

# 임펄스 측정잡음에 강인한 저가형 볼앤빔 시스템의 접촉식 볼 추적센서 개발

## Contact-Type Ball Tracking Sensor Robust to Impulsive Measurement Noises for Low-cost Ball-and-beam Systems

장 주 영, 이 자 승, 윤 한 솔, 나 원 상\*  
(Joo Young Jang<sup>1</sup>, Jaseung Lee<sup>1</sup>, Hansol Yoon<sup>1</sup>, and Won-Sang Ra<sup>1,\*</sup>)

<sup>1</sup>School of Mechanical and Control Engineering, Handong Global University

**Abstract:** This paper proposes a new contact type ball tracking sensor to improve the control performance of a low cost ball-and-beam system. It is well-known that the impulsive measurement noise contained in ball position measurement is one of the factors which severely degrades the ball-and-beam control performance. The impulsive ball position measurement noises often appear under the sporadical ball floating on the beam. This fact motivates us to devise a simple analog preprocessing circuit to determine whether the ball loses the contact or not. Once the abnormal ball position measurement is detected, the design problem of the ball tracking sensor can be cast into the typical state estimation problem with missing data. In order to tackle the real-time implementation issue, a steady-state Kalman filter is applied to the problem. Through the experimental results, the usefulness of the proposed scheme is demonstrated.

**Keywords:** ball and beam, contact type ball tracking sensor, impulsive measurement noise, missing data, state estimation

### I. 서론

볼앤빔 시스템은 다양한 선형 및 비선형 제어기법의 교육 및 학습에 두루 사용될 수 있는 대표적인 불안정 시스템 중 하나이다. 이러한 이유로 지금까지 국내외에서 새로운 형태의 볼앤빔 제어시스템을 제작하고, 이를 효과적으로 제어하기 위한 연구들이 활발히 진행되어 왔다[1-4].

빔 구동을 위한 모터의 인덕턴스를 무시하는 경우, 볼앤빔 시스템은 빔의 각도 및 각속도, 볼의 위치 및 속도를 상태변수로 하는 동적시스템으로 모델링된다[4]. 따라서 볼앤빔 시스템을 효과적으로 제어하기 위해서는 이들 상태변수를 측정 혹은 추정하는 작업이 선행되어야 한다. 빔의 각도와 각속도는 포텐쇼미터(potentiometer), 타코미터(tachometer), 자이로(gyroscope) 등의 센서를 이용하여 손쉽게 측정이 가능한 반면 볼의 위치 및 속도정보를 획득하기 위해서는 별도의 센서를 고안하여야 한다[5-8].

볼의 위치를 측정하는 센서는 크게 접촉식과 비접촉식으로 구분된다. 접촉식 센서는 전도 특성을 갖는 금속 볼의 위치에 따라 저항 값이 달라지는 가변 저항을 이용하여 구현된다. 이 방식은 상대적으로 간단한 구조를 가지고 있으나 볼 위치 측정 정확도를 높이기 위해서는 저항이 큰 소재를 이용하여 센서를 제작해야 한다는 부담이 있다[5,6].

더욱이, 볼의 운동에 따라 저항선과 볼의 접촉이 유지되지 않는 경우, 볼 위치 측정치에 임펄스성 측정잡음이 나타나게 되며, 이는 볼앤빔 제어성능을 급격히 저하시키는 요인들 중 하나로 알려져 있다[8].

접촉식 센서를 대체하기 위해 외장 카메라, 적외선 혹은 레이저 거리센서 등을 이용한 볼 위치 측정 방식이 고려되기도 하였다[6-8]. 하지만 이러한 방식은 접촉식 센서에 비해 상대적으로 고가일 뿐만 아니라, 경우에 따라서는 볼 위치 인식 알고리즘을 구현하기 위해 많은 계산량이 요구되기도 한다. 또한, 센서 배치 공간이 협소한 경우에는 적용에 제한이 있을 수 있다는 단점이 있다.

