

LabVIEW[®] 기반 3축 스카라 로봇의 유한 저크 및 게인 동조를 이용한 최적 모션 제어

김정현*, 정원지⁺, 김효곤⁺⁺, 이기상⁺⁺⁺
(논문접수일 2007. 10. 31, 심사완료일 2008. 3. 25)

Optimal Motion Control of 3-axis SCARA Robot Using a Finite Jerk and Gain Tuning Based on LabVIEW[®]

J. H. Kim*, W. J. Chung⁺, H. G. Kim⁺⁺, G. S. Lee⁺⁺⁺

Abstract

This paper presents the optimal motion control for 3-axis SCARA robot by using LabVIEW[®]. Specifically, for optimal motion control of 3-axis SCARA robot, we study velocity profile based on finite jerk(the first derivative of acceleration) and optimal gain tuning based on frequency response method by using LabVIEW[®]. The velocity optimization with finite jerk aims at generating the smooth velocity profile of robot. Velocity profile based on finite jerk is acquired and applied to 3-axis SCARA robot by using LabVIEW[®]. DSA(Dynamic Signal Analyzer) for frequency response method is programmed by using LabVIEW[®]. We obtain the bode plot of transfer function about 3-axis SCARA robot by using DSA, and perform the gain tuning considering dynamic characteristic based on the bode plot. These experiments have shown that the proposed motion control can reduce vibration displacement and response error rate each 33.7% and 51.7% of 3-axis SCARA robot.

Key Words : Finite Jerk(유한 저크), Acceleration Optimization(가속도 최적화), Gain Tuning(게인 동조), Frequency response measurement(주파수응답측정), LabVIEW[®](랩뷰), SCARA Robot(수평다관절 로봇)

1. 서론

현재 로봇 및 공작기계 분야 등 정밀 제어가 필요한 산업

현장에 있어 로봇의 역할은 점점 증가하고 있으며, 적용 범
위도 증가하여 수 마이크로미터의 오차범위 내의 정밀성을
필요로 하는 초정밀 작업에까지 사용되고 있다. 때문에, 로

* 창원대학교 기계설계공학과 (nice1210@hanmail.net)
주소: 641-773 경남 창원시 사림동 9번지
+ 창원대 기계설계공학과
++ 창원대 기계설계공학과 대학원
+++ 엘피시스

봇 관련 연구 분야에 있어 고속화, 고정밀화를 통한 성능 향상을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

고성능의 작업 수행을 하기 위해서는 설계 단계에서의 기구부 최적설계와 동시에 효율적 모션 제어를 위한 제어부의 성능 향상이 필요하다. 효율적인 모션제어가 이루어 지지 못할 경우 기구부의 과도한 진동이나 입력 신호에 대한 명령 추종성이 낮아 정밀 제어가 힘들어 지게 된다.

모션 구현 시 모터 속도 제어 입력에 대응되는 가속도 선도나 저크가 불연속적이면 관성 충격력이 발생되어 이송계의 과도 진동이 초래된다. 따라서 설계 단계에서의 최적구조 설계와 동시에 효율적 모션을 위한 가감속 제어 방법을 통한 고속화 및 진동 저감에 관한 연구의 필요성이 제기된다. 상용 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션을 통해 유한 저크 기반 가감속 제어를 이용하면 보다 유연한 모션을 통해서 기구부의 진동을 감소시킬 수 있다는 연구결과가 있다⁽¹⁾.

또한 로봇의 제어 성능을 향상시키기 위하여 PID 제어 동조(Tuning)기법에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다. 로봇의 초정밀 제어를 위해서는 기구부의 동적 특성을 고려한 제어가 필요하지만, 로봇 시스템은 비선형성이 강하므로 제어 파라미터를 이론적으로 계산해내는 것은 매우 어려우며, 따라서 조작자의 파라미터 조절에 대한 경험과 지식을 바탕으로 많은 실험을 통해 조정되어지고 있다. PID 제어기의 체계적인 동조 기법에 대한 연구는 Ziegler와 Nichols⁽²⁾에 의해 제시 되었으며 이후 이를 바탕으로 한 다양한 연구가 수행되고 있다. 최근에는 동역학 신호 해석기(Dynamic Signal Analyzer, DSA)를 이용하여 로봇의 주파수 응답 측정을 수행하여 로봇의 동적 특성을 파악하고 이를 바탕으로 제어기의 PID 게인 동조법에 대한 연구가 수행되기도 하였다⁽³⁾.

