망원경을 통한 육안 검사는 비효율적이며, 전력선의 상단부는 확인하기 어렵다는 단점이 있다. 또한, 수동 조종을 통한 드론은 조종사의 고도의 집중력을 필요로 한다는 한계점이 존재한다. 이러한 한계점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 드론 기반의 전력선 추적 시스템을 개발하였으며, 이를 통해 쉽게 전력선의 영상을 취득하여 분석할 수 있다는 장점이 있다.

개발된 시스템은 크게 전력선 검출과 드론의 추적 제어로 이루어져있다. 우리의 시스템은 짐벌과 결합 된 카메라가 드론의 하방에 탑재되어 있으며, 여기서 촬영되는 영상을 이용하여 전력선 검출을 수행한다. 여기서, 우리는 전체 영상 대신에 관심 영역을 설정하여 계산량을 줄인다. 그리고 $K-$평균 군집화 알고리즘을 통하여 유사한 색상을 가지는 픽셀들을 군집화하며, 이를 통해 배경으로부터 전력선을 쉽게 구별할 수 있다. 마지막으로, 캐니(Canny) 가장자리 검출 방법과 허프 변환을 융합하여 전력선을 검출하여 드론이 전력선을 추적 제어할 수 있도록 위치 정보를 추정한다. 그러나 얻어진 위치 정보는 드론의 추적 제어를 위해서는 부드럽게 만들 필요가 있으며, 이를 위해 칼만 필터를 이용한다. 드론의 추적 제어를 위하여 우리는 위치 제어기와 자세 제어기를 설계하였다. 2개의 제어기는 모두 PD 제어 기법 기반으로 만들어졌으며, 2개의 제어기가 반복적으로 상호작용하여 드론이 전력케이블을 추종하며 비행하도록 만든다. 우리는 실험을 위하여 실제 환경과 유사한 환경을 만들었으며, 실험들을 통하여 개발한 시스템의 성능이 다양한 환경에서 강인함을 증명하였다.

2. 본 론

2.1 전력선 추적을 위한 드론 시스템

본 연구에서는, 우리는 전력선 추적을 위한 드론 시스템을 개발하였다. 연구에 사용 된 드론 시스템은 그림 1에 나타나 있으며, 쿼드로터 형태의 드론을 이용하였다. 드론은 x, y 그리고 z 축을 따라서 비행할 수 있기 때문에, 드론의 움직임을 표현하기 위해서 x, y 그리고 z 축을 기준으로 회전하는 각도인 롤(roll), 피치(pitch) 그리고 요(yaw)가 존재한다. 롤은 드론의 좌우 움직임과 연관이 있으며, 피치는 드론의 앞뒤 움직임을 담당한다. 마지막으로, 요는 드론의 헤딩 각도를 의미한다. 이러한 용어들은 이해가 쉽도록 그림 2에 표현되어 있다. 드론이 전력선을 추종하며 비행하기 위해서는 전력선 검출을 통해 위치 정보를 추정해야 할 뿐 아니라, 그 정보를 활용하여 추적 제어를 수행해야만 한다. 전력선 검출 과정에서는 전력선을 영상 내에서 검출하여 영상 좌표계에서의 전력선 중심 좌표를 추정하고, 드론과 전력선 사이의 기울어진 각도를 추정한다. 이를 위해서 관심 영역 설정, 캐니 가장자리 검출, 허프 변환 그리고 칼만 필터가 이용된다. 알고리즘의 자세한 설명은 2.2절에 나타나있다. 전력선 검출 과정을 통해서 얻은 전력선의 중심 위치(x)와 전력선과 드론간의 기울어진 각도(ψ)는 자세 제어기와 위치 제어기로 이루어진 추적 제어기를 위해 사용된다. 자세 제어기는 드론의 롤, 피치 그리고 요 값을 제어하며, 위치 제어기는 드론이 전력선 위에 위치하도록 제어한다. 위치 제어기는 목표 롤(ϕ_d)을 계산하여 자세 제어기로 전송 한다, 목표 피치(θ_d) 와 목표 요(ψ_d)는 사용자에 의해 미리 설정되며, 이들도 자세 제어기로 전송 된다. 또한, 자세 제어기는 IMU(inertial measurement unit)와 전력선 검출 과정을 통해 얻은 현재 드론의 각도 정보들을 제공받으며, 드론이 전력선을 추종하며 비행하도록 알맞은 명령 입력을 계산한다. 제안한 시스템의 순서도가 그림 3에 나타나 있다.

