

연마 브러시 접촉력 산출을 위한 비선형 강건제어기 실험

Experiments on Robust Nonlinear Control for Brush Contact Force Estimation

이병수^{1,✉}
Byoungsoo Lee^{1,✉}

1 계명대학교 기계자동차공학부 (Faculty of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ.)
✉ Corresponding author: blee@kmu.ac.kr, Tel: 053-580-5349

Manuscript received: 2009.10.13 / Accepted: 2010.1.5

Two promising control candidates have been selected to test the sinusoidal reference tracking performance for a brush-type polishing machine having strong nonlinearities and disturbances. The controlled target system is an oscillating mechanism consisting of a common positioning stage of one degree-of-freedom with a screw and a ball nut driven by a servo motor those can be obtained commercially. Beside the strong nonlinearity such as stick-slip friction, the periodic contact of the polishing brush and the work piece adds an external disturbance. Selected control candidates are a Sliding Mode Control (SMC) and a variant of a feedback linearization control called Smooth Robust Nonlinear Control (SRNC). A SMC and SRNC are selected since they have good theoretical backgrounds, are suitable to be implemented in a digital environment and show good disturbance and modeling uncertainty rejection performance. It should be also noted that SRNC has a novel approach in that it uses the position information to compensate the stick-slip friction. For both controllers analytical and experimental studies have been conducted to show control design approaches and to compare the performance against the strong nonlinearity and the disturbances.

Key Words: Polishing Machine (연마기), Brush Contact Force (브러시 접촉력), Estimation (산출), Stick-slip (고착-미끄럼), Friction (마찰), Friction Compensation (마찰 보상), Sliding Mode Control (슬라이딩 모드 제어), Feedback linearization (피드백 선형화)

1. 서론

새롭게 개발된 브러시 연마기는 서로 접촉하는 브러시와 피가공물의 횡방향, 종방향 상대 운동을 이용하여 피가공물의 표면을 연마하는 가공기다. 횡방향 상대 운동은 브러시의 회전과 피가공물의 공전 및 자전 운동에 의해서, 종방향 상대 운동은 브러시가 가공물과 멀어지거나 접근하여 접촉하는 축방향 운동에 의해 발생한다. 하지만 연마 품질에 대한 종방향 접촉력의 민감도가 높다. 즉, 접촉력의 크기가 연마 품질에 영향을 미친다. 그러므

로 연마 표면의 균일한 품질을 얻기 위해서는 접촉력의 측정 및 관리가 중요하다.¹

하지만 접촉력을 직접적인 방법으로 측정하는 것이 연마기 구조상 매우 어렵다. 그 이유는 접촉력을 측정하기 위해서 로드셀을 브러시 상하 왕복 운동 기구나, 피가공물 테이블 밑에 설치해야 하는데, 그 구조물은 무겁고 무게에 대한 접촉력의 비율이 매우 작기 때문이다. 또한 회전 기구의 회전 불균일이 로드셀 출력에 노이즈로 나타난다. 그러므로 직접적인 접촉력 측정보다는 간접적인 산출의 방법이 더 신뢰성 높은 대안이 된다.

접촉력을 산출하는 방안이 제시되었는데 이 방법으로 접촉력을 산출하기 위해서는 브러시 기구가 종방향으로 조화운동해야 한다.¹ 하지만 브러시 기구에는 종방향으로 무게가 작용하며, 브러시 접촉에 의한 외란이 존재하고, 기구의 고착-미끄럼 마찰이 존재하는 매우 비선형적인 계이므로 이런 기구를 조화운동 시키는 것은 매우 도전적인 제어 과제이다. 특히 고착-미끄럼 마찰은 이런 기계계 통 제어의 정밀도를 저하시키는 주요 원인이다.

마찰에 의한 효과를 상쇄시키기 위한 여러 기법이 개발되었다. Canudas de Wit, et. al.²은 정확한 마찰 모델의 필요성을 배제한 간단한 접근법인 고이득 PD 제어를 고안하였다. 고이득 PD 제어란 큰 비례상수와 속도상수 이득을 갖는 PD 제어이다. Radcliffe and Southland³는 정상상태 오차를 경감할 목적으로 적분제어를 이용하였는데, 적분 동작은 오차를 감소시키지 못하고 limit cycle를 유발하였다. 고착-미끄럼 현상에 의해 목표점 근처에서 고착되면 정상상태 오차가 적분 동작에 의해 누적되고 그 값이 일정 값 이상이 되었을 때 고착상태로부터 이탈하여 미끄러지지만 그 동작이 너무 커지기 때문에 다시 목표점을 지나쳐 다시 고착상태가 되며 이러한 고착-미끄럼 동작을 반복하게 된다. Cai and Song⁴은 뱅-뱅 제어(임펄스 제어)를 이용하여 마찰에 의한 오차를 줄이려 시도하였지만, 토크의 급작스런 변동은 동력전달계의 변형을 가중시킨다. 참고로 Armstrong-Hélouvy⁵ 등은 마찰에 관련하여 보고된 마찰 모델, 해석 기법, 마찰 보상 제어를 망라하는 비평 논문을 저술하였다.