본 논문에서는 전술한 문제를 해결하기 위해, 저가형 볼앤빔 시스템 구축을 위한 새로운 형태의 접촉식 볼 추적 센서를 제안한다. 볼 추적센서를 구성하고 있는 권선형 니크롬선, 접지선, 그리고 기존 시스템에서는 고려되지 않았던 임펄스 잡음 판별회로가 PCB 일체형으로 제작된다. 임펄스 형태의 볼 위치 측정잡음이 볼과 니크롬선 사이의 물리적 접촉이 완벽히 유지되지 않을 때 발생한다는 사실에 착안하여, 비 정상적인 계측치를 판별하기 위한 아날로그 전처리 회로가 설계된다. 설계된 회로는 불완전 접촉 상황에서 사전에 정해진 출력을 제공함으로써 비 정상적인 계측치를 센서 출력 누락으로 인식할 수 있게 한다[9]. 즉, 설계된 전처리 회로를 이용하는 경우 볼 추적 알고리즘 설계 문제는 간헐적인 측정치 누락(data missing) 상황에서 볼의 위치와 속도를 추정하기 위한 상태추정기를 설계하는 문제로 재해석 될 수 있다. 볼 추적 알고리즘의 실시간 구현문제를 고려하기 위해 정상상태 칼만필터(혹은  $\alpha-\beta$  필터)를 설계함으로써, 임펄스성 잡음에 견실한 특성을 갖는

\* Corresponding Author

Manuscript received July 7, 2014 / revised September 10, 2014 / accepted September 15, 2014

장주영, 이자승, 윤한솔, 나원상: 한동대학교 기계제어공학부  
(jyjang1695@naver.com/wkmd90@naver.com/yhs211@nate.com/wonsang@handong.edu)

※ 이 논문은 2014 제29회 ICROS 학술대회에 초안이 발표되었음.

볼 추적 센서를 제작한다. 제안한 접촉식 볼 추적센서의 유용성을 검증하기 위해, 직접 제작한 저가형 볼앤빔 시스템을 이용하여 실험을 수행하고 그 결과를 분석한다.

## II. 저가형 볼앤빔 시스템 및 동역학 모델

### 1. 저가형 볼앤빔 시스템 구조

자체 제작한 저가형 볼앤빔 시스템의 구조는 그림 1과 같다. 볼앤빔 제어를 위한 구동기로 DC 모터를 장착하고, 모터에 가해지는 부하를 최소화하기 위해 가벼우면서도 강성이 뛰어난 PCB를 이용하여 빔 외형을 제작하였다. 이때, 볼앤빔 제어가 용이하도록 가급적 DC 모터의 회전축과 빔의 중심부, 그리고 볼의 무게중심이 일치하도록 하드웨어를 설계하였다. 빔의 회전각도는 기어를 통해 모터와 연결되어 있는 포텐쇼미터 출력으로부터 획득된다. 또한, PCB로 제작된 빔에는 볼 위치 계측을 위한 접촉식 센서가 장착되어 있다.

그림 2에 도시한 바와 같이 저가형 볼앤빔 시스템에 사용되는 접촉식 센서는 권선형태로 감긴 니크롬선과 전도판 역할을 하는 PCB로 구성되어 있다. 본 논문에서 제안한 접촉식 센서는 권선형 니크롬선을 사용했다는 점에서 MIT 등에서 개발한 볼앤빔 시스템과 유사하다. 하지만, 기존 시스템과 달리 니크롬선, 접지선, 임펄스성 측정잡음 판별회

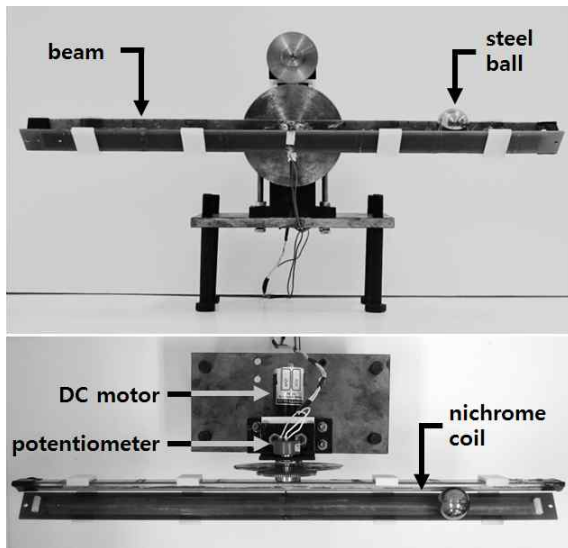


그림 1. 저가형 볼앤빔 시스템 구조.  
Fig. 1. Low-cost ball-and-beam system configuration.

