

가상모드 입력성형기를 이용한 위치결정 스테이지 잔류진동 저감

서용규*, 장준원+, 홍성욱**

(논문접수일 2009. 1. 14, 심사완료일 2009. 4. 8)

Residual Vibration Reduction of Precise Positioning Stage Using Virtual-Mode Based Input Shapers

Yong-Gyu Seo*, Joon-Won Jang⁺, Seong-Wook Hong⁺⁺

Abstract

This paper presents an experimental result of virtual mode input shaping for positioning stage. Input shaping is liable to increase the rise time of the system, which often degrades the performance of system. The virtual mode input shaping is an input shaper design method to improve this problem. Experiments are performed with a precise positioning stage with a flexible beam of which natural frequency is adjustable. The experimental results show that the virtual-mode input shaper is useful to reduce the rise time as well as the residual vibration of precise positioning stages.

Key Words : Input Shaping(입력성형기), Duration Time(지속시간), Virtual-Mode Input Shaper(가상모드 입력성형기), Response Time(응답시간), Precise Positioning Stage(정밀 위치결정 스테이지), Rise Time(상승시간)

1. 서론

서보 시스템으로 구성된 위치결정 스테이지는 산업 현장에서 널리 사용되고 있다. 최근에는 이러한 위치결정 스테이지의 정밀도 및 속도 향상에 대한 요구가 증가하고 있어 이송시스템의 성능을 향상시키기 위한 다양한 연구가 수행되

고 있다⁽¹⁻⁵⁾. 위치결정 스테이지를 사용함에 있어 위치정밀도 및 안정화에 크게 영향을 미치는 부분 중의 하나가 출발, 정지 등 과도상태에서 발생하는 잔류진동이다.

입력성형기법(Input Shaping Method)은 이와 같은 잔류진동 제거를 위해 많이 사용되어 왔다. 입력성형기법이란 여러 개의 임펄스(Impulse)로 구성된 입력성형기(Input Shaper)에

* 금오공과대학교 대학원 기전공학과, 탐엔지니어링(주)

+ 금오공과대학교 대학원 기전공학과

++ 교신저자, 금오공과대학교 기계공학부 (swhong@kumoh.ac.kr)

주소: 730-701 경북 구미시 양호동 1번지

기준입력을 컨벌루션(Convolution)하여 만들어 낸 성형된 입력을 시스템에 입력함으로써 진동이 발생하지 않도록 하는 기법이다. 입력성형기법은 잔류진동을 효과적으로 제거할 수 있는 반면 입력되는 임펄스의 지속시간(Duration)에 의해 시스템의 응답시간이 길어지게 된다. 응답시간의 증가는 공정시간을 최소화해야 하는 LCD 및 반도체 장비 등의 시스템 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 이와 같은 문제점을 개선하기 위해 참고문헌⁽⁶⁾에서는 가상모드(Virtual mode)를 도입하여 입력성형기의 지속시간을 결정하는 방법을 제안한 바 있다. 그러나 가상모드 입력성형기를 실제 시스템에서 적용한 결과는 발표되지 않았다.

본 논문은 입력성형기의 지속시간 특성 개선을 위해 도입된 가상모드 입력성형기(Virtual-Mode Input Shaper: VMIS)를 시스템의 잔류진동 억제와 응답속도가 모두 매우 중요한 위치 결정 스테이지에 대해 실험적으로 적용함으로써 그 유용성을 확인하였다. 가상모드 입력성형기를 실제시스템에 적용하는 과정을 보였으며, 가상주파수 변화에 따른 응답특성을 비교하였다. 또한, 위치결정 스테이지의 정밀위치결정을 위하여 가상모드 입력성형기를 사용하여 그 결과를 기존의 입력성형기를 사용한 경우와 비교하였다.

일련의 실험을 통해 가상모드 입력성형기를 적용하면 잔류진동을 제거하면서 시스템 응답속도를 개선할 수 있음을 확인하였다.