본 연구의 목적은 새로운 방식의 연마 브러시 왕복운동 기구 계의 정밀한 위치 제어를 목표로 하는 제어기 후보에 대해서 실험을 통한 비교 평가다. 첫 번째 후보는 Cai and Song⁴이 제안한 feedback linearization을 응용한 제어 방법이다. 이 후보를 선택한 이유는 첫째, 안정도에 대한 이론적 배경이 있고, 마찰 보상이 직접적임에도 불구하고 정확한 마찰 모델을 요구하지 않으며, 특히 속도 상태를 필요로 하지 않는다. 거의 대부분의 기계장치에는 속도 센서가 없으며 대신 변위를 측정하고 관측기를 사용하여 속도를 산출하는 것이 일반적이다. 하지만 Armstrong-Hélouvy⁵이 지적했듯이, 장치의 동력 전달계통에 포함된 탄성과 마찰 메모리 등이 원인이 되어 불안정해지고, 또한 실제 계에서 계측 값에서 진미분(true derivative)를 얻는 것이 불가능하다. 그러므로 실험이나 실제에서 정확한 마찰 모델을 필요

로 하지 않는 것, 특히 마찰력 산출 시 필수 사항인 속도를 요구하지 않는 것은 제어기 설계자에겐 축복이다. 그 외에도 어떠한 선형제어나 PID 제어계에도 병렬로 삽입될 수 있는 유연함도 있으므로 이 후보는 실제계에 적용될 가능성이 높다.

두 번째 후보는 Sliding Mode Control(SMC)^{6,8}이다. SMC는 안정도에 대한 이론적 배경이 있고, sliding surface 구조에 의해 계의 차수가 낮아지므로 제어기 설계가 단순하며, 구조적이거나 비구조적인 모델링 오차, 외란, 마찰을 포함한 비선형성 등을 포괄적으로 다룬다는 특징이 있다. 또한 그러한 비선형성에 대한 정확한 모델이 필요없고 단지 그 크기(bound)에 대한 정보만 필요로 한다. 또한 전자-기계 계통의 제어에 우수하다고 제창되고 있으며 단지 sliding surface 부근에서 채터링이 발생하는 단점이 있지만 채터링을 감소시키는 많은 기법이 개발되었다.

본 연구에서는 브러시 연마기의 브러시 접촉력 산출 알고리즘을 소개하고, 매우 비선형적이며 외란이 존재하는 브러시 연마기의 조화운동 제어에 대해 바람직한 성능을 보일 것으로 기대되는 두 후보 제어기를 설계한 후, 실험을 통한 실제 연마기에의 직접적인 응용 가능성 관점에서 성능 평가를 수행한다. 실험적인 비교 평가와 병행하여 파라미터 변동 등에 대해 연구를 수행하기 위하여 시뮬레이션 해석도 수행하였다.

2. 연마 브러시 시스템

2.1 접촉력 산출 알고리즘

외란을 산출하는 방법을 설명하기 위하여 Fig. 1과 같이 왕복 운동하는 기구를 고려하자. 왕복 운동하는 1 자유도 질량에 로드셀 등으로 측정할 수 있는 제어력 $f(t)$ 가 가해지고, 그 값을 알지 못하는 외란의로써의 접촉력 $p(t)$ 가 더해지면 운동방정식은

$$(M_l + M_m)\ddot{x}(t) = f(t) - p(t) \quad (1)$$

이며 M_l , M_m 은 각각 로드셀과 왕복기구의 질량이다. 만약 왕복기구가 조화운동을 한다고 가정하면 변위 $x(t)$ 와 가속도 $\ddot{x}(t)$ 는

$$\begin{aligned} x(t) &= A \sin \omega t \\ \ddot{x}(t) &= -\omega^2 A \sin \omega t = -\omega^2 x(t) \end{aligned} \quad (2)$$

이다. 식(2)를 식(1)에 대입하고 $p(t)$ 에 대해 정리하여 다음의 식

$$p(t) = f(t) + \omega^2(M_l + M_m)x(t) \quad (3)$$

을 유도할 수 있다. 즉, 기구가 각속도가 결정된 조화운동을 하며 질량을 알고 있고 제어력을 측정할 수 있다면 식(3)에 의해 종방향 접촉력 $p(t)$ 를 산출할 수 있다.¹

2.2 연마 브러시 시스템

브러시를 조화운동 시키는 시스템은 서보모터 액츄에이터, 감속기어로 구성된 구동기 부분, 리드스크류, 볼베어링 및 직선운동 가이드로 구성된 직선운동 기구 부분, 그리고 부하인 질량으로 이루어진 시스템이며, 외란과 기구의 마찰이 존재하는 전형적인 비선형 전기기계 계통이다. 그리고 브러시를 모사하기 위하여 등가 스프링을 설치하였으며 부하 질량의 변위가 어떤 값을 넘어서면 스프링 끝 단이 벽에 부딪혀 반력을 가한다(Fig. 2). 이 시스템은 Fig. 1의 것과 유사하며 연마브러시 조화운동 제어기의 설계와 성능을 시험하기 위한 목적으로 제작되었다.