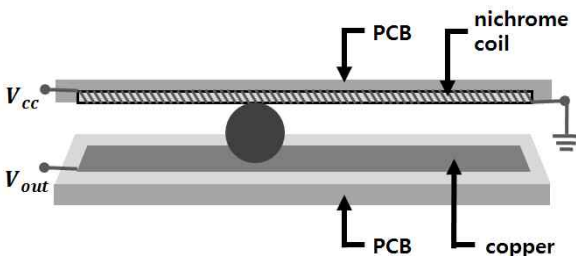


그림 2. 접촉식 볼 위치 센서.  
Fig. 2. Contact-type ball position sensor.

로를 PCB 일체형으로 구현함으로써 그 구조가 매우 단순할 뿐만 아니라, 개발 비용을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다.

니크롬권선 양 끝단에 전압을 인가하면, 철재 볼을 통해 빔 PCB의 구리재질 전도판으로 전류가 흐르게 되므로 전압분배 원리에 따라 볼의 위치에 대응하는 전압  $V_{out}$ 이 출력된다. 볼의 위치를 변화시키며 사전에 획득된 출력전압 특성곡선과 선형 보간법을 이용하여 볼의 위치 측정치를 산출할 수 있다.

### 2. 볼앤빔 시스템 동역학 모델

볼 추적센서 및 제어루프 설계에 앞서 제작된 저가형 볼앤빔 시스템의 동역학 방정식을 모델링 해보자. 그림 3의 볼앤빔 시스템 모델로부터 다음 관계식이 만족됨을 알 수 있다.

$$m_b g \sin\theta = F_r + F_t \tag{1}$$

여기서  $m_b$ 은 볼의 질량,  $\theta$ 는 빔의 회전 각도를 나타낸다. 모터 중심축으로부터 볼까지의 거리를  $x$ , 볼의 반지름을  $R$ , 볼의 관성모멘트를  $J_b$ , 볼에 가해지는 토크를  $T_b$ 라 하면, 볼에 작용하는 병진 및 회전방향 힘  $F_t$ 와  $F_r$ 은 각각 다음 식을 만족한다.

$$F_t = m_b \ddot{x} \tag{2}$$

$$F_r = \frac{T_b}{R} \tag{3}$$

$$T_b = J_b \ddot{\theta} = J_b \frac{\ddot{x}}{R} = \frac{2}{5} m_b \ddot{x} R \tag{4}$$

식 (2)-(4)를 식 (1)에 대입하여 정리하면,

$$m_b g \sin\theta = m_b \ddot{x} + \frac{2}{5} m_b \ddot{x} = \frac{7}{5} m_b \ddot{x} \tag{5}$$

한편, DC 모터의 전기적 동특성이 기계적 동특성에 비해 상대적으로 매우 빠르다고 가정하면, 모터의 제어토크  $T_m$ 은 다음과 같이 유도된다.

$$T_m = K_m I - J_m \ddot{\theta} - b_m \dot{\theta} \tag{6}$$

여기서  $K_m$ 은 모터 토크상수,  $J_m$ 은 모터의 관성 모멘트,  $b_m$ 은 모터의 마찰계수를 나타낸다.

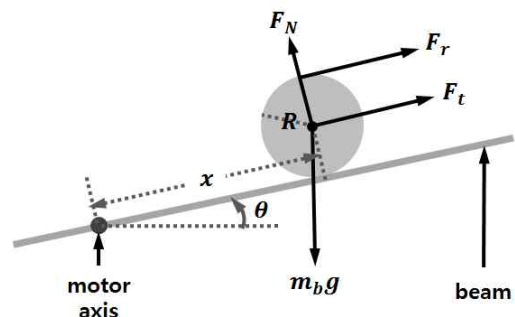


그림 3. 볼앤빔 시스템 모델.  
Fig. 3. Ball-and-beam system model.