그림 1 본 논문에서 사용 된 드론 시스템
Fig. 1 Drone system used in this paper

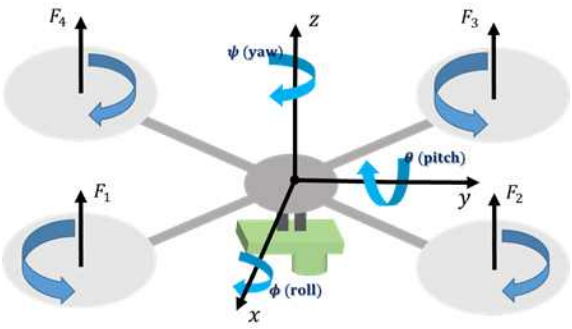


그림 2 사용 된 드론의 구조 모델
Fig. 2 Structure model of used drone

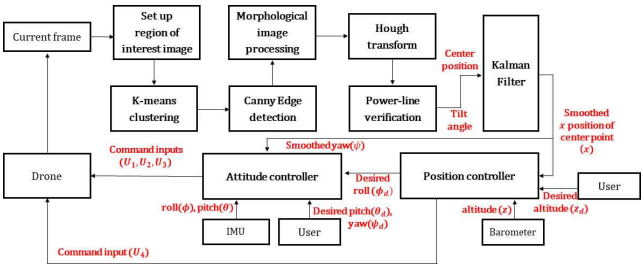


그림 3 제안한 시스템의 순서도
Fig. 3 Flowchart of the proposed system

2.2 전력선 검출 방법

본 논문에서는 전력선을 실시간으로 검출하기 위해서 완전 탐색(exhaustive search) 대신에 관심 영역 기반의 탐색 방법을 사용한다. 이 때, 드론이 성공적으로 전력선을 추적한다면 전력선은 영상의 중심부에서 긴 세로선의 형태로 나타난다. 이 사실에 기반 하여 관심 영역은 영상의 중앙 부분으로 설정되며 식 (1)과 같이 정의된다.

$$I_{ROI} = \{I(x,y) \mid (x_{c,s} \le x \le x_{c,l}) \wedge (y_{c,s} \le y \le y_{c,l})\} \quad (1)$$

여기서 $x_{c,s}$, $y_{c,s}$, $x_{c,l}$, $y_{c,l}$는 원본 영상에서 관심 영역 영상 추출을 위한 픽셀의 위치들이다. 일반적으로, 영상 내 배경은 다양한 색상들로 이루어져 있는 반면에 전력선은 단색으로 구성되어 있다. 우리는 배경으로부터 전력선을 쉽게 구별하기 위하여 영상 내 픽셀들을 K개의 그룹으로 분할하는 방법인 K-평균 군집화 방법[17]을 활용한다. 특히, 우리는 관심 영역 영상 내 픽셀들의 색상 정보를 기반으로 K개의 그룹으로 분할하며, 분할 된 그룹들은 그림 4(c)와 같이 각각 다른 색상으로 표현된다. K-평균 군집화 결과로 만들어진 영상에서는 전력선과 배경이 서로 다른 색상으로 분류됨에 따라 명확하게 구분 가능해지며, 해당 영상에 캐니 가장자리 검출 방법을 적용하여 서로 다른 그룹끼리의 경계선을 추출한다. 하지만 K-평균 군집화 결과는 몇몇 잡음에 해당하는 픽셀도 포함하고 있으며, 이로 인해 생성되는 가장자리를 제거해야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위하여, 침식(erosion)과 팽창(dilation)의 형태학적 영상 처리(morphological image processing)를 캐니 가장자리 검출 결과 영상에 적용한다. 이를 통해 그림 4의 (e)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 마지막으로, 해당 결과에 허프 변환을 적용하여 전력선을 검출할 수 있으며, 중심 좌표를 추정할 수 있다. 허프 변환[18]은 점과 선의 이중성을 이용하여 영상 내에서 동일 선상에 해당하는 픽셀들을 식별하여, 해당 픽셀들을 식 (2)를 이용하여 극 좌표계의 점으로 변환한다.

$$x\cos(\theta) + y\sin(\theta) = \rho \quad (2)$$

여기서 x와 y는 영상에서의 픽셀 좌표이며, ρ는 영상의 원점에서 해당 직선까지의 거리를 나타낸다. θ는 x축과 해당 직선의 법선과의 방향각을 의미한다.

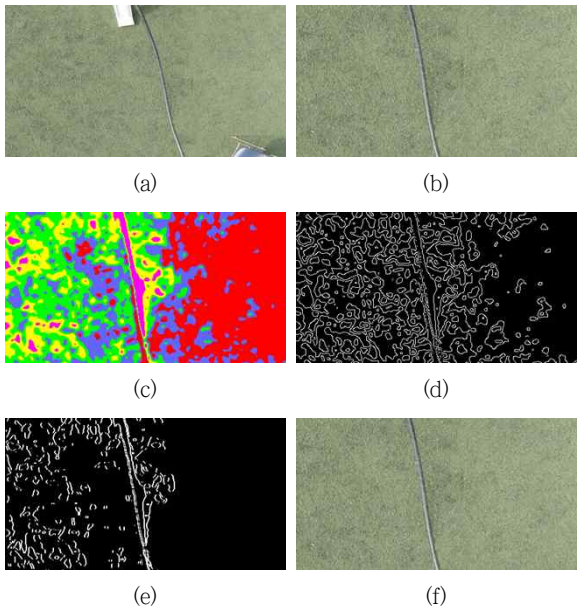


그림 4 전력선 검출 각 과정의 결과들: (a) 원본 영상, (b) 관심 영역 영상, (c) K-평균 군집화, (d) 캐니 가장자리 검출, (e) 형태학적 영상 처리, (f) 허프 변환 (빨간 선은 검출 된 전력선을 의미하며, 파란 점은 중심 좌표를 의미한다.)

Fig. 4 Results of each step in power-line detection: (a) original image, (b) region of interest image, (c) K-means clustering, (d) Canny edge detection, (e) Morphological image processing, (f) Hough transform (red line and blue circle indicate detected power-line and center point, respectively.)