운동방정식은 식(4)와 같고 $F_{fric}(\dot{x})$ 은 stick-slip 마찰력이며 속도 \dot{x} 의 함수로 알려져있다.⁹ 마찰력은 모터 브러시, 감속기어, 볼 부시에 의한 백래쉬를 제거하기 위한 내부 베어링에 가해진 예압, 직

선 운동 가이드에서 발생하며, 직선 운동 가이드에 집중된다고 가정한다:

$$\ddot{x} + c\dot{x} + G(x) + F_{fric}(\dot{x}) = F_{appl} \quad (4)$$

$\hat{F}_{fric}(\dot{x})$ 과 $\hat{G}(x)$ 는 각각 마찰력과 브러시 접촉력이다. 식(4)에서

c = damping coef. normalized by mass

$$G(x) = 7.3 \times 10^{-3} k_b \text{rect}(x - x_{gap})$$

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} x & \text{if } x \geq 0 \\ 0 & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

k_b = brush spring constant

$$F_{fric}(\dot{x}) = 7.3 \times 10^{-3} \left(\begin{matrix} \text{sign}(\dot{x})f_{slip} \\ + (1 - |\text{sign}(\dot{x})|)f_{stick} \end{matrix} \right)$$

f_{slip} = kinetic friction

f_{stick} = static friction

그리고

$$F_{appl} = 0.2209e_a$$

e_a = motor drive voltage input

마찰력의 최대값인 정지마찰력(고착 상태를 극복하기 위한 최소의 힘)을 알아보기 위해 정지상태에서 모터 제어 입력 e_a 를 서서히 선형적으로 증가시키면서(램프 입력) 부하 질량이 움직이는 시점을 찾아보았다. Fig. 3을 살펴보면 제어입력 e_a 가 약 2.1V 일 때 미끄럼 운동을 시작하는데 알고 있는 모터의 토크 상수로 계산하면 정지마찰토크는 약 $0.46\text{N} \cdot \text{m}$ 이다. 모터에 가해지는 제어 입력 최대값이 10V 인데 마찰력을 이기기 위한 제어입력 값이 최대 값의 21%이므로 본 장치 제작에 저마찰 리니어 가이드를 사용하였음에도 불구하고 상당히 큰 값을 알 수 있다. 이 정도 크기의 마찰력은 특히 마찰을 염두에 두고 설계 제작된 기구가 아니면 일반적인 것이다. Craig¹⁰는 로봇 조인트의 감속 기어열에서 모터 발생 동력의 25%정도가 마찰력을 극복하기 위하여 소모된다고 서술하고 있다.

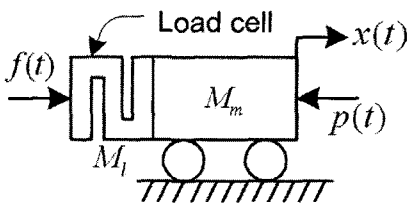


Fig. 1 Schematic model for contact force estimation

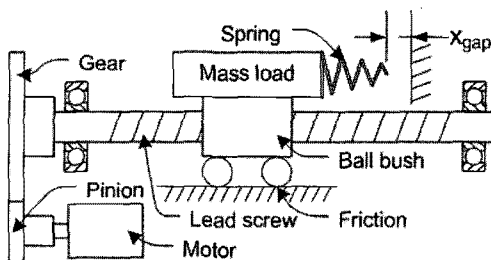


Fig. 2 Schema of the rocking brush mechanism

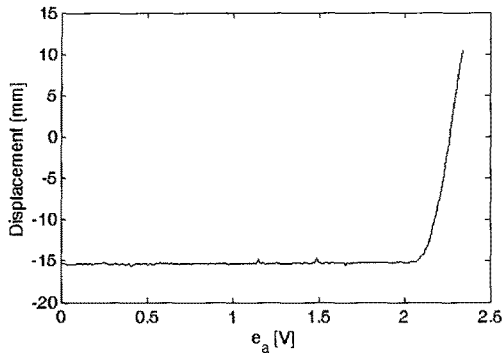


Fig. 3 Friction dominant linear motion stage

3. 브러시 조화운동을 위한 강건 비선형 제어기 설계 및 실험

3.1 Sliding Mode Control (SMC)

식(4)의 시스템에 대해서 다음과 같은 슬라이딩 함수를 정의한다.⁶⁻⁸

$$s = \lambda e + \dot{e}, \quad e = x_d - x \quad (5)$$

여기서 λ 는 응답의 상승시간과 관련된 상수이며 x_d 는 조화함수로 표현되는 목표 위치이다. 제어 목표는 마찰과 브러시 접촉력 등의 외란에 영향을 받지 않고 시스템의 상태를 슬라이딩 평면 $s=0$ 에 유지시키는 제어입력 F_{appl} 를 선정하는 것이다.