모터의 역기전력상수를  $K_e$ , 전기자 저항을  $R_m$ , 구동전압을  $V$  라 하면, 모터 전류  $I$  는 다음 식을 만족한다.

$$I = \frac{V - K_e \dot{\theta}}{R_m} \quad (7)$$

볼의 무게에 의해 모터 축에 작용하는 외란토크  $T_b$  는 다음과 같다.

$$T_b = -x m_b g \cos \theta \quad (8)$$

따라서 빔에 작용하는 토크  $T_{beam}$  은 식 (9)와 같이 정리된다.

$$T_{beam} = J_{beam} \ddot{\theta} = T_m + T_b \quad (9)$$

위의 식에서  $J_{beam}$  은 빔의 관성모멘트를 의미한다.

식 (6) ~ (8)을 식 (9)에 대입하여 정리하면,

$$\ddot{\theta} = \frac{\frac{K_m}{R_m} V - \left( \frac{K_m K_e}{R_m} + b_m \right) \dot{\theta} - x m_b g \cos \theta}{J_{beam} + J_m} \quad (10)$$

빔의 회전각도  $\theta$  가 크지 않다는 가정 하에, 식 (5)와 식 (10)에 미소각 근사( $\cos \theta \approx 1$ ,  $\sin \theta \approx \theta$ )를 적용하면 다음과 같이 선형화된 상태공간 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\xi} = A\xi + Bu \quad (11)$$

여기서

$$\xi = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix}, \quad u = V, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$a_1 = -\left( \frac{K_m K_e}{J R_m} + \frac{b_m}{J} \right), \quad a_2 = -\frac{m_b g}{J}, \quad a_3 = \frac{5g}{7}, \quad b_1 = \frac{K_m}{J R_m}$$

### III. 임펄스 측정잡음에 강인한 접촉식 볼 추적센서 설계

#### 1. 불완전 접촉에 의한 임펄스 측정잡음 판별

제안된 접촉식 볼 위치 센서는 그 구조가 매우 단순하고 저가로 구현 가능하다는 장점이 있지만, 정상적인 측정치 획득을 위해 볼과 전도판 혹은 니크롬권선 사이의 접촉이 완벽히 유지되어야 한다는 전제조건을 필요로 한다. 불행하게도, 볼이 빔 위에서 운동하는 실제 상황에서는 이러한 전제조건이 충족되지 않는 경우가 흔히 발생하게 된다. 볼과 전도판 혹은 니크롬권선의 불완전 접촉 상황에서는 임펄스 성 잡음을 포함하는 비 정상적 볼 위치 측정치가 획득되게 된다. 임펄스 성 측정잡음은 볼 위치 및 속도를 추정하기 위한 볼 추적 알고리즘의 성능저하를 야기하며, 결과적으로 불완전 시스템의 전반적인 제어 성능에 악영향을 끼친다.

볼 위치 측정치에 포함된 임펄스성 잡음은 일반적인 저주파 통과필터로는 효과적으로 제거되지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서 볼 추적 알고리즘을 효과적으로 설계하기 위해서는, 볼의 불완전 접촉 상황을 사전에 판별하는 것이 중요하다. 임펄스성 측정잡음 판별을 위한 전처리 회로부의

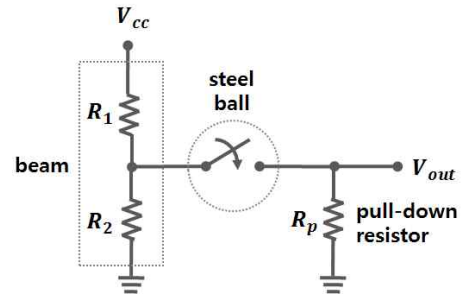


그림 4. 임펄스성 측정잡음 판별 회로 개념도.

Fig. 4. Impulsive noise discrimination circuit diagram.