우리는 허프 변환을 적용하여 최종적으로 영상 내에서 전력선을 검출할 수 있으며, 오검출을 방지하기 위하여 전력선의 몇 가지 특징들을 기반으로 조건을 설정하였다. 드론이 전력선을 성공적으로 추적하여 비행한다면, 전력선은 그림 4의 (b)에서 보이는 것과 같이 영상 내에서 세로로 길게 나타나며, 가로로는 얇다는 특징이 존재한다. 이를 검출된 전력선이 참인지 아닌지 검증하기 위한 제약 조건으로 채택하였으며, 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$\begin{cases} 1 & \text{if } (L_y \ge \alpha) \wedge (L_x \le \beta) \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (3)$$

여기서 1과 0은 참과 거짓을 의미하며, L_y와 L_x는 각각 픽셀 좌표계에서의 검출 된 전력선의 세로와 가로의 길이를 나타낸다. α와 β는 각각 임계값들이며, 여러 번의 실험을 통하여 결정되었다. 만약에 식 (3)에서 참으로 판단되면, 검출 된 직선은 전력선으로 간주되며, 해당 직선의 중심 좌표와 기울어진 각도를 얻어낸다. 그림 4는 전력선 검출의 각 과정의 결과들을 보여준다. 그러나 드론의 비행 중 진동으로 인하여 매 프레임 획득하는 전력선의 중심 좌표와 기울어진 각도는 급격하게 변화하며, 이는

드론이 전력선을 추적 제어하기 어렵게 만든다. 이 문제를 해결하기 위하여 측정 된 중심 좌표와 기울어진 각도는 칼만 필터를 이용하여 부드럽게 만들어지며, 이는 드론의 안정적인 제어를 가능하게 한다. 칼만 필터는 사후 확률이 가우시안 분포라는 가정하에 베이지안(Bayesian) 접근 방법을 이용하여 최적 해를 추정하는 방법이다[19]. 우리의 시스템에서는, 칼만 필터는 전력선의 중심 좌표와 기울어진 각도를 부드럽게 추정해주는데 도움을 주며, 칼만 필터를 위한 상태 방정식은 식 (4)와 같이 정의된다.

$$x_k = Fx_{k-1} + w_k \tag{4}$$

여기서 $x_k = [x(k)\ \psi(k)\ v_x(k)\ w_\psi(k)]^T$, $F = \begin{bmatrix} I_{2\times 2} & \Delta T_i \times I_{2\times 2} \\ 0_{2\times 2} & I_{2\times 2} \end{bmatrix}$, I는 단위 행렬, 그리고 0은 영 행렬을 의미한다. $x(k)$와 $\psi(k)$는 k번 째 프레임에서의 전력선의 중심 x좌표와 기울어진 각도이다. $v_x(k)$와 $w_\psi(k)$는 k번 째 프레임에서의 x축으로의 속도와 기울어진 각도의 각속도를 의미한다. ΔT_i는 영상 촬영의 시간 간격이며 w_k는 평균이 0이고 오차 공분산이 Q_k인 가우시안 잡음이다. 칼만 필터를 위한 측정 방정식은 식 (5)와 같이 정의된다.

$$z_k = Hx_k + v_k \tag{5}$$

여기서 $H = [I_{2\times 2}\ 0_{2\times 2}]$ 이고 v_k는 평균이 0이고 오차 공분산이 R_k인 가우시안 잡음이다. 칼만 필터는 두 구조를 반복적으로 수행하며 동작한다. 첫 번째는 시간 갱신이며, 이것은 상태 방정식을 이용하여 다음 프레임에서의 상태를 예측하는 과정이다. 이는 식 (6)-(8)로 표현되어진다.

$$x_{k|k-1} = Fx_{k-1|k-1} \tag{6}$$

$$z_{k|k-1} = Hx_{k|k-1} \tag{7}$$

$$P_{k|k-1} = FP_{k-1|k-1}F^T + Q_k \tag{8}$$

여기서 하단에 적힌 문자 $k|k-1$과 $k|k$는 사전(a priori)과 사후(a posteriori)를 나타낸다. 두 번째 구조인 측정치 갱신은 측정값을 이용하여 상태를 올바르게 수정하는 과정이며, 식 (9)-(11)로 나타낼 수 있다.

$$K_k = P_{k|k-1}H^T(HP_{k|k-1}H^T + R_k)^{-1} \tag{9}$$

$$P_{k|k} = (I - K_kH)P_{k|k-1} \tag{10}$$

$$x_{k|k} = x_{k|k-1} + K_k(z_k - z_{k|k-1}) \tag{11}$$

여기서 z_k는 k 번째 프레임에서의 측정값이며, 이는 전력선 검출 과정을 통해 얻어진다. 여기서, x와 y좌표 중 x좌표만 추정하는 이유는 y축으로의 움직임과 관련 있는 드론의 피치 값을 제어할 필요가 없기 때문이다. 이는 2.3절에서 자세하게 설명할 예정이다. 이렇게 부드럽게 추정 된 전력선의 중심 x좌표와 기울어진 각도는 드론이 전력선을 따라 비행하도록 하는 추적 제어기에서 입력으로 사용 된다.