안정도 증명:

제어기 안정도 증명을 위하여 리아프노프 함수를 $V = s^2 / 2$ 로 선정하고 미분하면

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} = s(\lambda\dot{e} + \ddot{x}_d - \ddot{x}) \\ &= s(\lambda\dot{e} + \ddot{x}_d + c\dot{x} + G(x) + F_{fric} - F_{appl}) \end{aligned} \quad (6)$$

된다. 제어입력을 다음과 같이 선정한다.

$$\begin{aligned} F_{appl} &= u_{eq} + u_f \\ u_{eq} &= \lambda\dot{e} + \ddot{x}_d + c\dot{x} \\ u_f &= ks + \widehat{F}_{fric} + \widehat{G}(x) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 k 는 스위칭 제어기 상수이며 \widehat{F}_{fric} 과 $\widehat{G}(x)$ 는 추정 마찰력과 추정 브러시 접촉력이다.

식(7)을 식(6)에 대입하면

$$\dot{V} = -s(ks - G(x) + \widehat{G}(x) - F_{fric} + \widehat{F}_{fric}) \quad (8)$$

을 얻는다. 마찰력과 브러시 접촉력을 정확히 추정하고 식(7)의 제어기에 포함한다면, 즉 $\widehat{G}(x) = G(x)$, $\widehat{F}_{fric} = F_{fric}$ 이라면 식(8)은

$$\dot{V} = -ks^2 \leq 0 \quad (9)$$

이므로 작은 양의 k 에 대해서도 시스템은 안정하다. 만약 마찰력 등의 외란을 포함하지 않는다면, 즉 $\widehat{G}(x) = \widehat{F}_{fric} = 0$ 이면, 식(8)은

$$k > |G(x)| + |F_{fric}| \quad (10)$$

이며 이 경우에 다음 조건을 만족한다.

$$\dot{V} = -s(ks - G(x) - F_{fric}) \leq 0 \quad (11)$$

즉, 추종 오차가 0 으로 수렴한다. 그런데 이 경우 k 값을 마찰력과 브러시 접촉력의 최대 값의 합보다 더 크게 선정해야 하는데, 큰 k 는 제어 입력 값의 채터링을 유발한다. 마찰력과 브러시 접촉력의 추정치를 제어입력에 반영할 경우 작은 값으로도 계가 안정하므로 약한 채터링을 기대할 수 있다. 슬라이딩 모드 제어기는 Fig. 4 의 블록선에 보인 것처럼 feed-forward 제어기와 feed-back 제어기의 조합이다.

3.2 Feedback linearization

Cai & Song⁴ 이 제안한 SRNC 는 feedback linearization 제어기의 일종이며 마찰력의 보상에 속도의 함수를 사용하지 않고 변위의 함수를 사용하였다. 그러므로 속도 산출기가 필요 없다. SRNC 는 PD 제어기와 같은 다른 선형 제어기와 병렬로 적용할 수 있는 유연성을 가지고 있다. 브러시 접촉에 의한 외란을 보상하기 위해 스프링 상쇄 보정 함수를 제어기에 추가하였지만 정확한 모델이 필요하지 않다.

식(4)로 주어진 계에 대해서 보편성을 잃지 않고 상태 공간의 원점($x=0, \dot{x}=0$)을 제어 기준

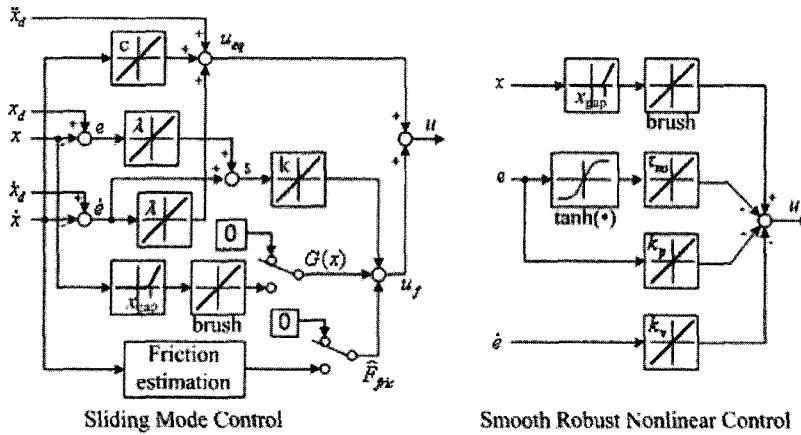


Fig. 4 Block diagram of SMC and SRNC

점으로 선정할 수 있기 때문에 제어토크를 다음과 같이 제안한다.

