

# 케이블 차동구동 구조의 2-축 안정화 장치

## 2-Axis Stabilization System of Cable Differential Mechanism

\*김해진<sup>1</sup>, 김현민<sup>2</sup>, 조선미<sup>3</sup>, \*강민식<sup>4</sup>

\*H. J. Kwon<sup>1</sup>, H. M. Kim<sup>2</sup>, S. M. Jo<sup>3</sup>, #M. S. Kang(mskang@kyungwon.ac.kr)<sup>4</sup>

<sup>1</sup>경원대학교 기계공학과, <sup>2</sup>경원대학교 기계공학과, <sup>3</sup>경원대학교 기계공학과, <sup>4</sup>경원대학교 기계공학과교수

Key words : camera stabilization head, cable differential, PD control

### 1. 서론

본 연구는 선박에서의 촬영과 같은 이동 상황에서 안정한 절대 영상을 획득하기 위한 안정화 장치를 개발하기 위하여 실시되었다. 이 케이블 차동구동구조의 2-축 안정화 장치는 운동하는 기반에 장착되며, 영상을 촬영하기 위한 카메라는 이 장치의 위에 장착된다.

현재 해외에서 사용하는 2-자유도 김발구조의 안정화 장치는 구조는 간단하나 Roll 김발이 Pitch 김발에 부하로 작용하기 때문에 Pitch 구동 모터의 용량이 증가하게 되어 장치의 무게와 부피가 커지게 된다. 또한 기어의 사용으로 백래시가 존재하여 안정화 성능이 저하된다. 이를 보완하기 위하여 볼스크류 2-자유도 안정화 플랫폼 장치를 제작하였다. 이 구조는 구동부를 베이스에 장착시킴으로써 구동부하를 감소시키고 볼스크류 직선 구동에 의하여 플랫폼의 크기 및 모터의 용량 또한 감소시킬 수 있었다. 그러나 직선 구동으로 안정화의 구동 범위가 제한될 뿐만 아니라, 구동부와 센서부의 비선형 운동으로 인하여 안정화 제어 성능이 눈에 띄게 개선되지 못하였다.

이러한 김발구조나 볼스크류 구조의 단점들을 보완하기 위하여 이번 연구에는 기존의 미국 특허인 "Cable Differential"의 4단 구조를 2단 구조로 단순화시켜 설계 및 적용함으로써 구조를 간단하게 제작하였다. 또한, 구동부를 기반에 장착시킴으로써 구동부하를 감소시켜 모터의 용량을 감소시켰다. 기존의 김발구조에서 발생한 백래시의 영향을 줄이기 위하여 케이블-폴리 구조의 무백래시 운동을 증폭시킴으로써 안정화 제어의 성능을 향상시키고자 한다.



Fig. 1 Cable Differential

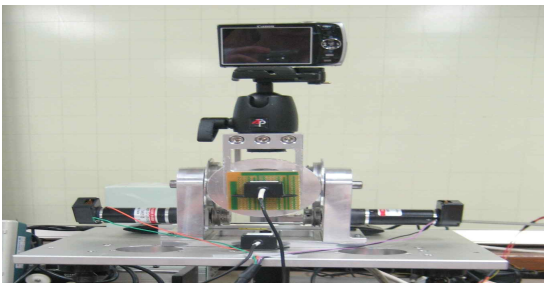


Fig. 2 Camera Stabilization Head

### 2-1. 2-축 안정화 장치의 운동방정식

Pitch 방향의 회전각은  $\theta_p$ , Roll 방향의 회전각을  $\theta_r$ 이라고 하면 다음과 같이 정의된다.