2.3 드론의 추적 제어

본 연구에서는 쿼드로터 형태의 드론을 사용하였다. 사용한 드론의 도식적인 구조와 프로펠러들의 회전 방향은 그림 2에 나타나있으며, 운동방정식은 다음과 같이 표현된다[20].

$$\begin{aligned}
\ddot{\phi} &= \{\dot{\theta}\dot{\psi}(I_y - I_z) + lU_1\} \times \frac{1}{I_x} \\
\ddot{\theta} &= \{\dot{\phi}\dot{\psi}(I_z - I_x) + lU_2\} \times \frac{1}{I_y} \\
\ddot{\psi} &= \{\dot{\theta}\dot{\phi}(I_x - I_y) + lU_3\} \times \frac{1}{I_z} \\
\ddot{x} &= \cos(\phi)\sin(\theta)\cos(\psi) + \sin(\phi)\sin(\psi) \times \frac{U_4}{m} \\
\ddot{y} &= \cos(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) - \sin(\phi)\cos(\psi) \times \frac{U_4}{m} \\
\ddot{z} &= \cos(\theta)\cos(\phi) + \sin(\phi)\cos(\psi) \times \frac{U_4}{m} - g
\end{aligned} \tag{12}$$

여기서 m은 드론의 질량, l은 드론의 중심과 모터와의 거리, g는 중력 가속도, 그리고 I_x, I_y, I_z는 각 축에서의 관성 모멘트이다. U_1, U_2, U_3 그리고 U_4는 각각 롤, 피치, 요, 그리고 z축 방향으로의 속도를 위한 입력 값이며, 식 (13)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
U_1 &= \frac{1}{2\sqrt{2}I_x} \times k_p(F_1 - F_2 - F_3 + F_4) \\
U_2 &= \frac{1}{2\sqrt{2}I_y} \times k_p(F_1 + F_2 - F_3 - F_4) \\
U_3 &= \frac{1}{I_z} \times k_d(F_1 - F_2 + F_3 - F_4) \\
U_4 &= k_p(F_1 + F_2 + F_3 + F_4)
\end{aligned} \tag{13}$$

여기서 k_p는 추력 계수(thrust constant), k_d는 항력 계수(drag factor), 그리고 F_i는 i 번째 모터의 추력을 의미한다. 우리의 시스템에서 드론의 추적 제어는 위치 제어기와 자세 제어기로 구성되어 있다. 위치 제어기는 검출 된 전력선의 중심 x좌표를 이용하여 목표 롤 값을 계산한다. 전력선의 중심 x좌표가 영상의 중심으로부터 멀수록 큰 목표 롤 값이 계산되어진다. 피치의 경우에는 사용자에 의하여 목표 피치 값이 상수 값으로 설정되며, 이는 드론이 일정한 속도를 가지고 앞으로 이동하게 만든다. 시스템을 이런 식으로 설계한 이유는 드론이 전력선을 추종하며 비행할 때, 드론의 롤 값만 안정적으로 제어가 된다면, 앞으로 일정한 속도를 가지고 이동하여도 전력선을 성공적으로 추종하며 비행할 수 있기 때문이다. 또한, 위치 제어기는 드론의 고도 제어를 위한 제어 입력을 계산하며, 이는 드론이 일정한 높이에 위치할 수 있도록 만들어준다. 이 때, 드론의 높이를 제어하기 위

하여, 사용자가 설정한 목표 고도 값과, 기압계를 통해 측정되는 드론의 현재 고도 값이 사용된다. 자세 제어기는 드론의 롤, 피치, 요를 제어하기 위한 명령 입력을 계산한다. 이 때, 현재 롤, 피치 값은 드론에 장착 된 IMU로부터 얻을 수 있으며, 현재 요 값은 전력선 검출 과정에서 얻은 기울어진 각도가 사용된다. 추가적으로, 목표 롤 값은 위치 제어기로부터 계산되며, 목표 피치와 목표 요 값은 사용자에 의해 미리 정해진다. 위치 제어기와 자세 제어기 모두 목표 값과 현재 값 사이의 오차를 최소화하도록 만드는 PD 제어 기법에 기반 하여 설계되었다. PD 제어 기법은 실용적인 시스템에 널리 사용되고 있으며, 쉽게 구현이 가능하고, 복잡한 모델링 과정이 필요하지 않다. 이러한 장점들로 인하여, 제안하는 방법에서는 PD 제어 기법을 활용하였다. 선형 제어기인 PD 제어 방법을 비선형 모델을 가지는 드론에 적용하기 위해서, 드론의 비선형 모델은 선형화 되어야만 한다. 이 때, 미소각 근사(small angle approximation) 방법을 활용하여, 드론의 모델을 선형화 할 수 있으며, 이는 [21]에 자세하게 설명되어 있다. 목표 롤 값과 추력 제어 입력은 위치 제어기에 의해 계산 되며, 식 (14)로 표현된다.

$$\begin{aligned}\phi_d(k) &= K_{x,p}(x(k)-x_d)+K_{x,d}\frac{x(k)-x_d}{\Delta T_p}\\ U_4(k) &= K_{a,p}(z(k)-z_d)+K_{a,d}\frac{z(k)-z_d}{\Delta T_p}\end{aligned} \tag{14}$$

여기서 $\phi_d(k)$는 k 시간에서의 목표 롤, ΔT_p는 위치 제어기의 샘플링 시간, $x(k)$는 k 시간에서의 전력선 검출 과정을 통해 얻은 전력선의 중심 x좌표, $z(k)$는 k 시간에서의 기압계를 통해 얻은 드론의 고도이다. 또한, x_d는 상수 값을 가지는 목표 x 좌표를 의미하며, 전력선이 영상의 중심에 위치하도록 하기 위하여 관심 영역 영상 너비의 절반으로 설정하였다. z_d는 목표 높이 값이며, 이는 사용자에 의하여 미리 설정된다. $K_{x,p}, K_{a,p}, K_{x,d}$ 그리고 $K_{a,d}$는 각각 위치 제어기들의 비례 이득(gain)과 미분 이득이다. 위치 제어기를 수행한 이후에, 자세 제어기를 이용하여 드론의 움직임을 위한 명령 입력을 계산하며, 이는 식 (15)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}U_1(k) &= K_{\phi,p}(\phi(k)-\phi_d(k))+K_{\phi,d}\frac{\phi(k)-\phi_d(k)}{\Delta T_a}\\ U_2(k) &= K_{\theta,p}(\theta(k)-\theta_d)+K_{\theta,d}\frac{\theta(k)-\theta_d}{\Delta T_a}\\ U_3(k) &= K_{\psi,p}(\psi(k)-\psi_d)+K_{\psi,d}\frac{\psi(k)-\psi_d}{\Delta T_a}\end{aligned} \tag{15}$$