$$F_{appl} = G(x) - F_{nom} - K_v \dot{x} - K_p x \quad (12)$$

$$F_{nom} = \tau_{ms} \tanh(\alpha x) \quad (13)$$

마찰력 보정에 $\tanh(\cdot)$ 함수를 사용하였는데 함수의 특성은 Fig. 5와 같으며 α 가 매우 큰 경우 마치 bang-bang 제어기와 같은 특성을 보인다. 비선형 보상 제어기와 병렬로 PD 제어기를 채용하였다. 제어 토크를 포함하는 운동방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{x} = -(c + K_v) \dot{x} - K_p x - F_{nom} - F_{fric} \quad (14)$$

여기서 $\tau_{ms} = \tau_{max} + \varepsilon$ 이며 α 는 정상상태 오차를 조정하는 상수, τ_{max} 는 최대 정지마찰력, ε 은 제어력 값이 언제나 불확실성과 외란의 절대 크기보다 항상 커서 피제어 대상체가 외란에도 불구하고 허용 오차 안에서 목표에 도달하도록 보장하는 양의 상수이다. 제어를 포함하는 시스템의 안정도 정리를 다음과 같이 정의한다.

주장 1:

행렬 $c + K_v$ 가 positive definite 라면 운동방정식 (4)로 정의되는 시스템은 식 (12)와 (13)으로 정의되는 비선형 연속 강건 제어기에 의해 전역적으로 안정하다.

증명:

리아프노프 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$V = \frac{1}{2} \dot{x}^2 + \frac{1}{2} K_p x^2 + \frac{\tau_{ms}}{\alpha} \ln \frac{e^{\alpha x} + e^{-\alpha x}}{2} \quad (15)$$

리아프노프 함수를 운동방정식(4)의 경로를 따라 미분하면

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{x}\ddot{x} + \dot{x}K_p x + \dot{x}\tau_{ms} \tanh(\alpha x) \\ &= -(c + K_v)\dot{x}^2 - \dot{x}F_{fric} \\ &\quad + \dot{x}(\tau_{ms} \tanh(\alpha x) - F_{nom}) \end{aligned} \quad (16)$$

하지만

$$\begin{aligned} \tau_{ms} \tanh(\alpha x) - F_{nom} &= 0 \\ \dot{x}(1 - |\text{sign}(\dot{x})|)f_{stick} &= 0 \end{aligned}$$

이므로

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -(c + K_v)\dot{x}^2 - \dot{x}F_{fric} \\ &= -(c + K_v)\dot{x}^2 - \dot{x}\text{sign}(\dot{x})f_{slip} \\ &\quad - \dot{x}(1 - |\text{sign}(\dot{x})|)f_{stick} \\ &= -(c + K_v)\dot{x}^2 - |\dot{x}|f_{slip} \leq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

을 만족하므로 전역적 안정이 보장된다.

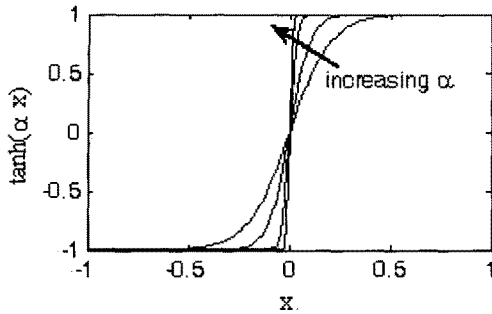


Fig. 5 tanh(*) function with various α

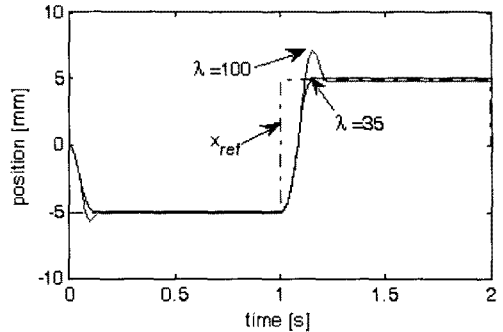


Fig. 6 Step response with different λ s for SMC (simulation)

4. 시뮬레이션 해석 및 시험

시뮬레이션 해석 및 실현에 Simulink 와 Real-Time Windows Target 을 사용하였다. 데이터 획득 하드웨어는 Real-Time Windows Target 과의 호환성이 보장된 NI PCI-6025E, 모터는 Metronix 사의 산업용 50W 급 AC 서보 모터를 토크제어 모드로 설정하여 사용하였다. 위치 센서는 선형 포텐시오미터이며 브러시 모사용 스프링은 금형 장치에 사용되는 표준품이다. 샘플링 시간은 0.002 초이며, 장치가 빠른 속도로 움직이지 않고 마찰력이 지배적이므로 감쇠계수는 무시하였다.

