

# 무인항공기 이착륙을 위한 수평 유지 이동 플랫폼

이상웅\*, 곽준영\*, 주백석\*,#

\*금오공과대학교 기계시스템공학과

## Study of a Leveling Mobile Platform for Take-off and Landing of Unmanned Aerial Vehicles

Sangwoong Lee\*, Junyoung Kawk\*, Baeksuk Chu\*#

\*Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology.

(Received 19 February 2020; received in revised form 1 March 2020; accepted 12 March 2020)

### ABSTRACT

Applications for the unmanned aerial vehicle (UAV) have expanded enormously in recent years. Of all its various technologies, the UAV's ability to take off and land in a moving environment is particularly required for military or oceanic usage. In this study, we develop a novel leveling platform that allows the UAV to stably take off and land even on uneven terrains or in moving environments. The leveling platform is composed of an upper pad and a lower mobile base. The upper pad, from which the UAV can take off or land, is designed in the form of a 2 degrees of freedom (DOF) gimbal mechanism that generates the leveling function. The lower mobile base has a four-wheel drive structure that can be operated remotely. We evaluate the developed leveling platform by performing extensive experiments on both the horizontal terrain and the 5-degree ramped terrain, and confirm that the leveling platform successfully maintains the horizontal pose on both terrains. This allows the UAV to stably take off and land in moving environments.

**Key Words** : Take-off and Landing(이착륙), Leveling(수평 유지), Pose Control(자세 제어), Mobile Robot(이동 로봇), Unmanned Aerial Vehicle(무인항공기)

### 1. 서 론

최근 무인항공기의 사용이 많아짐에 따라 무인항공기의 활용 폭도 다양해지고 있다. 다양한 사용을 가능하게 하기 위해서는 여러 환경에서 안전하게 이착륙하는 기술이 필요하다. 여러 분야 중 특히 군사, 해양 분야에서는 움직이는 물체 위에 이착륙하는 기술이 요구되고 있다<sup>[1-5]</sup>. 움직이는 물

체가 수평면 위에서만 이동하는 것이 아니라 비평탄면 위에서도 이동하기 때문에 움직이는 물체 위에서는 무인항공기가 안정적으로 이착륙하는 데 어려움이 있다. 움직이는 물체 위에 무인항공기가 안정적으로 이착륙하기 위해서는 무인항공기가 이착륙하기 위한 이착륙 패드의 수평을 유지하는 수평 유지 기술이 필요하다<sup>[6-7]</sup>. 본 연구에서는 이러한 기술을 만족시키기 위해 수평 유지 이동 플랫폼을 설계하였다. 수평 유지 이동 플랫폼은 Fig. 1과 같이 비평탄면이나 경사면에서 이동할 때 이동 로봇 상부에 위치한 수평 유지 플랫폼이 항상 수

# Corresponding Author : bschu@kumoh.ac.kr

Tel: +82-54-478-7398, Fax: +82-54-478-7319

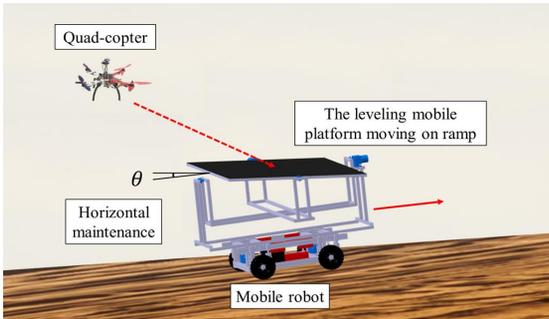


Fig. 1 Ramp landing environment of unmanned aerial vehicle

평을 유지하기 때문에 지면의 상태에 상관없이 무인항공기가 안정적으로 이착륙할 수 있다. 이를 응용한다면 이동 중에도 무인항공기의 이착륙이 가능해져 더욱 다양한 분야에서의 무인항공기 사용이 가능해질 것으로 예상된다. 무인항공기가 비평탄면을 이동하는 목표물에 이착륙하기 위한 수평 유지 이동 플랫폼 개발을 위해 본 논문에서는 수평 유지 이동 플랫폼의 짐벌(gimbal) 형태 구조와 하드웨어 구성, 이착륙 패드의 수평 유지 제어 알고리즘에 대하여 설명하였고, 이착륙 패드의 수평 유지 실험을 수평면과 경사면에서 진행하여 수평 유지 실험결과를 고찰하였다.