2. 가상모드 입력성형기법

기 제안된 대부분의 입력성형기는 제어하고자 하는 대상진동모드의 고유진동수에 따라 입력성형기의 지속시간(Duration)이 확정된다. 이것은 본 연구에 사용된 위치결정 스테이지와 같이 액추에이터(Actuator)에 의해 구동되는 전체시스템의 응답속도에 많은 영향을 미치게 된다. 최근 제안된 가상모드를 이용한 입력성형기 설계법⁽⁶⁾은 단일모드에 대해 가상의 한

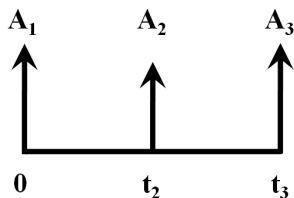


Fig. 1 Impulse amplitude and time location of the virtual mode input shaper

개 모드를 추가, Fig. 1과 같이 임펄스가 3개인 입력성형기를 도입하여 설계하는 방법이다. 이 방법을 이용하면 지속시간을 목적에 맞도록 설정할 수 있다.

Fig. 2는 비감쇠계에 대해 가상모드 입력성형기 무차원 시간과 무차원 주파수를 나타내고 있다. 여기서 무차원 시간이란 $t^* = f_s t_d$ 로 정의되며 입력성형기의 지속시간을 나타내게 된다. f_s, t_d 는 각각 시스템 고유진동수 및 입력성형기 지속시간이다. 또 무차원 주파수는 가상모드 주파수와 시스템 주파수의 비, 즉 $f^* = f_v / f_s$ 로 정의되며, f_v 는 가상모드 주파수이다. Fig. 3에는 무차원 지속시간에 대응되는 입력성형기 임펄스 크기를 나타내고 있다. 입력성형기 지속시간을 설정하면

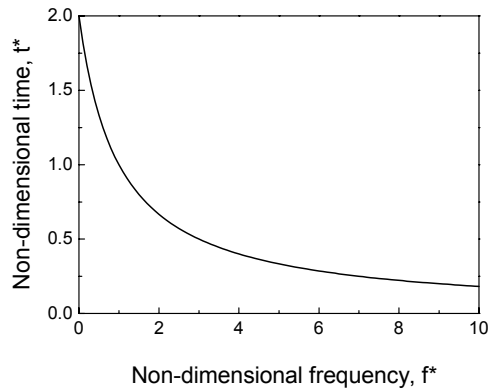


Fig. 2 Relation between non-dimensional time and non-dimensional frequency for virtual mode input shaper⁽⁶⁾

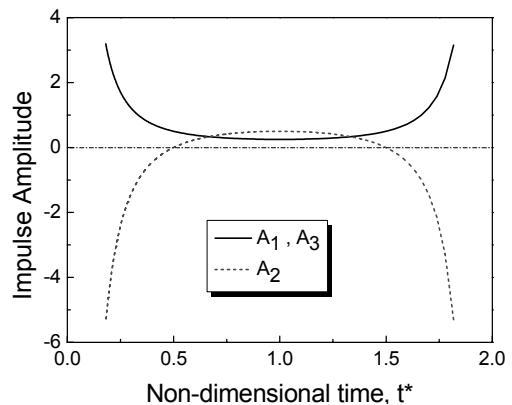


Fig. 3 Impulse amplitudes with respect to non-dimensional time⁽⁶⁾

Figs. 1과 2를 이용하여 입력성형기 임펄스의 간격과 크기를 결정할 수 있다⁽⁶⁾.

본 논문에서는 정밀 위치결정 스테이지 위에 탑재된 비감쇠 단일모드 시스템을 대상으로 가상모드 입력성형기를 적용하여 그 특성을 검토하였다. 즉, 고유진동수보다 높게 설정한 가상의 진동모드를 추가하여 입력 임펄스의 지속시간을 조정함으로써 시스템의 응답 상승시간을 변경할 수 있음을 실험적으로 검증하였다.

3. 가상모드 입력성형기를 이용한 정밀위치결정 실험

3.1 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 4에 보이고 있다. 위치결정 스테이지가 서보모터(Servo Motors)와 볼스크류(Ball Screw)로 구동되며, 선형가이드에 의해 직선운동을 유지하게 된다. 작업테이블 위에는 실제 운전 조건과 유사한 조건을 만들기 위한 질량이 부착되어 있으며, 그 위에는 유연보가 고정되어 있다. 유연보에는 고유진동수(Natural Frequency)를 조절할 수 있도록 이동 가능한 질량체가 고정되어 있다.