개념도는 그림 4와 같다. 그림 4에 도시한 바와 같이 전처리 회로부는 일종의 pull-down 회로로 이해할 수 있다.  $R_p \gg R_1, R_2$  가 만족되도록  $R_p$  를 설계하는 경우, 볼의 접촉 상황에 따라 전처리 회로는 다음과 같은 출력을 제공한다.

$$\frac{V_{out}}{V_{cc}} = \begin{cases} \frac{R_2 R_p}{(R_1 + R_2) R_p + R_1 R_2} \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2}, & \text{접촉} \\ 0, & \text{비접촉} \end{cases} \quad (11)$$

볼의 크기로 인해 볼이 니크롬권선 양 끝단에 위치하는 것이 불가능하므로, 볼이 니크롬권선 혹은 전도판과 비접촉 혹은 불완전 접촉하는 경우 이외에는 전처리 회로의 출력이 0[V]가 될 수 없다. 이러한 특성을 이용하면, 볼 측정치의 임펄스성 잡음 발생 여부를 사전에 손쉽게 판별할 수 있다.

#### 2. 볼 추적필터 설계

앞서 설계된 임펄스 잡음 판별회로를 활용하는 경우, 볼 위치 및 속도를 추정하는 문제는 측정치 누락 상황을 고려한 볼 추적필터 설계 문제로 귀결된다.

샘플링 주기를  $T_s$  라 하고 연속시간 볼앤빔 시스템 모델 (11)을 이산화하면, 볼 추적필터 설계를 위한 상태공간 방정식은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = F\mathbf{x}_k + G^c u_k^c + Gw_k \\ y_k = H\mathbf{x}_k + v_k \end{cases} \quad (12)$$

여기서

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}, \quad u^c = a_3 \theta, \quad y = \tilde{x},$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad G^c = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} T_s^2 \\ T_s \end{bmatrix}, \quad G = G^c, \quad H = [1 \ 0]$$

식 (12)에서 공정잡음  $w$  및 측정잡음  $v$  는 각각 등속운동하는 것으로 가정한 볼의 운동모델 오차 및 볼 위치측정치  $\tilde{x}$  에 포함된 측정오차를 반영하기 위해 도입된 것이다. 이들 잡음은 정규분포를 따르며, 다음과 같은 통계적 특성을 갖는 것으로 가정한다.

$$w \sim N(0, Q), \quad v \sim N(0, R) \quad (13)$$

볼 추적 알고리즘은 상태공간 방정식 (12)에 칼만필터 순환식을 적용함으로써 손쉽게 설계된다[10].

(measurement update)

$$\begin{aligned} \hat{P}_k^{-1} &= \bar{P}_k^{-1} + H^T R^{-1} H, \\ K_{f,k} &= \hat{P}_k H^T R^{-1}, \\ \hat{x}_k &= x_k + K_{f,k} (y_k - H \bar{x}_k) \end{aligned} \quad (14)$$

(time update)

$$\begin{aligned} \bar{P}_{k+1} &= F \hat{P}_k F^T + G Q G^T, \\ \bar{x}_{k+1} &= F \hat{x}_k + G^c u_k^c \end{aligned} \quad (15)$$

볼 추적 알고리즘의 흐름도는 그림 5와 같다. 정상적인 볼 위치 측정치가 획득되는 경우, 측정치 갱신에 의해 산출된 사후추정치  $\hat{x}$ 가 볼 추적센서의 출력이 된다. 반면, 전처리 회로에 의해 측정치 누락이 확인되는 경우에는 측정치 갱신 없이 시간 갱신만이 이루어지며, 사전추정치  $\bar{x}$ 로 볼 추적센서의 출력을 대신한다.