## 2. 수평 유지 이동 플랫폼의 구성 및 메커니즘

### 2.1 수평 유지 플랫폼

무인항공기가 이착륙하기 위한 플랫폼이 수평을 유지하기 위해서는 최소 2 자유도(degrees of freedom, DOF)를 구현하여야 한다. 2 자유도를 만족시킬 수 있는 로봇의 구조는 크게 병렬로봇 형태의 구조와 짐벌 형태의 구조를 고려할 수 있다<sup>[8-9]</sup>. 병렬로봇 구조는 물리적으로 안정적인 특성을 갖지만 제어를 위해 상당히 복잡한 기구학 문제를 해결해야 한다. 그에 반해 짐벌 구조는 간단한 제어로 수평을 유지할 수 있기 때문에 짐벌 구조 형태로 수평 유지 플랫폼을 설계하였다. Fig. 2 는 이 연구에서 설계된 수평 유지 플랫폼의 3차원

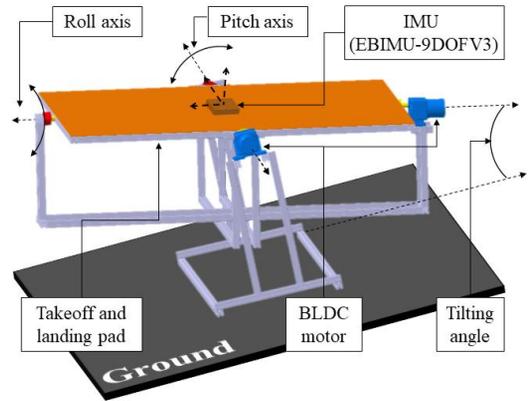


Fig. 2 3D model of the leveling platform

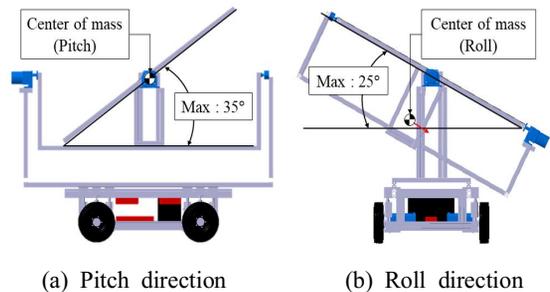


Fig. 3 Operating range of the leveling platform

형상을 보여준다. 지면(ground)이 임의 방향의 경사를 갖는 상황에서 2개의 BLDC(brushless direct current) 모터의 축이 2 자유도의 회전축과 일치하기 때문에 이착륙 플랫폼이 기울어진 만큼 모터를 반대 방향으로 회전시키는 것만으로 이착륙 패드의 수평을 유지할 수 있다. 또한, Fig. 3 b Roll 방향의 경우 무게 중심이 Roll 방향 회전축의 아래쪽에 위치하여 이착륙 플랫폼이 기울어질 때 중력에 의해 토크가 발생하게 된다. 이 토크는 항상 이착륙 패드를 수평으로 유지하는 방향으로 발생하기 때문에 구조적으로 더욱 안전한 형태가 되었다. Fig. 3 a의 경우 Roll 방향과 다르게 무게 중심과 Pitch 방향 회전축이 일치하여 모터의 힘만으로 수평을 유지하게 된다. 이 때문에 Roll 방향의 관성 모멘트가 Pitch 방향의 관성 모멘트보다 크어도 불구하고 Pitch 방향의 관성 모멘트를 고려한 토크 계산을 수행하였다.