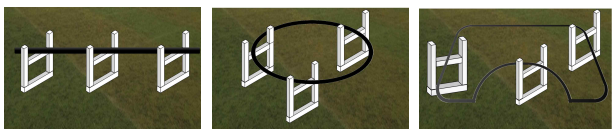
여기서 $U_1(k), U_2(k)$ 그리고 $U_3(k)$는 각각 k 시간에서의 롤, 피치, 요에 대한 명령 입력이다. ΔT_a는 자세 제어기의 샘플링 시간이며, $\phi_d(k)$는 위치 제어기로부터 얻어지는 목표 롤 값이다. θ_d는 목표 피치 값으로, 사용자에 의해 정해지는 상수 값이며, 이를 통해 드론이 일정한 속도로 앞으로 움직인다. ψ_d는 목표 요 값이며, 드론의 헤딩 각도가 전력선의 방향과 평행해야만 추종 제어를 할 수 있으므로 0°로 설정하였다. $\phi(k)$와 $\theta(k)$는 드론에 탑재 된 IMU로부터 측정되는 값이며, $\psi(k)$는 전력선 검출 과정에서 얻어지는 기울어진 각도 값이다. $K_{\phi,p}, K_{\theta,p}, K_{\psi,p}, K_{\phi,d}, K_{\theta,d}$ 그리고 $K_{\psi,d}$는 각각 롤, 피치, 요 제어기에 대한 비례 이득과 미분 이득이다.

모든 제어 이득 값들은 여러 번의 실험을 통해 각각 결정 되었으며, 자세 제어기에 대한 제어 이득 값들부터 결정한 후, 그리고 위치 제어기의 이득 값들을 결정하였다. 이 때, 드론의 발산 여부 및 수렴 속도 등을 고려하여 제일 적합한 이득 값들을 선정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 실험 환경 및 구성

개발한 전력선 추적 드론 시스템의 성능을 검증하기 위하여, 실제 환경과 유사한 환경을 설계하여 해당 환경 하에서 실험을 진행하였다. 유사한 환경에서 실험을 진행한 이유는 법의 규정 및 안전 문제로 인하여 실제 전력선이 설치 된 환경에서 실험을 수행하지 못하기 때문이다. 실제 환경과 유사하게 설계하기 위하여, 전력선이 송전탑 사이에 연결된 것처럼 양쪽에 알루미늄 프로파일을 설치하고 상단부에 전력선을 위치하도록 환경을 설계하였다. 또한, 전력선 아래에 다양한 물체들을 놓음으로써, 실제 환경과 유사하도록 만들었다. 실험에는 22,9kV 전력선이 이용되었으며, 그림 1에 나타난 바와 같이 AscTec Hummingbird 모델의 드론을 이용하였다. 드론에 설치한 카메라 모델은 GoPro이며, 드론 하방의 깨끗한 영상을 얻기 위하여 카메라의 자세를 제어해주는 짐벌도 설치하였다. 또한, 드론의 제어를 높은 빈도로 수행하기 위하여 카메라로부터 얻어지는 영상도 60Hz로 빠르게 얻어지도록 하였다. 개발한 시스템의 성능이 다양한 환경에서 강인하게 동작하는지 검증하기 위하여, 전력선이 설치 된 모양을 직선 형태, 원 형태, 그리고 곡선과 직선이 합쳐진 형태로 나누어서 총 3번의 실험을 진행하였다. 각 실험 환경에 대한 구조는 그림 5에 나타나 있다. 여기서, 검은 선은 전력선을 나타내며, 하얀색으로 표현한 장비는 알루미늄 프로파일을 나타낸다. 또한, 실험은 잔디 위에서 진행하였다. 이 때, 케이블의 길이는 약 30m 정도로 짧지만, 드론의 추적제어를 수행할 때는 반복적으로 케이블을 따라 비행하도록 실험을 수행함에 따라 장거리의 케이블 환경을 고려하여 실험을 진행하였다. 또한, 알루미늄 프로파일의 높이는 약 1.5m 정도로 설계하였다.