이렇듯 로봇의 최적 제어를 위한 연구는 다양한 방법으로 접근하고 있으며, 효율적인 제어 방법을 복합적으로 적용하면 제어 성능이 더욱 향상될 수 있기는 하나, 각 연구를 위한 추가적 실험장치가 필요하여 실험을 위한 비용이 증가

하는 문제점이 있다.

따라서 본 논문에서는 LabVIEW[®]라는 단일 장비를 이용하여 유한 저크 기반 가감속 제어 기법 및 주파수 응답 실험을 통한 동적 특성을 고려한 최적 게인 동조 방법을 실제 3축 스카라 로봇에 적용하여 로봇의 명령 추종성을 향상시키고 기구부 진동을 감소시켜 로봇 성능을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다.

2. 유한 저크 기반 가감속 제어

2.1 유한 저크(Finite Jerk)

모션 프로파일에 있어서 가속도의 1차 미분인 저크는 기구부의 진동과 밀접한 연관이 있다. 저크 특성 자체가 기구적인 관점에서 충격의 의미가 있기 때문에 급격하게 변하는 저크 특성은 기구부에 진동을 유발시킨다. 따라서 고속의 시스템으로 갈수록 저크 특성의 제어는 기구물의 방진과 제어하고자 하는 대상의 정밀도에 많은 영향을 미치게 된다. 이런 측면에서 저크의 무한대 또는 불연속점을 개선한 연속된 저크(continuous jerk)의 개념을 적용하여 구동 프로파일을 사용한 경우 서보모터의 가감속 특성을 변화시키는데 유효하지만 가속도 곡선 생성을 위한 연산량이 방대하기 때문에 실제 적용에 있어서 큰 어려움이 있다.

Fig. 2는 사다리꼴, S-Curve 및 유한 저크의 속도(\dot{q}), 가속도(\ddot{q}) 및 저크(\dddot{q}) 프로파일을 보여주고 있다. 일반적인 산업용 로봇의 구동을 위해 사용되어지는 AC 서보 모터의 기본적인 속도 구동 프로파일은 사다리꼴 형태로, 2차 미분 곡선인 저크 프로파일이 Fig. 2의 (a)와 같이 출발 시점과 정지 시점, 그리고 속도가 변하는 지점에서 무한대로 발산되어 기구부의 진동값이 최대가 되는 문제점을 가지고 있다. 이에 반해 Fig. 2의 (c)에서 보여주는 S-curve 속도 구동 프로파일의 경우 출발 및 변속지점, 정지지점에서 저크가 무한

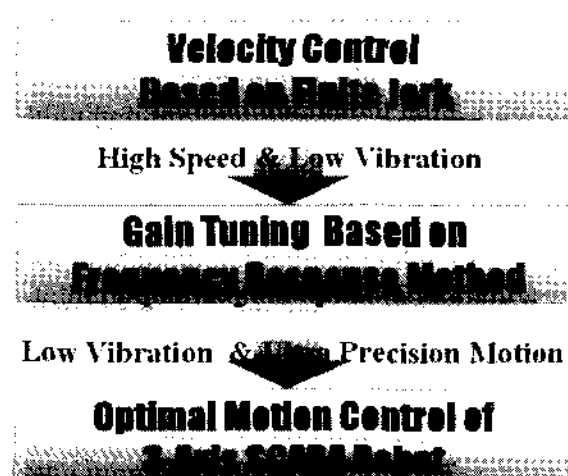
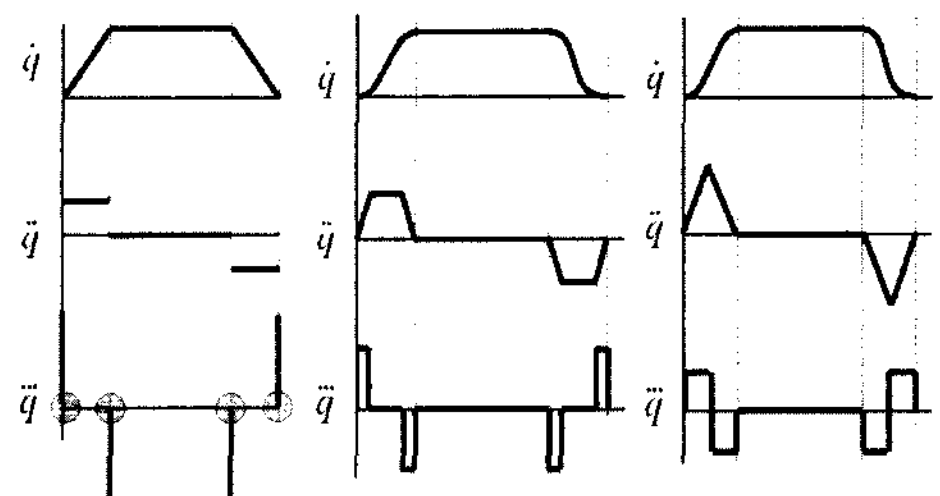