$$\tau = I\alpha \quad (1)$$

$$I = \sum_i \frac{1}{12} m_i (a_i^2 + b_i^2) + m_i r_i^2, (i = 1, \dots, 4) \quad (2)$$

모터의 토크( $\tau$ )는 수식 (1)과 같이 관성 모멘트( $I$ )와 가속도( $\alpha$ )의 관계에 의해 계산된다. 이때 필요한 관성 모멘트는 수식 (2)를 이용하여 구하였다. 수식 (2)에서  $m_i$ 는 이착륙 패드를 구성하고 있는 3종의 알루미늄 프로파일과 1개의 상판의 질량을 나타내고 있다. 각 프로파일의 길이는 각각 1.5m, 1.44m, 0.705m이고 단위 길이당 무게는 0.923kg/m이다. 상판은 두께 6T, 밀도 610kg/m<sup>3</sup>으로 가정하였다.  $a_i$ 와  $b_i$ 는 각각 회전축에 수직인 각 구성 부재 단면의 폭과 높이이다.  $r_i$ 는 회전축과 질량중심 사이의 거리이다. 수식 (2)를 통해 구한 관성 모멘트와 상용 계산프로그램인 CATIA로 3차원 모델링을 하여 계산한 관성 모멘트는 각각 3.815kg/m<sup>2</sup>, 3.735kg/m<sup>2</sup>으로, 약 2.14%의 오차를 보였다. 이는 직접 계산할 때 실제 알루미늄 프로파일의 상세 단면형상 고려 과정에서 발생한 오차로 보인다. 사용된 모터의 토크를 선정하기 위해 두 관성 모멘트 중 더 큰 3.815kg/m<sup>2</sup>을 패드의 관성 모멘트, 가속도를 10°/s<sup>2</sup>으로 가정하였다. 수식 (1)을 통해 구한 토크는 약 0.67N·m이다. 무인항공기의 착륙을 고려하여 이보다 큰 토크를 구현하기 위해 30 : 1의 감속비를 갖는 모터를 선정하여 연구를 진행하였으나 속도제어 범위가 제조사에서 보증하는 속도인 300rpm보다 작아 만족스러운 제어가 되지 않았다. 제어 범위를 300rpm 이상으로 만들기 위해 감속비 200:1의 기어

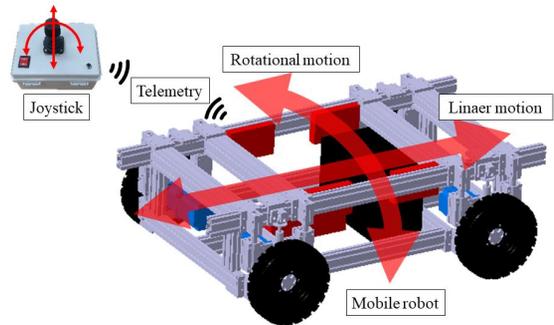
**Table 1 Hardware configuration of the leveling platform**

Component	Model	Specification
MCU	myRIO-1900	Input voltage : 12V
IMU	EBIMU-9DOFV3	9-DOF
Motor driver	SBDM-N024150	Input voltage : 24V Control type : UVW
Motor	BG90-N024150	150(W)
Gear box	K9P200B	Gear ratio 200:1

박스로 교체하여 제어 문제를 보완하였다. Table 1에 수평 유지 플랫폼에 사용된 하드웨어가 정리되어 있다.

