

## 교량 탐사 로봇을 위한 Sliding Mode 제어를 기반으로 한 PID 제어기

이안용, 이승철, 오제근, 최영진, 양해원  
한양대학교 전자전기제어계측공학과

### PID Controller Based on Sliding Mode Control for Bridge Inspection Robot

An-Yong Lee, Seung-Chul Lee, Je-Keun Oh, Youngjin Choi, Hai Won Yang  
Dept. of Elec. Elec. Con. & Inst. Eng. Hanyang Univ.

**Abstract** - This paper presents a robust controller in order to handle the guide rail vibrations of Bridge Inspection System. While a Bridge Inspection Robot moves on guide rails with vibration by weight occurs. Therefore, Guide rail as structure like cantilever beam appears vibration by weight of Bridge Inspection Robot. The Z axis of Bridge Inspection Robot operates with Scissors structure. Bridge Inspection Robot is used 'PID Controller based on Sliding Mode control' for position control with Z axis. At the result of, this paper is applied to simulation about position control regarding vibration to occur with Z axis.

#### 1. 서 론

다양한 산업 분야에 걸친 자동화 시스템과 로봇의 개발 및 응용 기술은 해마다 눈부신 발전을 거듭하고 있다. 그러나 교량 안전 진단 분야에 대해서는 자동화 시스템 및 로봇기술이 매우 낙후되어 있는 실정이다. 현재 교량 유지 관리는 열악한 환경에서 숙련공들이 직접 조사한 정보를 통하여 수작업으로 관리되어진다[1][2]. 실제적으로 숙련공들은 교량 하부의 균열수를 확인하고 균열의 최대 크기를 측정하여 안전한 상태인가를 점검하게 된다. 숙련공들은 수작업을 통해 얻은 정보로 주관적인 교량의 안전진단을 판단함에 있어 오류를 범하게 된다. 이런 점에서 안전기준과 안전장치의 부재로 교량 검사 현장에서 재해를 유발한다. 그러므로 작업 환경의 개선과 기술 혁신을 통한 검사자의 안전성 확보는 교량 검사에 있어서 가장 중요한 요인이 되고 있다. 그러나 국내 업체는 아직 까지 교량 시설물에 대한 검사 장비 개발 보다는 외국의 개발에 의존하는 형태를 유지하고 있다.

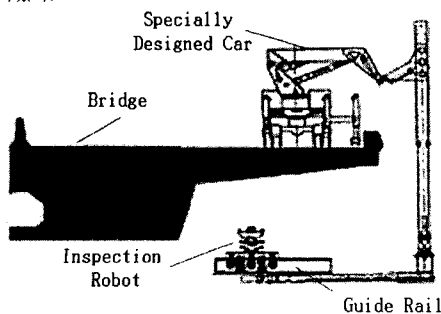
이를 해결하기 위하여 교량 탐사 로봇을 개발하게 되었다. 교량 탐사 로봇은 원격지에서 원격조정을 통하여 센서 모듈과 제어기를 통하여 정확한 위치와 속도로 동작하여 보다 안정된 교량 정보를 수집 하는 것을 목적으로 하고 있다. 이러한 로봇 시스템을 이용하여 교량 산업은 안전 하게 교량의 정보를 수집하여 유지 관리 할 수 있게 된다.

하지만 이송 레일과 교량 탐사 로봇에서 일어나는 진동으로 인하여 Z축으로의 정확한 위치 제어가 힘들어 교량의 정보를 정확하게 알 수 없게 된다. 이러한 점을 생각하여 본 논문에서는 실제 로봇에 적용하기 전에 모의실험을 통해서 Sliding Mode 제어를 기반으로 한 PID제어기를 설계하여 효율적으로 위치 제어를 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 교량 탐사 로봇의 전체 시스템, 3장에서는 이송 레일의 횡진동과 탐사 로봇의 Scissor 구조, 4장에서는 Sliding Mode를 기반으로 한 PID제어기에 대해서 다루고 있다. 5장은 가상의 공간에서 이송 레일과 교량 탐사 로봇에 일어나는 진동에 대한 위치 제어를 모의실험을 통해 나타내고 있다.