위치결정 스테이지의 운동으로 인해 발생하는 유연보의 진동을 측정하기 위해 작업테이블 위에 레이저 스캔 마이크로미터(Laser Scan Micrometer)를 장착하여 사용하였다. 본 논문에서는 실험의 편의를 위해 유연보와 질량체로 이루어진 외팔보의 고유진동수가 1Hz가 되도록 질량의 위치를 설정하였다. 서보모터의 제어를 위한 모션 컨트롤러는 DSP보드를 사용하였으며 서보모터에 관련된 데이터 및 모든 특성변수가 실시간으로 모니터링이 되도록 소프트웨어를 개발하였다.

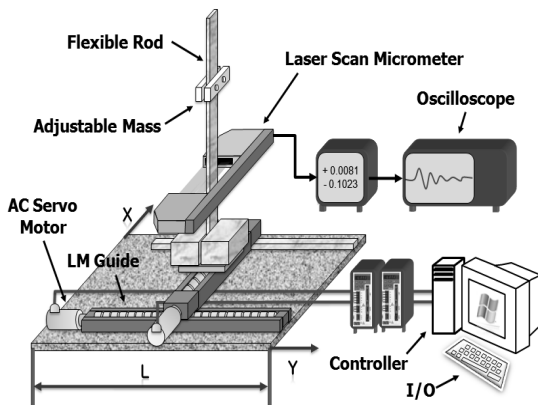


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup

3.2 가상모드 입력성형기 설정

실제 시스템은 단일모드이지만 가상모드를 추가하여 고려할 모드를 두 개로 확장하였다. 하지만 새로 도입한 가상모드 주파수는 입력성형기를 설계하고자 하는 대로 변화가 가능하다. Fig. 5는 가상주파수 변화에 따라 설계된 입력성형기를 나타내고 있다. Fig. 5에서 확인한 바와 같이 가상모드 입력성형기 설계방법에 의하면 가상모드의 주파수가 증가할수록 입력성형기의 지속시간이 단축되며 임펄스의 크기가 커지는 것을 알 수 있다.

가상모드 입력성형기 설계방법에 의하면 Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 기존의 ZV(Zero Vibration) 또는 UMZV(Unity Magnitude Zero Vibration)⁽⁷⁾성형기도 설계할 수 있다. 일반적인

	Virtual mode frequency (Hz)			
	3	5	6	7
Designed input shaper				
Other name	ZV	UMZV	-	-

Fig. 5 Input shapers for $f_s=1\text{Hz}$ with the virtual mode frequency varied

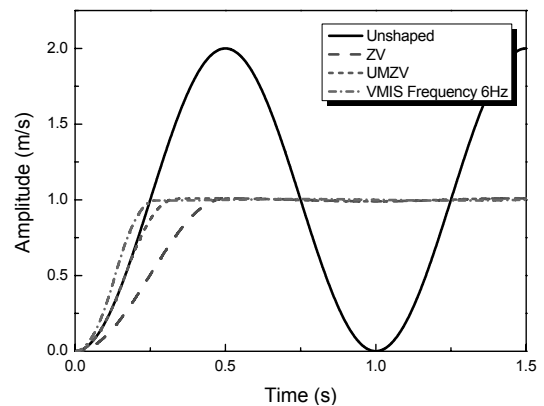


Fig. 6 Simulated step responses of flexible beam for $f_s = 1\text{Hz}$ with the input shaper varied

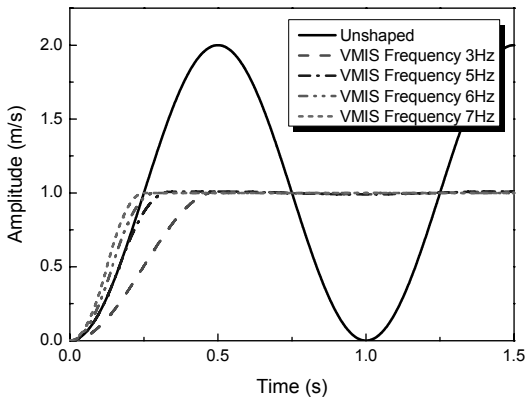


Fig. 7 Simulated step responses of flexible beam for $f_s = 1\text{Hz}$ with the virtual mode frequency varied

으로 가상모드 주파수를 높이면 임펄스의 지속시간을 더욱 낮게 함으로서 ZV, UMZV 등 기존의 입력성형기 보다 응답속도가 좋아진 입력성형기를 얻을 수 있다.