## 2.2 이동 로봇

본 연구는 이동하고 있는 물체 위에 무인항공기가 착륙하는 것을 목표로 하고 있기 때문에 수평 유지 플랫폼을 움직이기 위한 이동 로봇이 필요하다. 이동 로봇은 수평 유지 플랫폼을 상부에 부착하고 이동이 가능하도록 제작하였다. 또한, 이동 로봇 근처에서 유선으로 조작한다면 무인항공기가 수평 유지 플랫폼에 이착륙할 때 사고의 위험이 있을 수 있다. 따라서 원거리에서 이동 로봇을 조작하여 사용자의 안전을 확보할 수 있도록 텔레메트리(telemetry) 통신을 이용하여 조종장치(joystick)와 이동 로봇을 연결하였다. Fig. 4는 제작된 이동 로봇의 3차원 모델이다. 4개의 바퀴와 이를 구동하기 위한 모터, 모터를 제어하기 위한 MCU(main control unit) 등이 Table 2에 정리되어



**Fig. 4 3D model of the mobile robot**

**Table 2 Hardware configuration of the mobile robot**

Component	Model	Specification
MCU	cRIO-9024	Input voltage : 12V
Motor driver	BLSM030Rv1	Input voltage : 24V Control type : UVW
Joystick	HFX SERIES 1	3-Axis, 1-Switch
Telemetry	3DR Telemetry	915MHz

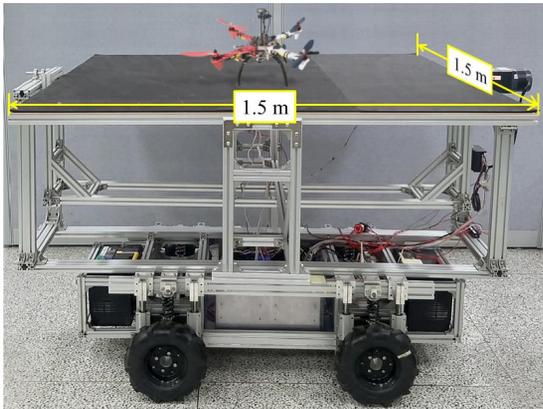


Fig. 5 Actual prototype of the leveling mobile platform

있다. 최종적으로 수평 유지 플랫폼을 이동 로봇 상부에 부착하여 수평 유지 이동 플랫폼을 완성하였다. Fig. 5는 실제로 제작을 완료한 수평 유지 이동 플랫폼의 모습이다. 상부에는 1.5m×1.5m<sup>2</sup> 면적의 이착륙 플랫폼이 항상 수평을 유지하여 언제든지 무인항공기가 이착륙할 수 있도록 하였고, 하부에는 원격으로 조종이 가능한 이동 로봇이 존재하여 무인항공기가 이착륙할 때 조종자의 안전을 확보하였다. 또한, 수평 유지 플랫폼과 모바일 로봇은 독립적으로 작동하기 때문에 모바일 로봇에 문제가 생기더라도 수평 유지 플랫폼 정상적으로 작동하여 무인항공기 이착륙에 문제가 없도록 하였다. Fig. 6은 수평 유지 이동 플랫폼의 하드웨어 연결도이다.