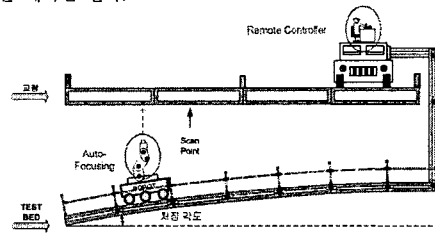
#### 2. 교량 탐사 로봇의 전체 시스템

교량 탐사 로봇의 전체 시스템은 특장차, 이송 레일, 탐사 로봇을 구성 되어 있다. <그림 1>에서와 같이 교량, 특장 차량, 이송 레일, 탐사 로봇을 볼 수 있다. 이송 레일은 특장차로부터 접하지 않는 붐의 끝단 위에 위치 하게 된다. 그리고 탐사 로봇 시스템은 이송 레일 위에 장착되어진다. 넓은 교량 하부를 정밀 하게 조사하기 위하여 이송 레일 위를 동작 할 수 있게 제작 하였다.



<그림 1> 교량에서의 전체적인 시스템

<그림 2>에서와 같이 이송 레일 끝단에 로봇에 장착되어 지면서 이송 레일이 휘어지는 현상이 발생 한다. 이러한 휘어짐으로 발생하는 진동에 대한 위치 제어를 해야만 한다.



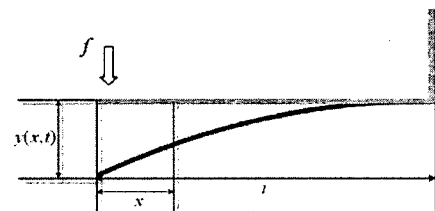
<그림 2> 특장 차량과 탐사 로봇

#### 3. 이송 레일의 횡진동과 탐사 로봇의 Scissor 구조

##### 3.1 이송 레일의 횡진동

특장차로부터 접하지 않는 붐의 끝단 위에 위치한 이송 레일은 외팔보와 같은 구조이다.

이송 레일에 대한 모델링은 베르누이-오일러(Bernoulli-Euler) 외팔보로 단순화 할 수 있다. <그림 3>과 같이 이송 레일 끝단에 로봇의 하중이 가해지면 이송레일에 진동이 발생할 때 운동방정식은 다음과 같다[3].



<그림 3> 외팔보 구조

$$y(x,t) = Y(x)F(t) \quad (1)$$

$$Y(x) = C_1[\cos(\beta x) + \cosh(\beta x)] + C_2[\cos(\beta x) - \cosh(\beta x)] + C_3[\sin(\beta x) + \sinh(\beta x)] + C_4[\sin(\beta x) - \sinh(\beta x)] \quad (2)$$

$$F(t) = A_n \cos(\omega_n t) + B_n \sin(\omega_n t) \quad (3)$$

$$y(0,t) = Y(0) = 0, \quad \frac{\partial y(0,t)}{\partial x} = \frac{\partial Y(0)}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 y(L,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 Y(L)}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^3 y(L,t)}{\partial x^3} = \frac{\partial^3 Y(L)}{\partial x^3} = 0$$

식 (3)에서  $A_n$ 은 초기위치,  $B_n$ 은 초기속도이며  $f$ 는 이송레일에 작용하는 힘,  $y(x,t)$ 는  $x$ 는 로봇의 무게로 인한 이송레일에서의 처짐 이다.

$$A_n = \left[ \frac{-4fL}{EI\rho A\beta_n^4(\sin(\beta_n L)e^{\beta_n L} + e^{-\beta_n L}) - 1} \right] \left[ \frac{3\sin(\beta_n L)(e^{2\beta_n L} + 1) - 2(\beta_n L)^3 e^{\beta_n L}}{+ \cos(\beta_n L)(3 - (\beta_n L)^3(e^{2\beta_n L} + 1) - 3e^{2\beta_n L})} \right] \quad (5)$$

$$B_n = 0$$

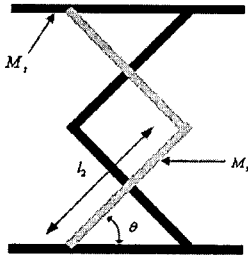
<그림 3>과 같이 한쪽 끝단이 고정되어 있는 외팔보와 같이 때문에 이송 레일의 고유진동수는 다음과 같이 표현된다.