첫 번째 실험 환경(직선) 두 번째 실험 환경(원) 세 번째 실험 환경 (곡선 및 직선)

그림 5 세 가지 실험 환경

Fig. 5 Three experimental environments

3.2 실험 결과 및 분석

우리는 실험을 진행할 때, 전력선 검출 과정에서 사용되는 관심 영역 영상의 크기를 700×300으로 설정하였다. 그리고 $K-$평균 군집화 알고리즘에서 K를 6으로 설정하여, 영상 내 픽셀들을 색상 정보를 반영하여 6개의 그룹으로 나누었다. 또한, 전력선 검출 후 검증 과정에서 사용 되는 α와 β는 각각 210과 60으로 설정하였다. 우리는 객관적으로 시스템을 평가하기 위하여 3가지의 평가 항목을 이용한다. 첫 번째로는, 드론의 요 제어 성능이다. 이는 전력선의 기울어진 각도 추정의 성능뿐만 아니라 자세 제어 성능의 지표이다. 그림 6은 3번의 실험들에 대한 요 제어의 결과를 보여주고 있다. 2.3절에서 언급한 것과 같이 드론의 헤딩 각도가 전력선과 평행하게 비행하도록 만들기 위하여 목표 요 값을 0°로 설정 하였으며, 드론의 요가 100초 이상의 긴 시간 동안 잘 수렴하며 추종함을 볼 수 있다. 두 번째 평가항목은 드론의 x 방향으로의 위치 제어 성능이다. 이 평가 항목은 추적 제어의 성능뿐만 아니라 전력선 검출 과정의 성능을 나타내는 지표이다. 그림 7에 결과가 나타나 있으며, 목표 x 값은 관심 영역 영상 너비의 절반인 350번 째 픽셀로 설정되었다. 요 제어와 비슷하게, 긴 시간 동안 발산 없이 목표 x 값에 잘 수렴함을 확인할 수 있다. 표 1은 요 제어와 x 방향으로의 위치 제어에 대한 평균 절대 오차(mean absolute error)를 보여준다. 요 제어의 평균 절대 오차는 약 4.5°이며, x 위치의 평균 절대 오차는 약 22픽셀이다. 이 오차들은 드론이 전력선을 추종하며 비행하기에 충분한 정도이며, 세 번의 실험 모두 드론이 성공적으로 전력선을 따라 비행할 수 있었다. 마지막 성능 지표는 프레임 레이트이다. 드론을 전력선 점검에 사용하기 위해서는, 전력선 검출 및 추적 제어가 모두 실시간으로 수행되어야만 한다. 그림 8은 개발한 시스템의 프레임 레이트를 보여주며, 약 $20Hz$부터 $70Hz$의 범위를 가지고 시스템이 동작하였다. 그림 8을 보면 몇몇 프레임에서 상대적으로 낮은 프레임 레이트를 보여주는데, 그 이유는 영상 내에서 전력선과 비슷한 물체들이 존재하기 때문에, 전력선 검출 과정에서 비교적 많은 시간을 사용하기 때문이다. 하지만, 평균 $57Hz$의 시스템 속도를 보였으며, 최소 약 $20Hz$의 속도를 가지는 것을 고려하였을 때, 개발한 시스템은 실시간으로 동작하기에 충분하다.

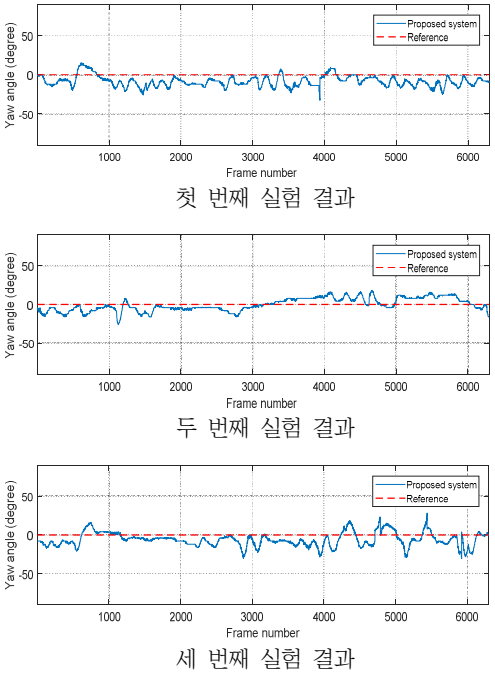


그림 6 영상 기반의 요 제어 결과
Fig. 6 Results of image-based yaw control

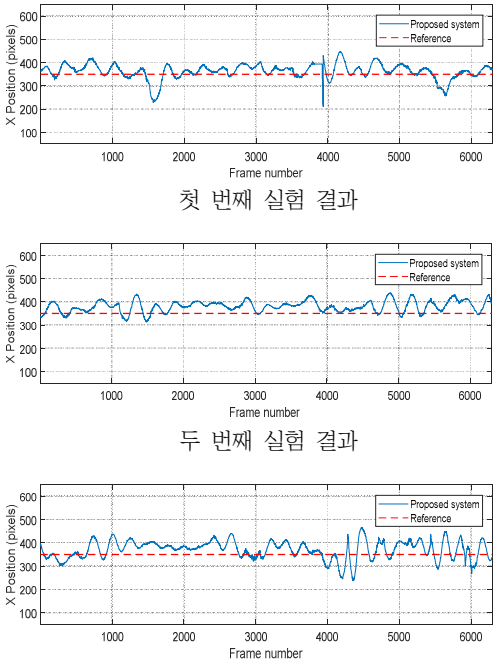
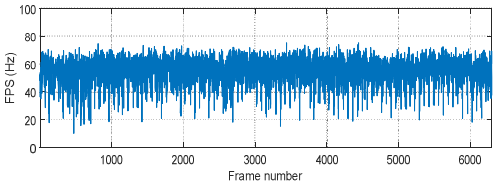


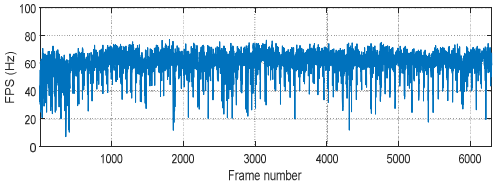
그림 7 영상 기반의 x 위치 제어 결과
Fig. 7 Results of image-based x position control