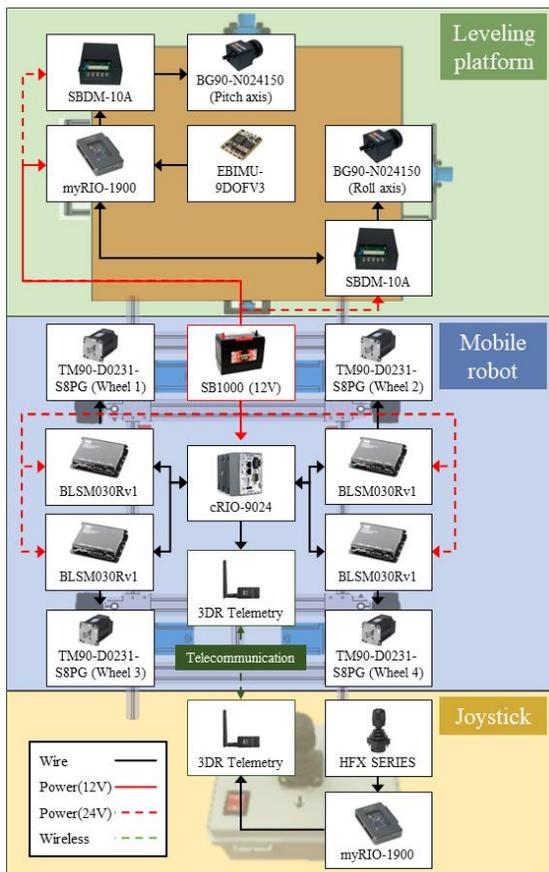


Fig. 6 Hardware connection of the leveling mobile platform

### 3. 자세제어 기반의 수평 유지 알고리즘

이착륙 패드의 수평을 유지하기 위해서는 현재 패드가 수평과 비교하여 얼마나 기울어져 있는지 파악하고 이를 보정하여 수평을 유지할 수 있다. 이착륙 패드의 기울어진 정도를 측정하기 위해 패드 중심부에 IMU(inertial measurement unit)센서를 부착하였다. 패드에 부착된 IMU센서를 통해 패드의 Roll, Pitch 방향으로 기울어진 각도를 측정하게 된다. 측정된 각도를 수평(0°)과 비교하여 오차를 자세제어기(pose-controller)에 입력하게 된다<sup>10)</sup>. 자세제어기에서는 각도 오차에 제어게인( $K_p$ )를 곱하여 출력하게 된다. 출력된 값은 모터로 전달되어

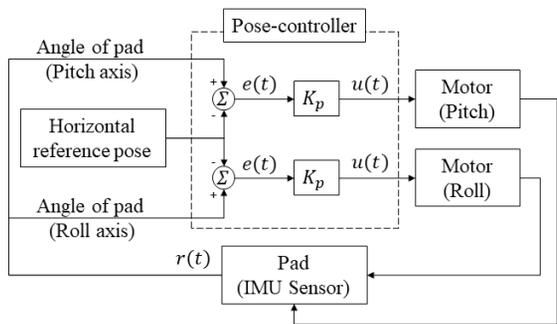


Fig. 7 Control algorithm based on pose-controller

패드의 각도를 변경하게 된다. 변경된 패드의 각도는 다시 IMU센서에서 측정되고 피드백(feedback)제어가 진행된다. Fig. 7은 사용된 자세제어 기반의 제어 알고리즘이다.

## 4. 수평 유지 실험

### 4.1 계단 응답(step response) 실험

제작한 수평 유지 이동 플랫폼의 성능을 측정하기 위해 계단 입력(step input)에 대한 시스템 응답 실험을 진행하였다. 패드를 구동하는 모터의 지령 각도를  $10^\circ$ 에서  $0^\circ$ 가 되도록 계단형상으로 주고 패드가 수평을 유지하도록 하는 상황을 구성하였다. Fig. 8은 Roll, Pitch 방향의 계단 입력과 각 방향의 패드 기울기다. Table 3에 오버 슈트(overshoot), 상승 시간(rise time), 정상상태 오차(steady-state error)가 정리되어 있다. Pitch 방향보다 Roll 방향의 제어 응답이 더 빠르고 정상상태 오차도 작은 것을 볼 수 있다. 이는 2장에서 설명과 같이 Roll 방향의 무게 중심이 회전축의 아래쪽에 있어 패드의 관성 모멘트가 수평 유지에 긍정적인 영향을 끼친 것으로 보인다.