Fig. 6은 기준입력을 단위계단 형태로 주었을 때 가상모드 입력성형기와 기존 입력성형기들에 대한 시스템의 응답을 계산해서 비교한 것이다. 가상모드 주파수가 6Hz인 경우의 가상모드 입력성형기를 사용하였다. 잔류진동의 제거 효과는 기존의 입력성형기들과 동일한 결과를 보이지만 상승시간은 가장 짧음을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 5의 다양한 가상모드 주파수에 의하여 설계된 가상모드 입력성형기들에 대한 단위계단응답을 비교하여 나타낸 것이다. 설계된 입력 임펄스의 지속시간이 가장 짧은 7Hz인 경우가 상승시간이 가장 짧게 나타난다.

3.3 실험 및 결과 토의

본 논문에서는 위치결정 스테이지의 정밀위치결정을 위하여 각 이송구간에 대해 룩업테이블(Look-Up Table)을 생성하여 모터제어를 위해 사용하였다. 위치결정 스테이지의 총 이동거리는 250mm이며, 가속시간과 감속시간은 모두 500ms, 최고 속도는 100mm/s이다.

Fig. 8은 실제 위치결정 스테이지를 구동하기위해 입력되어지는 속도 명령 프로파일에서 가속구간만을 나타낸 것이다. 스테이지의 이송을 위한 실제 속도기준입력은 계단입력 보다는 가감속구간이 있는 사다리꼴 형식으로 나타나게 된다. 따라서 입력성형이 이루어지지 않은 경우, 가속구간이 단순하게 램프(Ramp) 형태를 취하게 된다. 가상모드 주파수가

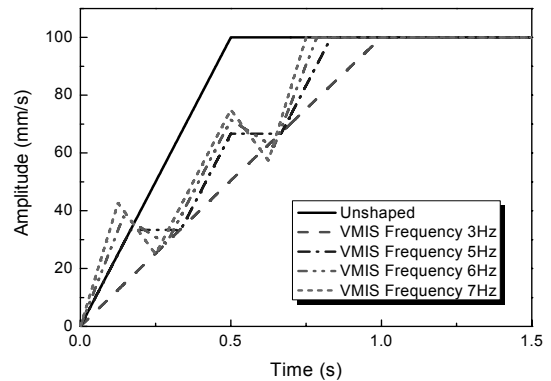


Fig. 8 Velocity command profiles in starting region for $f_s = 1\text{Hz}$ with the virtual mode frequency varied

올라갈수록 가속구간의 변화가 많이 나타남을 알 수 있다. 가상모드 주파수가 3Hz인 경우는 ZV 입력성형기가 되며, 본 실험에서는 가속시간이 0.5초로서 ZV의 임펄스간격과 일치함으로서 가속구간이 단조적인 램프형태로 나타나고 있다. 반면, 가상모드 주파수가 증가하게 됨에 따라 가속구간에서의 변화가 두드러지게 나타나게 된다. 가상모드 주파수가 5Hz일 때 계단형태의 양상을 보이게 되고 주파수가 더 높아지면 톱니(Saw Tooth)형태가 되면서 가속구간에서 가감속이 이루어지는 형태를 보인다. 속도 프로파일에서 이와 같은 급격한 변화를 주게 되더라도, 실제속도는 스테이지의 관성이나 마찰 등으로 인해 다소 부드러운 변화를 나타나게 된다.

Fig. 9(a)는 위치결정 스테이지에 대해 가상모드 주파수를 변화시키면서 가상모드 입력성형기를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에 대한 실험결과를 나타낸 것이다. 측정시스템이 작업테이블 위에 장착되어 있어 유연보의 작업테이블에 대한 상대진동만을 측정할 수 있다. 가상모드 입력성형기를 이용한 모든 경우 잔류진동을 효과적으로 제거하고 있음을 알 수 있다. 가상모드 주파수가 7Hz인 응답결과를 각각 ZV와 UMZV의 입력성형기와 동일한 임펄스를 가지는 3Hz, 5Hz의 응답결과와 비교하면, 가상주파수가 7Hz인 경우가 상대적으로 짧은 응답시간을 보이고 있음을 알 수 있다.