볼 추적 알고리즘의 실시간 구현을 위해, 정상상태 칼만 필터(혹은  $\alpha - \beta$  필터)의 적용을 고려할 수 있다. 이 경우, 필터 이득은 단일변수  $\lambda = T_s^2 \sqrt{R/Q}$ 를 이용하여 결정된다[10].

$$K_f = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta / T_s \end{bmatrix}, \quad (16)$$

여기서

$$\begin{aligned} \alpha &\equiv -\frac{\lambda^2 + 8\lambda - (\lambda + 4)\sqrt{\lambda^2 + 8\lambda}}{8}, \\ \beta &\equiv \frac{\lambda^2 + 4\lambda - (\lambda + 4)\sqrt{\lambda^2 + 8\lambda}}{4}. \end{aligned}$$

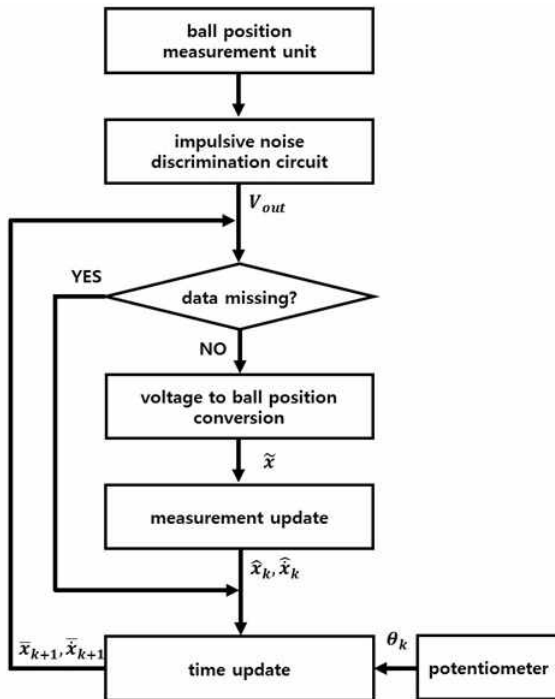


그림 5. 볼 추적 알고리즘.  
Fig. 5. Ball tracking algorithm.

#### IV. 실험결과

제안한 볼 추적센서의 유용성을 확인하기 위해 실험을 수행하였다. 볼앤빔 시스템의 제어를 위해 고전제어 기법이 적용되었으며, 제어루프 구조는 그림 6과 같다. 관련된 파라미터는 표 1에 제시되었다.

극점배치기법에 의해 설계된 빔 각도 제어기  $G_\theta(s)$ 와 볼 위치 제어기  $G_x(s)$ 에서 산출되는 모터구동전압  $V$  및 빔 각도구동명령  $\theta_c$ 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V &= K_p(\theta_c - \theta) + K_I \int (\theta_c - \theta) dt - K_D \dot{\theta} \\ \theta_c &= K_x(x_c - x) - K_v \dot{x} \end{aligned}$$

전처리 회로에 의한 임펄스 잡음 검출 성능을 확인하기 위해, 볼이 임의로 이동하는 상황에서 전처리 회로 유무에 따른 접촉식 센서의 출력을 획득하였다. 그림 7에서 확인할 수 있듯이, 볼의 운동에 의해 불완전 접촉상황이 빈번히 발생함에 따라 접촉식 센서 출력에 불규칙한 임펄스 형태의 잡음이 빈번하게 관찰된다. 하지만, 제안한 전처리 회로를 사용하는 경우 임펄스 형태의 잡음이 존재하는 시점에서 항상 사전에 정해진 값( $V_{out} = 0[V]$ )이 출력됨을 확인할 수 있다.

제안된 볼 추적기법을 적용하여 획득된 볼앤빔 제어시스템의 계단응답 특성을 그림 8에 도시하였다. 이와 달리, 그림 9는 임펄스성 잡음 판별회로가 없는 상태에서 기존 연구들에서 사용된 칼만필터만을 적용하여 획득된 결과를 나타낸다. 제안된 볼 추적 알고리즘은 임펄스 잡음에 의한 영향을 효과적으로 제거함으로써 만족할 만한 볼 추적성능을 제공한다. 실험결과 본 논문에서 제안하는 방법을 사용하는 경우에는 임펄스 잡음이 반영되지 않은 모의실험 상황과 거의 유사한 수준의 볼 위치제어 성능을 획득할 수 있는