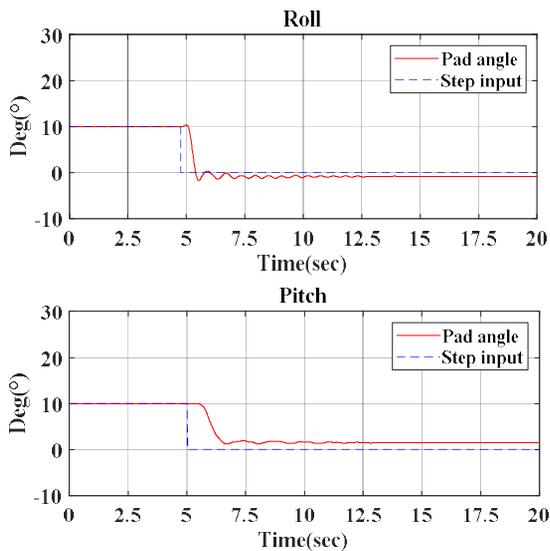


Fig. 8 Step response of the take-off and landing pad

Table 3 Step response results

Component	Roll	Pitch
Over shoot	-1.71 (deg)	-
Rise time	0.25 (sec)	0.66 (sec)
Steady-state error	0.83 (deg)	1.47 (deg)

### 4.2 평지 이동 시 수평 유지 실험

평지에서 이동 시 수평 유지 플랫폼이 수평을 잘 유지하는지 실험을 진행하였다. 이동 로봇과 이착륙 패드에 부착된 IMU 센서를 통해 평지 이동 시 이동 로봇과 이착륙 패드의 각도를 각각 측정하여 비교하였다. Fig. 9에 패드와 이동 로봇의 각도를 Roll과 Pitch 방향으로 나누어 나타내었다. Roll 방향 패드 각도의 양의 방향 및 음의 방향 최대값은 각각  $0.49^\circ$ 와  $-0.53^\circ$ 이다. 플랫폼의 이동 방향이 Roll 방향 회전축과 같기 때문에 가속도의 변화가 적어 Pitch 방향보다 상대적으로 작은 오차를 보인다. Pitch 방향 패드 각도의 양의 방향 및 음의 방향 최대값은 각각  $1.09^\circ$ 와  $-2.27^\circ$ 로 상대적으로 큰 오차를 보이는데, 이동 로봇의 각도 또한  $0.92^\circ$ 와  $-0.89^\circ$ 로 실험 초반과 후반부에 상대적으로 큰

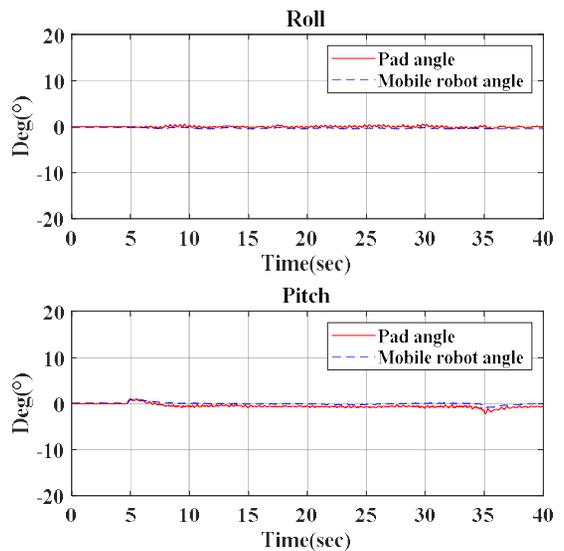


Fig. 9 Leveling experiment when moving on the horizontal terrain



Fig. 10 Horizontal movement experiment of the leveling mobile platform

값을 갖는다. 초반 각도 상승은 이동 로봇이 가속하여 수평 유지 플랫폼의 무게 중심이 뒤쪽으로 이동하게 되고 그로 인해 이동 로봇의 후방 서스펜션이 압축되어 발생한 것으로 보인다. 이와 반대로 후반부의 각도 하강은 이동 로봇의 감속으로 인해 수평 유지 플랫폼의 무게 중심이 앞으로 이동하게 되고 전방 서스펜션이 압축되어 발생한 것으로 보인다. Fig. 10에 평지 이동 실험 중인 수평 유지 이동 플랫폼이 있다.