한편, Fig. 9(b)는 가상모드 주파수 변화에 따른 가상모드 입력성형기를 적용한 경우에 대한 응답 가속구간을, Fig. 9(c)는 감속구간, 즉, 위치결정 스테이지가 주어진 목표지점에서의 위치결정이 완료되는 구간의 응답을 나타낸 것이다. 가상모드 주파수가 높을수록 출발 및 목표지점에서의 위치결정이 더 빠르게 완료되는 것을 알 수 있다.

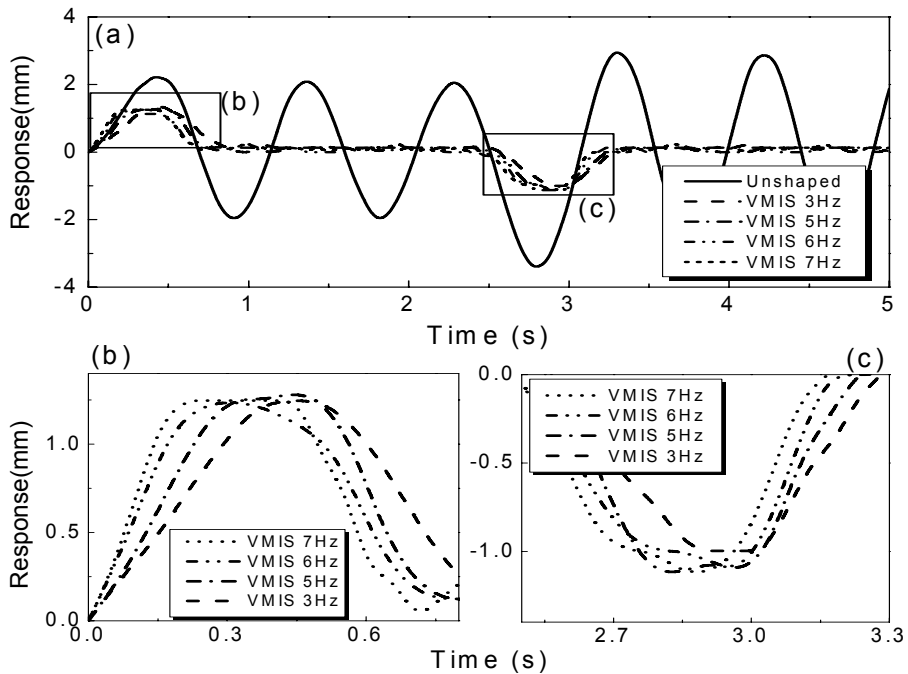


Fig. 9 Experimental results of flexible beam vibration for $f_s = 1\text{Hz}$ with the virtual mode frequency varied: (a) Response with and without virtual mode input shapers; (b) Zoomed plot for acceleration period; (c) Zoomed plot for deceleration period

가상모드 입력성형기의 이론적인 지속시간은 참고문헌⁽⁶⁾에서 제안된 바와 같이 $t_d = \frac{2}{f_v + f_s}$ 이다. 따라서 가상모드 주파수 7Hz일 때와 3Hz일 때의 이론적인 지속시간 차이는 0.25초이며 실험결과에서도 이와 유사한 차이를 보이고 있다. 앞서 설명한 바와 같이 실제 속도 프로파일이 스테이지의 동적 특성에 의해 속도 명령과 다소 차이가 있을 수 있음에도 불구하고 입력성형의 성능은 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이는 서보모터에 인가되는 속도입력과 스테이지의 실제속도 사이의 동적 특성이 입력성형기의 성능에 큰 영향을 미치지 못함을 의미한다.