응답특성을 살펴보기 위해 두 종류의 신호입력을 사용하였다. 시험조건 1 은 상승시간, 오버슈트, 그리고 외란이 있는 경우와 없는 경우의 정상 상태를 관찰하기 위한 계단입력이다. 시험조건 2 는 조화입력에 대한 주파수 응답이며, 외란이 있는 경우 2Hz, 4Hz 에 대한 응답이다.

시뮬레이션은 성능 향상 등의 목적으로 시행했으며, 제어기 실현을 위해서 시뮬레이션 모델에서 plant 부분을 제거하고 제어 값이 D/A 변환기로 출력하도록 하였다. 또한 plant 의 변위를 읽기 위해 변위센서의 값을 A/D 로 읽어 들이는 블록을 추가하였다.

4.1 SMC

마찰력 및 브러시 접촉력 보상을 제외하였다. 제어 파라미터 결정 시 λ 값을 먼저 선정하였다. 즉, 계단 입력을 가하고 충분히 응답이 빠르면서 오버슈트가 적은 값을 택하였다. 그런 다음 마찰력과 브러시 접촉력 등의 외란에 대응하면서 채터링을 최소화하는 충분한 크기의 k 를 선정하였다. 실험에 의해 선정한 파라미터는 $\lambda=35, k=200$ 이다. λ 가 클수록 오버슈트도 커진다(Fig. 6 참조). 본

연구에서는 속도 산출에 단순한 수치미분을 사용하였다. 수치 미분은 입력 노이즈에 취약한 방법이므로 추후 더 강건하고 노이즈에 강한 산출기를 채용할 필요가 있다.

계단 기준 입력에 대한 응답을 Fig. 7 에 보인다. 상승시간은 0.2 초이내, 오버슈트는 없으며, 외란이 있는 경우, 즉 브러시가 접촉하는 첫 반주기 동안의 정상상태 오차가 접촉이 없는 후 반주기의 정상상태 오차보다 약간 큰 것을 알 수 있다. 기준 입력에 대한 추종 성능은 우수하며, 슬라이딩 모드 제어기의 전형적인 심한 채터가 없는 좋은 특성을 보이고 있다. 물론 채터를 더 줄이기 위해 k 값을 작은 값으로 선정할 수 있다. 하지만 추종 성능의 감소를 감수해야한다(Fig. 8 참고). 하단의

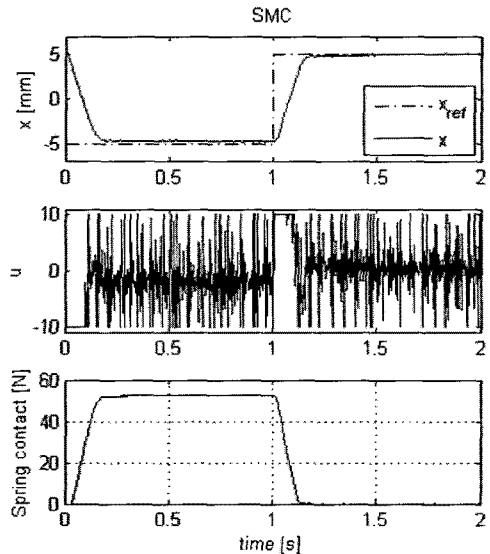


Fig. 7 Step response of SMC ($\lambda=35, k=200$)

그래프는 스프링 접촉력이며 브러시와 피 가공물의 접촉력에 해당하며 제어기에 대해서는 외란으로 작용한다. 식(7)의 계산식의 첫 항은 계통이 슬라이딩 평면을 벗어날 경우 계를 슬라이딩 평면으로 되돌리는 작용을 하는데, k 가 크면 bang-bang 제어에 가깝게 된다. 이 값을 줄일 경우의 영향을 살펴보기 위해 선정한 값의 1/4 에 해당하는 $k=50$

을 택하여 그 응답을 Fig. 8 에 보였다. 제어 채터링은 감소되지만 외란이 있을 경우(계단입력 前 반주기) 정상상태 오차가 커지는 경향을 관찰할 수 있다.

다음은 조화 입력에 대한 응답 특성 그래프이다(Fig. 9). 2Hz 까지의 조화 입력에 대해서 훌륭한 추종 성능과 외란에 대한 강건함을, 그리고 적은 채터링을 관찰할 수 있다. 그래프는 첨부하지 않았지만 4Hz 조화입력에 대해서는 제어 값이 대부분의 시간 동안 포화되며 추종성능이 저하되는 것을 확인할 수 있다. 이 주파수에서 계의 추종 성능을 얻으려면 더 큰 출력의 모터를 사용하면 될 것이다.