### 4.3 경사면 이동 시 수평 유지 실험

경사면 이동 실험은 수평 유지 이동 플랫폼이 경사면을 이동할 때 이착륙 패드의 수평 유지 성능을 검증하기 위해 진행하였다. 실험은 약 5°의 경사면을 내려갈 때와 올라갈 때로 나누어 진행하였다. Fig. 12는 경사면을 내려갈 때, Fig. 13은 경사면을



Fig. 11 Ramp movement experiment of the leveling mobile platform

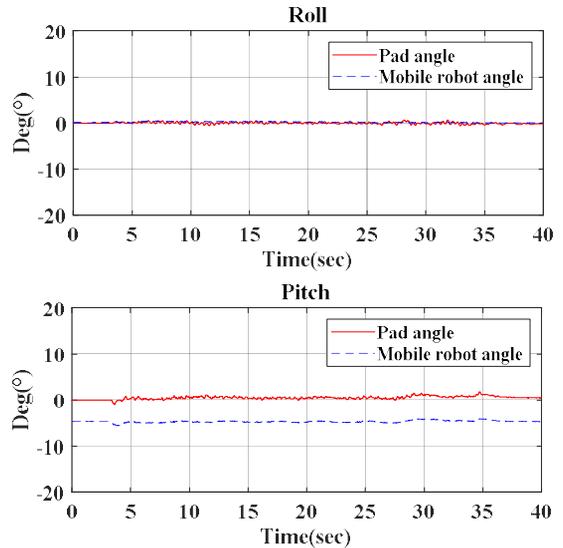


Fig. 12 Leveling experiment on down-falling ramp terrain

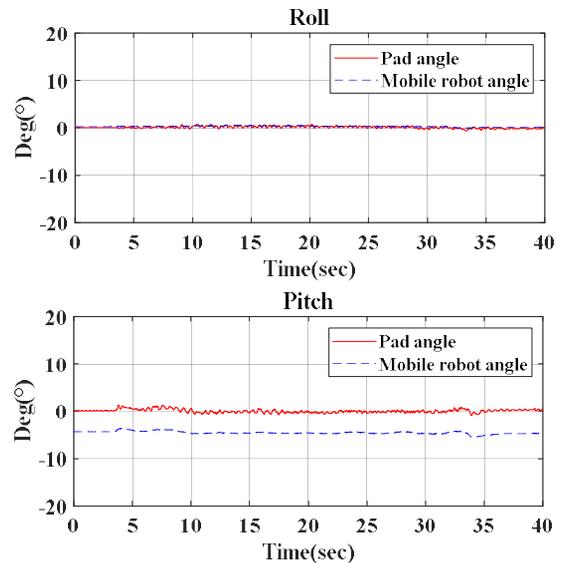


Fig. 13 Leveling experiment on up-rising ramp terrain

올라갈 때 측정된 데이터이다. 경사면 하강 실험에서의 패드의 Pitch 방향 각도의 양의 방향 및 음의 방향 최대값은 1.76°와 -0.97°, 상승 실험에서는 1.32°와 -0.92°로 비슷한 성능을 보였다. 경사면

하강 실험에서 패드의 Roll 방향 각도의 양의 방향 및 음의 방향 최대값은  $0.63^\circ$  와  $-0.64^\circ$ , 상승 실험에서는  $0.78^\circ$  와  $-0.66^\circ$  이다. 수평면에서 진행한 실험결과와 같이 Pitch 방향에서 초반과 마지막에 각도가 상대적으로 크게 변하는 것을 볼 수 있다.