표 1 개발한 시스템의 정량 평가
Table 1 Quantitative evaluation of the developed system

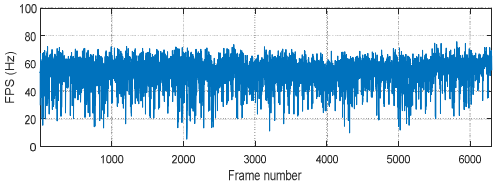
실험	요의 평균 절대 오차	x 위치의 평균 절대 오차	프레임 레이트
#1 (직선)	7.34 °	15.30 픽셀	55.96 Hz
#2 (원)	0.15 °	30.58 픽셀	60.50 Hz
#3 (곡선과 직선)	6.24 °	20.32 픽셀	54.87 Hz
평균	4.58 °	22.07 픽셀	57.11 Hz



첫 번째 실험 결과



두 번째 실험 결과



세 번째 실험 결과

그림 8 개발한 시스템의 프레임 레이트
Fig. 8 Frame rate of the developed system

표 2 개발한 시스템의 시간 분석
Table 2 Time analysis of the developed system

알고리즘	평균 계산 시간
K-평균 군집화	10.34 ms
캐니 가장자리 검출	3.30 ms
형태학적 영상 처리	3.42 ms
허프 변환	2.09 ms

3.3 시간 분석

개발한 알고리즘은 다양한 영상 처리 기법을 기반으로 설계되었기 때문에, 주변 환경의 복잡도에 따라 계산 시간이 변화한다는 특징이 있다. 개발한 알고리즘은 K-평균 군집화, 캐니 가장자리 검출, 형태학적 영상처리, 그리고 허프 변환에서 계산 시간의 대부분을 사용한다. 각 단계의 평균 계산 시간을 표 2에 나타내었다. 특히, K-평균 군집화 방법이 계산 시간의 약 54% 정도를 차지하였으며, 이는 K를 낮게 설정하여 시간 성능을 개선시킬 수 있다. 또한, 전력선 검출부터 전력선 추적까지 수행하는데 있어서 세 번의 실험동안 약 57Hz의 높은 평균 속도를 보였으며, 느린 경우에는 약 20Hz 정도의 성능을 보여주었다. 이는 드론이 실시간으로 추적 제어하며 전력선을 따라 비행할 수 있는 충분한 시간 성능이며, 전력선 추적 제어를 하는데 있어서 고도 제어 및 y축으로의 제어를 간단하게 변환하여 설계함으로써 계산 복잡도를 줄일 수 있었다. 또한, 표 1에서 볼 수 있듯이 각각 전력선이 다르게 놓인 세 번의 실험들에서 유사한 시간 성능을 보였으며, 이는 개발한 알고리즘이 전력선이 놓여진 모양에 크게 영향을 받지 않음을 알려준다.

4. 결 론

전력선 점검 현장에서는 아직까지도 고전적인 방법들을 사용하고 있으며, 이로 인해 비효율적이고, 시간 및 인력 소모가 상당하다는 한계점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 드론을 이용한 점검 방법이 소개되고 있으며, 관련 연구들도 활발하게 진행 중이다. 하지만, 발표 된 연구들은 아직까지도 드론을 조종사의 수동 조종으로 운용하는 연구가 대부분을 차지하고 있으며, 이는 조종사의 실수로 인하여 큰 사고로 이어질 수 있다는 한계점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 기존 연구들의 한계점을 극복하기 위하여, 드론이 자율적으로 전력선을 따라 비행할 수 있는 시스템을 개발하였다. 알고리즘은 크게 전력선 검출 과정과 영상 기반의 추적 제어로 구성되어 있다. 전력선 검출 과정에서는, 계산량을 줄이기 위하여 관심 영역 영상을 활용하였다. 더 나아가, 전력선의 특징을 고려하여 색상 기반의 군집화 과정을 적용시켜 배경과 전력선을 구별하였다.

마지막으로, 캐니 가장자리 검출 방법과 허프 변환을 융합하여 영상 내 전력선을 검출하고, 칼만 필터를 이용하여 전력선의 중심 좌표와 기울어진 각도를 추정하였다. 추적 제어를 위해서 우리는 드론의 위치 제어기와 자세 제어기를 설계하였으며, 두 제어기 모두 PD 제어 기법을 이용하였다. 위치 제어기에서는 드론의 고도 제어와 자세 제어를 위한 목표 롤 값을 계산하며, 자세 제어기에서는 드론의 자세가 목표 롤, 피치, 요 값에 수렴하도록 드론의 움직임을 제어한다. 위치 제어기와 자세 제어기가 반복적으로 수행됨에 따라 드론은 전력선을 추종하며 비행할 수 있다. 우리는 법의 규정 및 안전 문제로 인하여 실제 환경과 유사한 환경을 구성하여 실험들을 수행하였으며, 정량 평가들을 통하여 개발한 시스템이 다양한 환경에서도 강인하게 전력선을 추종하며 비행하는 것을 증명하였다.

하지만, 본 논문에서 제안한 방법은 전력선의 검출이 실패하였을 때는 전력선 추적이 어렵다는 한계점이 존재한다. 전력선 검출이 실패하는 경우, 드론은 그 자리에서 멈추고 고도를 높인 후 전력선의 재검출을 수행하거나, 다시 출발지점으로 돌아오는 등의 전략을 세워야 한다. 향후에는 이러한 상황까지 고려한 전력선 추적 기법에 대해 연구를 진행할 계획이다.