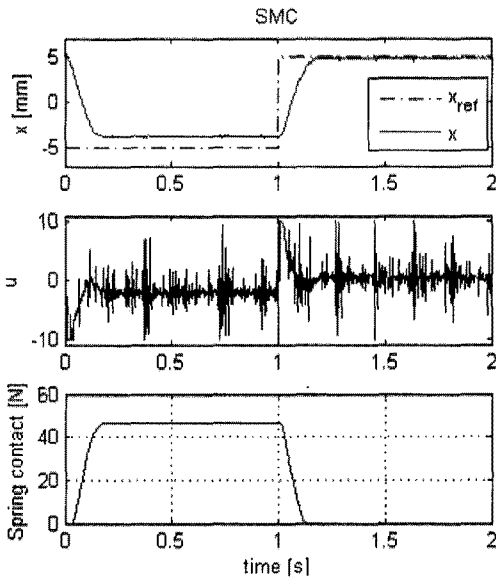


Fig. 8 Step response of SMC ($\lambda=35, k=50$)

4.2 Feedback linearization(SRNC)

마찰력에 대한 보상 및 부정확하지만 브러시 접촉력 외란에 대한 보상을 포함한다. K_p 와 K_v 는 정상상태 오차가 최소화되며 오버슈트가 없도록 선정하였다. 식(14)를 재정리하면

$$\ddot{x} + (c + K_v)\dot{x} + K_p = F_{nom} + F_{fric} \quad (18)$$

이므로 등식의 오른쪽 항을 외부입력으로 간주하면 일반적인 PD 제어가 설계 절차를 따를 수 있다. 선정한 파라미터 값은 $K_p = 5,000$, $K_v = 300$, $\tau_{ms} = 0.5$, $\varepsilon = 0.1$, $\alpha = 1 \times 10^6$ 이다.

계단 입력에 대한 응답을 Fig. 10 에 제시하였다.

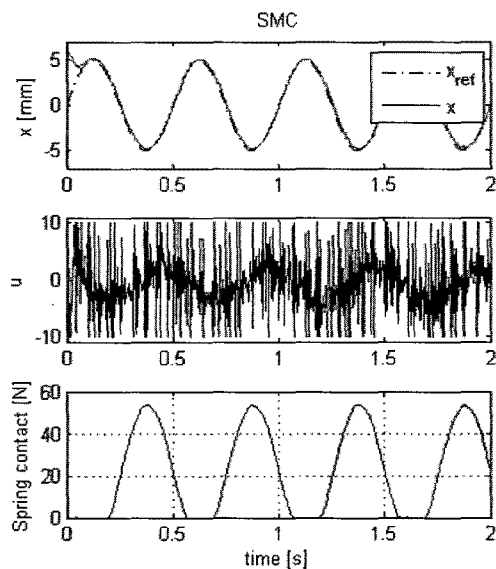


Fig. 9 Response of SMC with sinusoidal reference of frequency 2Hz

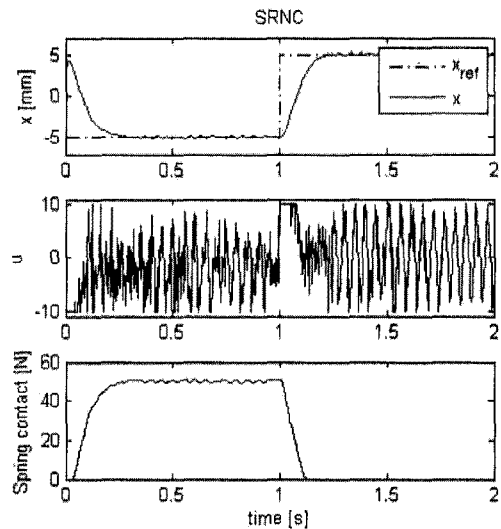


Fig. 10 Step response of SRNC

전반 주기인 0 초에서 1 초까지는 스프링 접촉에 의한 외란에 대하여 매우 작은 정상상태 오차를 보여주고 있다. 후반 주기인 1 초에서 2 초까지 스프링 접촉에 의한 외란이 없는 경우 오차 없이 정상상태에 도달하는 것을 관찰할 수 있다.

정현파 입력에 대한 응답은 Fig. 11 에 제시하였다. 2Hz 정현파와 기준 입력에 대해서 초기에 빠른 과도 특성을 보이며 정상 상태에 도달한 후 좋은 추종성을 보인다. 본 논문에 첨부하지는 않았지만 역시 4Hz 정현파 입력에 대해서 추종 성능이 저하되는 것을 관찰할 수 있었다. 이 주파수대의 기준입력에 대한 좋은 추종성을 원한다면 역시 큰 출력의 모터를 채용해야 하는 것은 슬라이딩 모드 제어기의 결과와 동일하다.