결과적으로 가상모드 주파수를 변화시켜 입력 임펄스의 지속시간을 수정함으로써 위치결정 스테이지의 정밀위치결정을 빠르고 효과적으로 수행할 수 있는 가상모드 입력성형기를 설계할 수 있었다. 특히, 가상모드 입력성형기 적용에 따른 입력 속도프로파일의 급격한 변화 가능성에도 불구하고 입력성형기의 성능이 유지됨이 실험적으로 확인되었다. 따라서 시스템의 포화속도 이하에서는 가상모드 입력성형기에 의한 어떠한 속도 프로파일도 허용할 수 있을 것으로 생각된다.

가상모드 입력성형기의 적용에 의해 얻을 수 있는 위치결정 스테이지의 짧은 응답시간과 이로 인한 목표지점에서의 빠른 정밀위치결정 특성은 이미 상업화된 입력성형제어기⁽⁸⁾에 그 기능을 탑재함으로써 응답시간을 조절하는데 사용이 가능하다. 따라서 정밀 위치결정 스테이지가 많이 사용되는 공정, 예컨대 LCD 및 반도체 장비들의 공정시간을 줄임으로써 생산성 및 공정능력을 향상시키는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 이상 설명한 입력성형기법은 스테이지의 이동경로 보다는 목표지점이 되는 정지위치에서의 잔류진동을 억제하는 것만을 고려하고 있다. 고속으로 움직이는 대부분의 스테이지가 이송 중 기능을 하기 보다는 정지위치에서 기능을 하기 때문에 이 같은 점이 큰 제한은 되지 않는다. 그러나 위치결정 스테이지의 2축 이상이 동시에 작동되고 목표지점 잔류진동과 이동경로의 정확도를 모두 고려해야 하는 경우에는 속도 프로파일에 대한 성과와 이동경로를 동시에 고려한 입력성형기 설계방법에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

4. 결론

본 논문은 위치결정 스테이지의 정밀위치결정을 위한 가상 모드 입력성형기 실험적 응용에 대해 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 제어하고자 하는 대상 진동모드가 한 개일 경우 한 개의 가상모드를 추가하여 입력성형기의 지속시간을 조정할 수 있다.
- (2) 가상모드 입력성형기는 기존 연구에서의 입력성형기들과 동일한 잔류진동 제거효과를 보여주며, 상대적으로 시스템의 응답시간을 낮춤으로써 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다.
- (3) 시스템의 포화속도 이하에서는 가상모드 입력성형기에 의한 어떠한 속도 프로파일도 허용할 수 있다.

한편, 제안된 가상모드 입력성형기 설계방법은 상용화된 입력성형기에 탑재되었으며 상용장비의 잔류진동을 효과적으로 억제하는데 활용될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 차세대·지능형 마이크로팩토리 시스템 개발 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Tseng, Y. T. and Liu, J. H., 2003, "High-speed and Precise Positioning an X-Y Table," *Control Engineering Practice*, Vol. 11, No. 4, pp. 357~365.
- (2) Park, S. W., Hong, S. W., Choi, H. S., and Singhose, W. E., 2007, "Discretization Effect of Real-time Input Shaping in Residual Vibration Reduction for Precise XY Stage," *Trans. KSMTE*, Vol. 16, No. 4, pp. 71~78.
- (3) Jones, S. and Ulsoy, A. G., 1999, "An Approach to Control Input Shaping with Application to Coordinate Measuring Machines," *J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 121, pp. 242~247.
- (4) Park, C. H. and Lee, H. S., 2000, "Precise Positioning Technologies with Ball Screw," *J. of KSPE*, Vol. 17, No. 2, pp. 26~33.
- (5) Park, S. W., Hong, S. W., Choi, H. S., and Jang, J. W., 2007, "Dynamic Modeling and Input Shaping Control of a Positioning Stage," *Trans. KSMTE*, Vol. 17, No. 2, pp. 83~89.
- (6) Hong, S. W., Choi, H. S., Seo, Y. G., and Park, S. W., 2008, "A Method of Input Shaper Design Using Virtual Mode for Undamped Vibration Systems," *Trans. KSMTE*, Vol. 18, No. 12, pp. 83~90.
- (7) Singhose, W. and Seering, W., 2007, *Command Generation for Dynamic Systems*, Lulu.com.
- (8) Seah Mechatech Co., Ltd., 2008, *Seah Mechatech Product Brochure: Non-Oscillation Device*, Seah Mechatech Co., Republic of Korea.