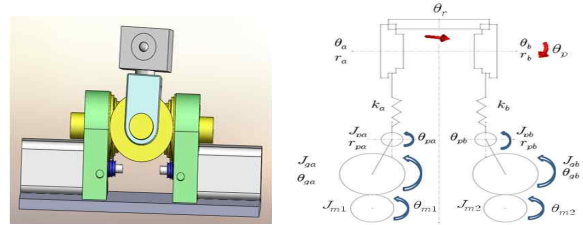


Fig. 3 Dynamic Model of Cable Differential Mechanism

$$\theta_r = \frac{1}{2}(\theta_a - \theta_b), \theta_p = \frac{1}{2}(\theta_a + \theta_b)$$

$$\therefore \theta_a = \theta_p + \theta_r, \theta_b = \theta_p - \theta_r \quad (1)$$

또한 모터는 geared motor임을 고려하여 기어비를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{\theta_{m1}}{\theta_{ga}} = R_a, \frac{\theta_{m2}}{\theta_{gb}} = R_b \rightarrow \theta_{ga} = \frac{\theta_{m1}}{R_a} = \theta_{pa}, \theta_{gb} = \frac{\theta_{m2}}{R_b} = \theta_{pb} \quad (2)$$

운동방정식을 구하기 위하여 Lagrange's Equation을 적용하기 위하여 운동에너지와 위치에너지를 다음과 같이 정리한다.

$$T = \frac{1}{2} I_{m1} \dot{\theta}_{m2}^2 + \frac{1}{2} J_{ga} \dot{\theta}_{ga}^2 + \frac{1}{2} J_{pa} \dot{\theta}_{pa}^2 + \frac{1}{2} I_{m2} \dot{\theta}_{m2}^2$$

$$+ \frac{1}{2} J_{gb} \dot{\theta}_{gb}^2 + \frac{1}{2} J_{pb} \dot{\theta}_{pb}^2 + \frac{1}{2} J_r \dot{\theta}_r^2 + \frac{1}{2} J_p \dot{\theta}_p^2$$

$$U = \frac{1}{2} k_a (r_a \theta_a - r_{pa} \theta_{pa})^2 + \frac{1}{2} k_b (r_b \theta_b - r_{pb} \theta_{pb})^2 \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_i} + \frac{\partial U}{\partial \theta_i} = Q_i \quad ; i = m_1, m_2, p, r \quad (4)$$

위에서 구한 운동에너지와 위치에너지를 식 (3)을 식 (4)의 Lagrange's Equation 에 적용하면,

$$J_{m1} \ddot{\theta}_{m1} + k_a \left( \frac{r_{pa}}{R_a} \right)^2 \theta_{m1} - k_a \frac{r_{pa}}{R_a} r_a \theta_p - k_a \frac{r_{pa}}{R_a} r_a \theta_r = 0$$

$$J_{m2} \ddot{\theta}_{m2} + k_b \left( \frac{r_{pb}}{R_b} \right)^2 \theta_{m2} + k_b \frac{r_{pb}}{R_b} r_b \theta_p - k_b \frac{r_{pb}}{R_b} r_b \theta_r = 0$$

$$J_p \ddot{\theta}_p + (k_a r_a^2 + k_b r_b^2) \theta_p + (k_a r_a^2 - k_b r_b^2) \theta_r - k_a \frac{r_{pa} r_a}{R_a} \theta_{m1} + k_b \frac{r_{pb} r_b}{R_b} \theta_{m2} = 0$$

$$J_r \ddot{\theta}_r + (k_a r_a^2 + k_b r_b^2) \theta_r + (k_a r_a^2 - k_b r_b^2) \theta_p - k_a \frac{r_{pa} r_a}{R_a} \theta_{m1} - k_b \frac{r_{pb} r_b}{R_b} \theta_{m2} = 0$$