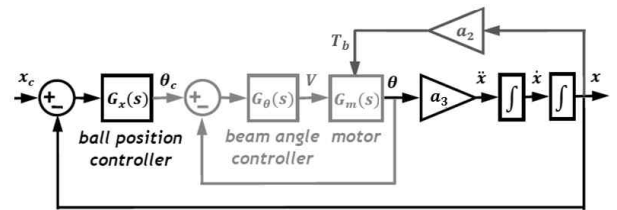
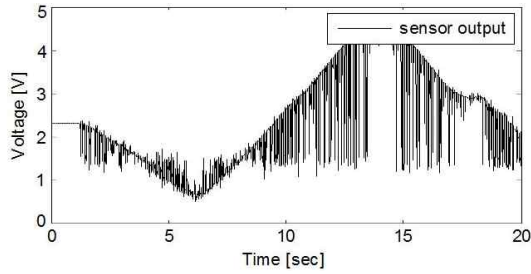


그림 6. 볼앤빔 제어루프.  
Fig. 6. Ball-and-beam control loop.

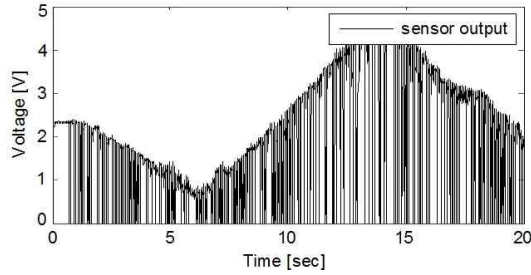
표 1. 볼앤빔 시스템 파라미터.

Table 1. Parameters of Ball and Beam system.

subsystem	parameters
ball and beam	$a_1 = -31.21, a_2 = -3.05, a_3 = 4.80,$ $b_1 = 33.88$
motor	$G_m(s) = \frac{1057.38}{s^2 + 44.8s + 974.11}$
controllers	$K_p = 62.63, K_I = 17.53, K_D = 0.09$ $K_x = 0.73, K_v = 1.45$
ball tracking filter	$\alpha = 0.234, \beta = 0.031$



(a) Output without impulsive noise discrimination circuit.



(b) Output with impulse noise discrimination circuit.

그림 7. 접촉식 센서 출력 전압.

Fig. 7. Voltage output of a contact-type sensor.

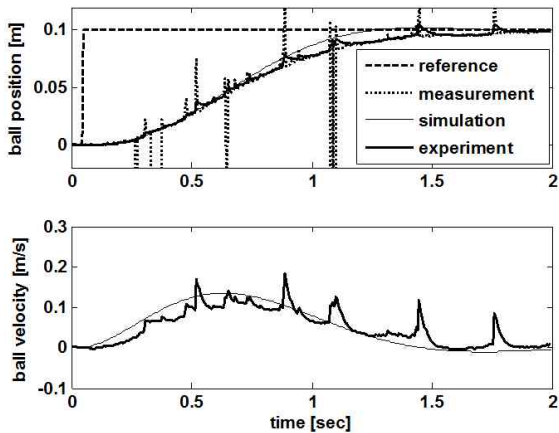


그림 8. 볼 위치제어 성능: 제안한 방법(판별회로 적용).

Fig. 8. Ball position control performance (proposed method).

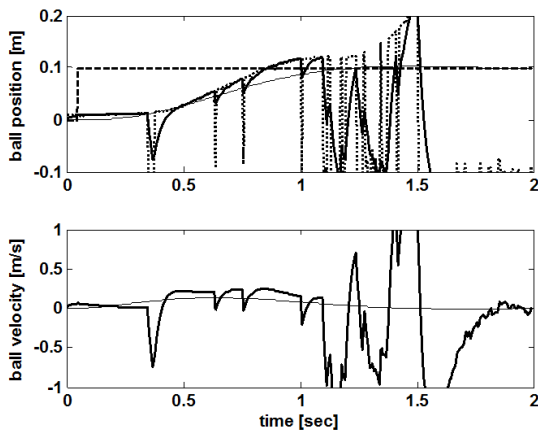


그림 9. 볼 위치제어 성능: 기존 방법(판별회로 미적용).

Fig. 9. Ball position control performance (previous method).

반면, 임펄스 잡음 처리 없이 추정필터를 그대로 사용하는 경우에는 볼엔빌 제어가 거의 불가능함을 알 수 있다. 이는 제안된 볼 추적 기법이 저가형 볼엔빌 시스템의 제어성능을 향상시킬 수 있는 해법임을 뒷받침하는 결과이다.