$$\omega_n^2 = (\beta_n l)^4 \frac{EI}{\rho A l^3} \quad (6)$$

여기서,  $\rho$ 는 이송레일의 밀도,  $EI$ 는 이송 레일의 강성계수,  $l$ 은 이송레일의 길이,  $A$ 는 이송레일의 단면적을 나타낸다.

### 3.2 탐사로봇의 Scissors 구조

교량 탐사 로봇에서 Z축으로 동작하는 구조는 <그림 4>와 같은 Scissor 구조이다.



<그림 4> Scissor 구조

Scissor 구조에서는 끝단에  $\theta$  ( $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ )만이 변화여도 전체 구조에 각도와 높이를 구할 수 있는 구조이다. 이러한 구조에 특징을 이용하여 한 slider bar의 구조 운동방정식을 식 (7)과 같이 구하였다.

$$\dot{\theta} = \left[ \frac{2gl_s(M_s + M_T)(1 - \sin\theta)}{\frac{1}{3}M_s l_s^2 + (M_s + M_T)l_s^2 \cos^2\theta} \right]^{1/2} \quad (7)$$

이때,  $\theta$ 는 각도를 나타내고,  $M_s$ 은 Scissors 구조에서 막대에 질량,  $M_T$ 은 Scissor에 가해지는 질량,  $l_s$ 는 막대에 길이 이다.

### 4. Sliding Mode 제어를 기반으로 한 PID제어기

Sliding Mode 제어는 넓은 오차 범위의 동작 상태에서도 안정될 수 있고, 매개변수 변화에 관해서 강인한 제어기라 할 수 있다[4]. 식 (8)은 위치 지점에 관한 오차를  $e$  라고 한다.

$$e = 2l_s \sin\theta - h_{ref} \quad (8)$$

$h_{ref}$ 는 시스템에서 원하는 위치 값이다.

그러므로 Sliding Mode 제어 기법은 위치를 오차로 나타낸다. Sliding Surface  $s$ 는 식 (9)과 같이 선택할 수 있다.

$$s = \lambda e \quad (\lambda > 0) \quad (9)$$

이 형태는 간단한 Sliding Surface에서 변화 하는 원래 좌표를 추적하기 위한 정보를 나타낸다.

입력  $U$ 는 식 (10)과 같다.

$$U = U_s + U_{PID} \quad (10)$$

$U_s$ 는 Sliding Mode 제어기이고  $U_{PID}$ 는 Sliding Mode 방법을 기반으로 한 PID제어기이다.

$$U_s = K \text{sign}(s), \quad U_{PID} = k_p(s + 1/T_i \int s dt + T_d \frac{ds}{dt}) \quad (11)$$

여기서  $k_p, T_i, T_d$ 는 비례, 적분, 미분 상수를 나타낸다. 제안 되어진 제어기의 안정성 분석을 판별하기 위해서 식 (12)와 같이 시스템의 오차 방정식을 기반으로 한 Positive Lyapunov 함수를 사용 하였다.

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (12)$$

식 (12)을 시간에 대해서 미분을 하여 나타내면 식 (13) 과 같다. 이때, 식 (13)은 0보다 작아야 한다.

$$\dot{V} = s \dot{s} \quad (13)$$

제어기의 목적은 Sliding 상태를 나타내기 위해서는 식 (14)와 같이 표현 된다.