감사의 글

본 논문은 2018년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행 된 연구임(No. NRF-2015R1A2A2A01007545).

References

[1] J. Katrasnik, F. Pernus, and B. Likar, "A survey of mobile robots for distribution power line inspection," IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 25, No. 1, pp. 485-493, 2010.

[2] J. Sawada, K. Kusumoto, T. Munakata, Y. Maikawa, and Y. Ishikawa, "A mobile robot for inspection of power transmission lines," IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 6, No. 1, pp. 309-315, 1991.

[3] S. Yunlin, C. Jinen, and S. Dawei, "Patrol inspection of EHV electric power transmission line with helicopter in North China Power Network," Electric Power, 2003.

[4] P. Debenest, M. Guarnieri, K. Takita, E. F. Fukushima, S. Hirose, K. Tamura, A. Kimura, H. Kubokawa, N. Iwama, and F. Shiga, "Expliner-Robot for inspection of transmission lines," IEEE Conf. On Robotics and Automation, pp. 3978-3984, 2008.

[5] L. Wang, S. Cheng, and J. Zhang, "Development of a Line-Walking Mechanism for Power Transmission Line Inspection Purpose," IEEE Conf. On Intelligent Robots and Systems, pp. 3323-3328, 2009.

[6] A. Mostashfi, A. Fakhari, and M. A. Badri, "A novel design of inspection robot for high-voltage power lines," Industrial Robot: An International Journal of Robotics Research and Application, Vol. 41, No. 2, pp. 166-175, 2014.

[7] R. Ishino, and F. Tsutsumi, "Detection system of damaged cables using video obtained from an aerial inspection of transmission lines," IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol.2, pp. 1857-1862, 2004.

[8] B. Wang, X. Chen, Q. Wang, L. Liu, H. Zhang, and B. Li, "Power line inspection with a flying robot," International Conf. On Applied Robotics for the Power Industry, pp. 1-6, 2010.

[9] J. Katrasnik, F. Pernus, and B. Likar, "New Robot for Power Line Inspection," IEEE Conf. On Robotics, Automation and Mechatronics, pp. 1195-1200, 2008.

[10] S. Hrabar, T. Merz, and D. Frousheger, "Development of an autonomous helicopter for aerial powerline inspections," International Conf. On Applied Robotics for the Power Industry, pp. 1-6, 2010.

[11] Z. Li, Y. Liu, R. Hayward, J. Zhang, and J. Cai, "Knowledge-based power line detection for UAV surveillance and inspection systems," International Conf. Image and Vision Computing New Zealand, pp. 1-6, 2008.

[12] J. Zhang, L. Liu, B. Wang, X. Chen, Q. Wang, and T. Zheng, "High Speed Automatic Power Line Detection and Tracking for a UAV-Based Inspection," International Conf. On Industrial Control and Electronics Engineering, pp. 266-269, 2012.

[13] T. W. Yang, H. Yin, Q. Q. Ruan, J. D. Han, J. T. Qi, Q. Yong, Z. T. Wang, and Z. Q. Sun, "Overhead power line detection from UAV video images," International Conf. On Mechatronics and Machine Vision in Practice, pp. 74-79, 2012.

[14] L. F. Luque-Vega, B. Castillo-Toledo, A. Loukianov, and L. E. Gonzalez-Jimenez, "Power line inspection via an unmanned aerial system based on the quadrotor helicopter," IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, pp. 393-397, 2014.

[15] J. Lee, "Innovates 4th industrial revolution in electric power industry," Electric Power, vol. 11, pp. 50-53, 2017.

[16] "Drone(unmanned aerial vehicle) is utilized in electric equipment inspection," The Korean Institute of Electrical Engineering, vol. 63, no. 10, pp. 10-13, 2014.

[17] C. W. Chen, J. Luo, and KJ. Parker, "Image segmentation via adaptive K-means clustering and knowledge-based morphological operations with biomedical applications," IEEE Trans. On Image Processing, Vol. 7, No. 12, pp. 1673-1683, 1998.

[18] J. Illingworth, and J. Kittler, "A survey of the hough transform," Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Vol. 44, No. 1, pp. 87-116, 1988.

[19] R. E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems," Journal of Basic Engineering, Vol. 82, No. 1, pp. 35-45, 1960.

[20] J. Li, and Y. Li, "Dynamic Analysis and PID Control for a Quadrotor," IEEE Conf. On Mechatronics and Automation, pp. 573-578, 2011.

[21] L. E. Romero, D. F. Pozo, and J. A. Rosales, "Quadcopter stabilization by using PID controllers," Universidad de Cuenca, 2015.

저 자 소 개

정 종 민 (Jongmin Jeong)

2012년 연세대학교 전기전자공학부 (공학사), 2012년~현재 연세대학교 전기전자공학부 박사과정

Tel: +82-2-2123-2773

E-mail: jeong6560@yonsei.ac.kr

김 재 승 (Jaeseung Kim)

2012년 연세대학교 전기전자공학부 (공학사), 2012년~현재 연세대학교 전기전자공학부 박사과정

Tel: +82-2-2123-2773

E-mail: spctjs@gmail.com

윤 태 성 (Tae Sung Yoon)

전기학회 논문지 제 62권 제 2호 참고

박 진 배 (Jin Bae Park)

전기학회 논문지 제 62권 제 2호 참고