위의 식을 간단히 하기 위하여 a를 1로, b를 2로 놓는다. 또한, 케이블의 강성은 매우 크다고 가정하였기 때문에  $k_a = k_b = k$ 임을 적용하여 식을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$J_{m1} \ddot{\theta}_{m1} + k \left( \frac{r_{p1}}{R} \right)^2 \theta_{m1} - k \frac{r_{p1}}{R} r_1 \theta_p - k \frac{r_{p1}}{R} r_1 \theta_r = 0 \rightarrow \tau_{m1}$$

$$J_{m2} \ddot{\theta}_{m2} + k \left( \frac{r_{p2}}{R} \right)^2 \theta_{m2} + k \frac{r_{p2}}{R} r_2 \theta_p - k \frac{r_{p2}}{R} r_2 \theta_r = 0 \rightarrow \tau_{m2}$$

$$J_p \ddot{\theta}_p + k(r_1^2 + r_2^2) \theta_p + k(r_1^2 - r_2^2) \theta_r - k \frac{r_{p1} r_1}{R} \theta_{m1} + k \frac{r_{p2} r_2}{R} \theta_{m2} = 0$$

$\rightarrow \tau_{d1}$

$$J_r \ddot{\theta}_r + k(r_1^2 + r_2^2)\theta_r + k(r_1^2 - r_2^2)\theta_p - k \frac{r_{p1}r_1}{R} \theta_{m1} - k \frac{r_{p2}r_2}{R} \theta_{m2} = 0 \rightarrow \tau_{d2}$$

### 2-2. 2-축 안정화 장치의 제어기 설계

제어기를 설계하기 위하여 모터 실험을 통하여 모터의 질량관성모멘트  $J=1.64[kg \cdot m^2]$ 임을 확인할 수 있었다. 이 때 센서에 의하여 측정되는 각도(degree)를 전압(volt)로 변환하기 위하여 0.035의 상수로 나누어 환산하게 되면 모터의 질량관성모멘트  $J=1.64[kg \cdot m^2]/0.035=46.9[kg \cdot m^2]$ 가 된다.

제어기를  $\zeta=0.707, t_s=0.2s = \frac{4}{\zeta w_n}, w_n=14.14rad/s$ 로 선정하여 설계를 하였다. 특성방정식  $Js^2 + K_d s + K_p = 0$ 에 의하여

$$s^2 + \frac{K_d}{J} s + \frac{K_p}{J} = s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2 = 0$$

의 식이 전개된다. 정해진 파라미터를 적용시키면 제어기의 이득값은 다음과 같이 구해진다.

$$K_d = 2\zeta w_n \cdot J = 2 \times 0.707 \times 14.14 \times 46.9 = 937.72 \quad (1)$$

$$K_p = w_n^2 \cdot J = 14.14^2 \times 46.9 = 9377.17$$

실제 제어기를 구축하기 위하여 사용된 LabView에 위 (1)의 이득값을 적용하기 위하여 다음 (2)의 과정을 거치게 되면 실질적으로 제어기에 적용되는 이득값이 나오게 된다.

$$\therefore K_d = 937.72/2^8 = 3.66, K_p = 9377.17/2^8 = 36.63 \quad (2)$$

### 3. 케이블 차동구동구조의 2-축 안정화 제어

Pitch 와 Roll 방향의 흔들림에 대한 케이블 차동구동구조의 2-축 안정화 제어는 우선 기울기센서로부터 플랫폼의 pitch와 roll각을 측정한다. 다음 각각 기준 pitch와 roll각과의 오차를 각 모터의 회전각으로 변환한 후 이 값을 각각의 모터 제어기에 위치입력으로 제공한다. 각 모터의 제어는 각각의 이득값을 사용한 PD-제어를 적용한다. Fig. 4는 카메라 플랫폼의 제어시스템을 나타낸다.

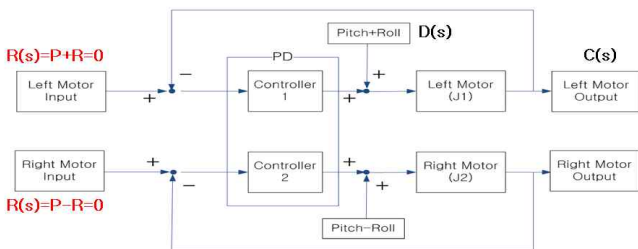
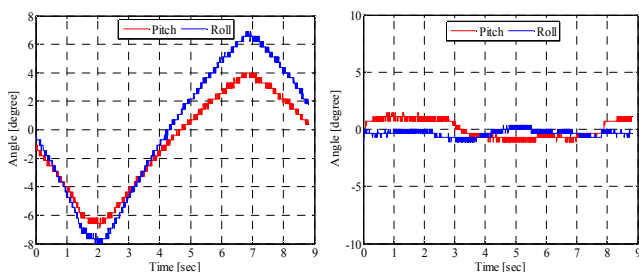