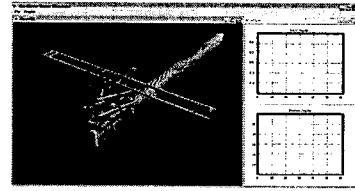
$$\dot{s} = -\lambda s \quad (14)$$

비례 상수  $k_p$ , 적분 상수  $k_i = \frac{k_p}{T_i}$  그리고 미분 상수  $k_d = \frac{k_p}{T_d}$  로 정의 하여 나타내면 식 (15)과 같다.

$$U_{PID} = k_p s + k_i \int s dt + k_d \frac{ds}{dt} \quad (s < 0) \quad (15)$$

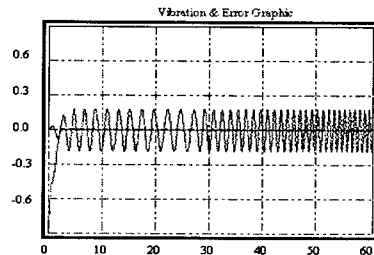
### 5. 모의실험 결과

이송 레일과 교량 탐사 로봇에 대한 시뮬레이터를 개발하여 실제 모델에 적용하는 시간과 비용을 절감하였다. 이송 레일과 교량 탐사 로봇을 보다 실물과 같은 형태와 구조로 제작하여 OpenGL을 이용하여 실제 모델과 같은 형태와 형태로 GUI를 구축하였다. <그림 5>과 같은 구조로 제작 하였다.

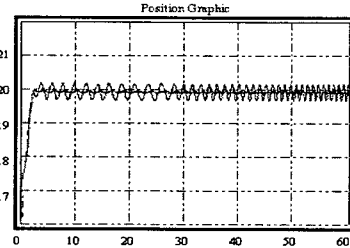


<그림 5> 시뮬레이터

여기서, 제작된 시뮬레이터에 모의실험을 하기위해서  $E = 30 \times 10^6 N/m^2$ ,  $I = 2.4 \times 10^{-6} m^4$ ,  $\rho = 0.788 kg/m$ ,  $f = 490 N$ ,  $M_s = 0.5 kg$ ,  $l = 12 m$ ,  $l_s = 0.713 m$  이다.



<그림 6> 이송 레일의 진동 & 목표 위치에 대한 오차



<그림 7> 목표 위치에 대한 진동 & 목표 위치에 Sliding Mode

여기서, <그림 6>와 같이 Z축에 관한 이송레일에 대한 진폭과 위치에 대한 오차를 보이고 있다. 진동은  $-0.2 \sim 0.2 mm$ 이며 위치 오차는 0으로 간다. <그림 7>에서는 Z축에 관한 목표 값은 0.2m로 할 때 진폭에 대한 위치 값을 나타내고 있다. Sliding Mode 제어를 기반으로 한 PID제어기를 적용하지 않을 경우 진동이 존재하지만 제안한 제어기를 적용하였을 경우 진동 오차에 대한 위치 값에 대해서 보상 하였다.

### 6. 결 론

본 논문에서는 시뮬레이터를 통해서 교량 탐사 로봇과 특정 차량의 이송 레일에서 발생하는 휘어짐에 대한 진동에 대해서 Sliding Mode 제어를 기반으로 한 PID제어기를 적용하였다. 제안된 제어기는 진동이 존재하는 이송레일에서도 Z축에 관한 목표 위치에 대한 오차를 보상하여 보다 정밀한 위치 제어를 하였다.

### Acknowledgement

본 연구는 2007년도 건설교통부 재원으로 교량 검사로봇 개발 사업단(BIRD)의 지원을 받아 연구되었음.

### [참 고 문 헌]

[1] Federal Highway Administration (FHWA), Bridge Inspection's Training Manual, July 1991.  
 [2] Bridge Maintenance Training Manual, US Federal Highway Administration, FHWA-HI-94-034, Prepared by Wilbur Smith Associates, 1992.  
 [3] S. Park and Y. Youm, "Motion of a moving elastic beam carrying a moving Mass - Analysis and experimental verification," *Journal of Sound and Vibration(Accepted and in press, jsvi. 200 0.3198)*, 2000.  
 [4] F.ABDULGILIL and H. SIGUERDIDJANE "PID Based on Sliding Mod e Control for Rotary Drilling System." Volume 1, 2005 Page(s):262-265