또한, 경사면 상승 실험은 하강 실험의 반대 방향으로 이동 로봇이 움직였기 때문에 Pitch 그래프의 이동 로봇의 각도가 약  $-5^\circ$  이고 초반과 후반의 각도 변화가 반대인 것을 볼 수 있다. Fig. 11에 경사면에서 이동 실험 중인 수평 유지 이동 플랫폼이 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 무인항공기가 경사면 이착륙을 할 수 있도록 수평 유지 이동 플랫폼을 제작하고 실험을 통해 검증하였다. 짐벌 형태의 수평 유지 플랫폼을 제작하여 기구학 문제를 단순화하였고, 안정적인 Roll, Pitch 방향 제어를 구현하였다. 무선 제어가 가능한 이동 로봇을 통해 이후에 무인항공기가 이착륙할 때 조종자의 안전을 확보하였다. 경사면에서 이동 시 이착륙 패드가 수평을 잘 유지하는지 알아보기 위해 실험을 진행하였다. 실험결과 기준 각도( $0^\circ$ )로부터 Roll 방향 패드 각도의 양의 방향 및 음의 방향 최대 오차는  $0.92^\circ$  와  $-0.89^\circ$  로 이는 모터와 기어박스 구조가 갖는 백래시(backlash)의 영향으로 판단된다. 또한, Pitch 방향 패드 각도와 기준 각도의 양의 방향 및 음의 방향 최대 오차는  $1.76^\circ$  와  $-2.27^\circ$  로 상대적으로 크게 나왔는데, 이는 로봇의 서스펜션 강성이 충분하지 못하여 발생한 것으로 생각된다. 실험결과를 토대로 종합적으로 판단해 볼 때 수평 유지 이동 플랫폼이 등속도로 움직일 때에는 비록 이동 중일지라도 수평을 원활히 유지하여 무인항공기가 이착륙할 수 있을 것으로 보인다. 이후 속도제어 성능이 우수한 모터로 교체하고 서스펜션의 스프링을 보다 강성이 높은 것으로 교체한다면 더욱 정밀한 제어가 가능할 것으로 예상된다.

## 후 기

본 연구는 금오공과대학교학술연구비에 의하여 연구된 논문임.

## REFERENCES

- Gajjar, B. I. and Zalewski, J., "A07: On-ship Landing and Takeoff of Unmanned Aerial Vehicles (UAV'S)," IFAC, Vol. 37, No. 20, pp. 42-46, 2004.
- Falanga, D., Zanchettin, A., Simovic, A., Delmerico, J. and Scaramuzza, D., "Vision-based Autonomous Quadrotor Landing on a Moving Platform," International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR), pp. 200-207, 2017.
- Dinh, T. X. and Ahn, K. K., "Adaptive tracking control of a quadrotor unmanned vehicle," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 18, No. 2, pp. 163-173, 2017.
- Choi, F. B., Ha, C. and Lee, D., "Vision-Based Collision-Free Formation Control of Multi-UGVs using a Camera on UAV," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 30, No. 1, pp. 53-58, 2013.
- Jeong, J., Byun, Y., Song, W. and Kang, B., "Study on Performance Prediction of Electric Propulsion System for Multirotor UAVs," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 33, No. 6, pp. 499-508, 2016.
- Godzdzank, R., Rutherford, M. J., and Valavanis, K. P., "Islands: A Self-leveling Landing Platform for Autonomous Miniature UAVs," International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 170-175, 2011.
- Dalamagkidis, K., Ioannou, S., Valavanis, K. and Stefanakos, E., "A Mobile Landing Platform for Miniature Vertical Take-off and Landing Vehicles," Mediterranean Conference on Control

- and Automation, pp. 1-6, 2006.
8. Kang, H. and Kang, H., "A Balance Maintain System of Stewart Platform using AHRS," Korea Society of Industrial Informantion Systems, Vol. 18, No. 4, pp. 37-41, 2013.
  9. Ha, H. P. and Han, M. C., "A Fast Forward Kinematic Analysis of Stewart Platform," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 25, No. 3, pp. 339-352, 2001.
  10. Ang, K. H., Chong, G. and Li, Y., "PID control system analysis, design, and technology," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 13, No. 4, pp. 559-576, 2005.