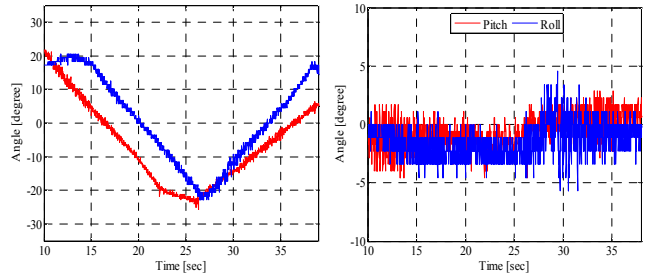
Fig. 4 Stabilization Control of Platform for Camera

### 4. 결과 및 논의

케이블 차동구동구조의 2-축 안정화 장치를 카메라 안정화에 적용하여 구현하였다. 이 장치의 안정화 성능을 검증하기 위하여 선박 위에서 촬영을 한다는 가정 하에 전동차기를 이용하여 외란을 주었다.



(a)Before Stabilization Control (b)After Stabilization Control  
Fig. 5-1 Control Experiment of Ball-screw Mechanism



(a)Before Stabilization Control (b)After Stabilization Control  
Fig. 5-2 Control Experiment of Cable Differential Mechanism

Fig. 5-1은 볼스크류 구조의 제어실험 결과로써 안정화 제어 전후의 pitch, roll신호를 각각 나타낸 그래프이다.

Fig. 5-2는 케이블 차동구동 구조의 제어실험 결과로써 역시 안정화 제어 전후의 신호를 각각 보여주고 있다. 외란이 가해지는 상태에서 플랫폼이 안정화 되어 거의 수평으로 제어되고 있음을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 선박과 같이 기울어지는 환경에서 획득한 영상 이 안정할 수 있도록 케이블차동구동구조의 2-축 안정화 장치를 제작 및 실험함으로써 그 성능을 검증하였다. 2008년에 제작되었던 볼스크류 구동 메커니즘의 비선형성 운동에 의한 성능 저하를 보완하기 위하여 채택한 케이블-폴리 구조의 무백래시 운동으로 안정화 제어의 성능이 향상되었음을 확인하였다. 또한, 향후 케이블 차동구동 메커니즘을 이용한 설계 및 제어 기술을 확보하여 유사 구동 시스템으로의 적용이 기대된다.

### 후기

본 연구는 2009 창의적 종합설계 (Capstone Design) 경진대회 출품작으로, 경원대학교 공학혁신센터의 연구비지원에 의해 수행되었음.

### 참고문헌

- Ogata K., Modern Control Engineering-4th edition, SciTech Media, 2003.
- Bechwith et al., "Mechanical Measurements-5th", Pearson Education Korea, 2002.
- 박형준, 김용일, 정승배, 김두호, 강민식, "이동 카메라용 2-축 안정화 플랫폼", 한국정밀공학회 2008년도 추계 학술대회 논문집, pp. 107~108, 2008.
- 정남용, "기계설계," 삼성북스.
- 곽두영, "LabVIEW 8.6(한글판)," OHM사
- 김두호, "조작기의 힘반영 제어를 위한 동역학 해석 및 시뮬레이션 모델", 경원대학교 석사 논문, 2008.
- 강민식, 김두호, 최선일, 김남형, 이종비, "마스터/슬레이브 원격 서보조작기의 힘반영제어", 한국원자력연구원 2차년도 연차 보고서, 2009.