V. 결론

본 논문에서는 저가형 볼엔빌 시스템 제어성능 개선을 위해 임펄스 잡음에 강인한 접촉식 볼 추적센서의 설계 방법을 제안하였다. 임펄스 형태의 볼 위치 측정잡음이 주로 볼과 전도관 혹은 저항선 간의 불완전 접촉에 의해 발생한다는 사실에 착안하여, 이를 사전에 검출할 수 있는 전처리 회로를 고안함으로써 볼 추적문제를 누락 측정치를 고려한 상태추정 문제로 재정의 하였다. 누락 측정치 검출회로와 정상상태 칼만필터를 이용하여 볼 추적센서를 설계함으로써, 접촉식 볼 위치 측정센서에 임펄스 잡음이 존재하는 상황에서도 성공적으로 볼의 위치와 속도를 추정할 수 있음을 보였다. 실험을 통해, 제안된 방법이 저가형 볼엔빌 시스템개발을 위한 유용한 해법이 될 수 있음을 확인하였다.

REFERENCES

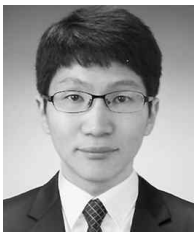
- [1] J. Hauser, S. Sastry, and P. Kokotovic, "Nonlinear control via approximate input-output linearization : the ball and beam example," *IEEE Trans. Automatic Control*, pp. 392-398, 1992.
- [2] N. B. Almutaiti and M. Zribi, "On the sliding mode control of a Ball on a Beam system," *Springer*, 2009.
- [3] S. Sathiyavathi and K. Krishnamurthy, "PID control of ball and beam system-A real time experimentation," *Journal of Scientific & Ind. Research*, pp. 481-484, 2013.
- [4] Z. H. Pang, G. Zheng, and C. X. Luo, "Augmented state estimation and LQR control for a ball and beam system," *IEEE Conference on Industrial Electronics and Application*, pp. 1328-1332, 2011.
- [5] W. Wang, "Control of a ball and beam system," *Master Thesis, Univ. of Adelaide, Australia*, 2007.
- [6] J. Sheng, J. Renner, and W. S. Levine, "A ball and curved offset beam experiment," *American Control Conference*, pp. 402-408, 2010.
- [7] I. Hasanzade, S. M. Anvar, and N. T. Motlagh, "Design and implementation of visual servoing control for ball and beam system," *IEEE International Symposium on Mechatronics and its Applications*, pp. 1-5, 2008.
- [8] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, 3rd Ed, Prentice Hall Inc, 2002.
- [9] J. Y. Jang, J. S. Lee, H. S. Yoon, and W. S. Ra, "Development of a contact-type ball tracking sensor for improving control performance of a low-cost ball-and-beam system," *Proc. of 2014 29th ICROS Annual Conference (ICROS 2014) (in Korean)*, pp. 555-556, 2014.

- [10] Y. Bar-Shalom and T. E. Fortmann, "Tracking and data association," *Academic Press*, pp. 97-100, 1988.



#### 장 주 영

2014년 한동대학교 기계제어공학부(공학사). 2014년~현재 서울대학교 대학원 기계항공공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 무인항공기 제어 및 항법.



#### 이 자 승

2015년 한동대학교 기계제어공학부(공학사) 졸업 예정. 관심분야는 제어이론 및 응용.



#### 윤 한 솔

2015년 한동대학교 기계제어공학부(공학사) 졸업 예정. 관심분야는 제어이론 및 응용.



#### 나 원 상

1998년 연세대학교 전기공학과(공학사). 2000년 동 대학원 전기컴퓨터공학과(공학석사). 2009년 동 대학원 전기전자공학과(공학박사). 2000년~2009년 국방과학연구소 유도조종부 선임연구원. 2009년~현재 한동대학교 기계제어공학부 조교수. 관심분야는 강인 상태추정이론, 표적추적 필터, 자율이동시스템 유도조종기법 등.