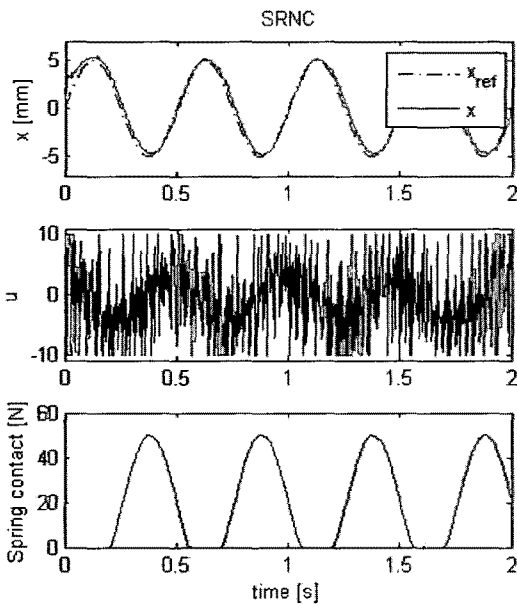


Fig. 11 Response of SRNC to sinusoidal input of frequency 2Hz

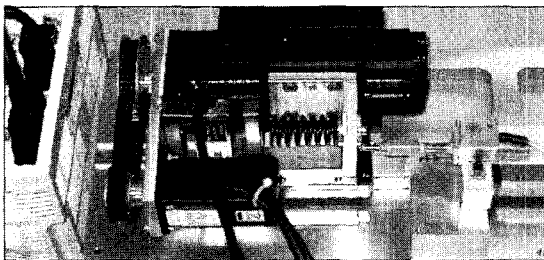


Fig. 12 A photo of the control experiment setup

5. 결론

1) 마찰이 지배적인 계의 위치 제어에 적합하다고 판단되는 제어기 후보를 선정하였다. 선정된 후보는 Sliding Mode Control 과 feedback linearization (SRNC)이다.

2) 마찰 모델을 포함하는 계의 운동방정식을 구성하였다. 정마찰력은 모터 최대 토크의 21%에 해당하는 큰 값이다.

3) 제어기의 안정도를 Lyapunov 직접법을 사용하여 증명하고 이를 통해 제어기를 설계하였다.

4) 시뮬레이션 해석을 통하여 제어 파라미터에 대한 전반적인 제어기의 특성을 파악하고 선정한 파라미터를 채용하여 제어기를 실현하였다.

5) 실험 결과를 분석하여 제어기 파라미터의 특징을 이해하였으며, 특징을 확인하기 위하여 변경된 파라미터에 의한 계의 응답을 비교 평가하였다.

6) 두 후보 제어기는 모두 외란과 모델링의 불확실성에 대한 강건함과, 마찰력이 지배적인 계에 대해 매우 좋은 특성을 보였다. 특히 SRNC 는 마찰력 보상에 속도 정보를 필요로 하지 않기 때문에 상태변수 관측기가 필요없는 매우 매력적인 장점을 가지고 있다.

7) 두 제어기 모두 높은 정밀도의 종방향 조화 운동이 필요한 연마기 브러시 종방향 운동 제어기로 충분히 채용될 수 있음을 확인하였다.

8) 하지만 SMC 는 신뢰성있는 상태 변위 관측기를 필요로 하는 점이 제어 공학자에게는 회피요인이 될 수 있다. 차후 신뢰성있는 진미분(true derivative)에 가까운 값을 얻는 관측 기술을 개발할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부·한국산업기술평가원 지정 계명대학교 전자화자동차부품기술혁신센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Lee, B. and Park, J.-H., "Contact Force Estimation for an Polishing Brush," J. of KSPE Spring Conference, pp. 515-516, 2009.
2. Canudas de Wit, C., Astrom, K. J. and Braun, K.,

- “Adaptive friction compensation in DC motor drives,” IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 1556-1561, 1986.
3. Radcliffe, C. J. and Southward, S. C., “A property of stick-slip friction models which promotes limit cycle generation,” Proc. American Control Conference, Vol. 2, pp. 1198-1203, 1990.
 4. Cai, L. and Song, G., “A Smooth Robust Nonlinear Controller for Robot Manipulators with Joint Stick-Slip Friction,” IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 449-454, 1993.
 5. Armstrong-Hélouvy, B., Dupont, P. and Canudas de Wit, C., “A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction,” Automatica, Vol. 30, No. 7, pp. 1083-1138, 1994.
 6. Wong, L. K., Leung, F. H. F. and Tam, P. K. S., “A chattering elimination algorithm for sliding mode control of uncertain non-linear systems,” Mechatronics, Vol. 8, No. 7, pp. 765-775, 1998.
 7. Onder, M., Unsal, C., Kaynak, O. and Yu, X., “Variable structure control of a class of uncertain systems,” Automatica, Vol. 40, No. 1, pp. 59-64, 2004.
 8. Han, S. I., “Precise Control of Dynamic Friction Using SMC and Nonlinear Observer,” Proc. of KSME Fall Conference, pp. 692-697, 2001.
 9. Haessig, D. A. and Friedland, B., “On the Modeling and Simulation of Friction,” Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 113, No. 3, pp. 354-362, 1991.
 10. Craig, J. J., “Introduction to Robotics: Mechanics and Control,” Addison Wesley, pp. 214-215, 1989.