Fig. 1 Scheme of Optimal Motion Control



(a) Trapezoid (b) Finite Jerk (c) S-Curve

Fig. 2 Comparison of Velocity Motion Profile

으로 발산하지 하지 않고 일정한 값을 유지하여 진동 및 충격은 사다리꼴 속도 구동에 비해 감소된다.

그러나 같은 시간 내에 동일한 속도에 도달하기 위해서는 S-Curve는 사다리꼴 속도 구동 프로파일보다 최대 가속도가 증가하여 시스템을 구동하는 서보 모터에 가해지는 부하가 증가하게 된다.

Fig. 3에서 볼 수 있는 것과 같이 저크의 성분이 Δt 구간에 J만큼의 유한한 값을 갖도록 했을 경우 S-Curve의 가속도 곡선은 삼각형의 모양을 띠는 것과 비교해서 유한 저크 방식을 이용하였을 경우에는 가속도 곡선이 사다리꼴 모양을 띤다. 즉, 유한한 저크의 값을 가지면서 S-Curve방식과 비교해 같은 속도를 구현하기 위해서 보다 작은 최대 가속도 값을 갖는다. 이것이 본 유한 저크 방식의 강점이며 저크 지속시간 (Δt)를 조절하여 사다리꼴 속도 구동 방식에서 S-Curve곡선 까지 모두 표현이 가능하며, 이를 통해 최대 허용 가속도의 범위 내에서 가장 유연한 가속도를 구현할 수 있다. Fig. 3과 같은 Δt 크기의 저크 지속시간을 같은 유한 저크 프로파일은 정의함에 있어 변수들은 Table 1과 같이 정의한다.

2.2 유한 저크 기반 가감속 제어의 성능 평가

이상에서 제안한 유한 저크 기반 가감속 제어 이론을 실제

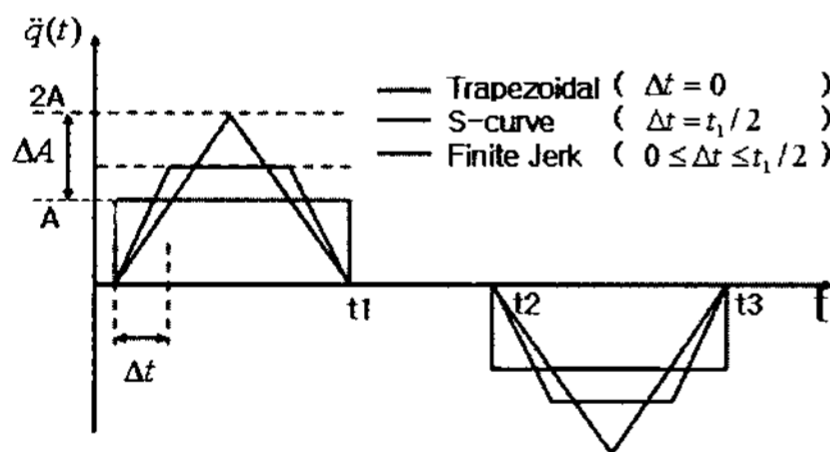


Fig. 3 Acceleration Type According to Variable Jerk Duration

Table 1 Description of Variables

Constants (given data)	Dependent variable
$T_d = T_3$ (total time)	$q_i(t)$ (displacement)
$T_{rf} = T_1$ (time of accel./decel.)	$\dot{q}_i(t)$ (velocity)
$T_{cq} = T_2$ (time of constant velocity)	$\ddot{q}_i(t)$ (acceleration)
Δt (jerk duration)	$\ddot{\ddot{q}}_i(t)$ (jerk)
	A (average accel.)

3축 스카라 로봇에 적용하기 위한 실험장치 구성은 Fig. 4와 같다. 로봇의 각 축은 AC 서보 모터로 구동하며 유한 저크 기반 속도 제어를 위하여 상위 제어용 컨트롤러는 NI PXI-7350 Motion Controller를 사용하였으며 LabVIEW[®] 8.0으로 프로그래밍 하였다^(4,5).

Fig. 5는 사다리꼴, S-Curve 및 유한 저크 기반 속도 프로파

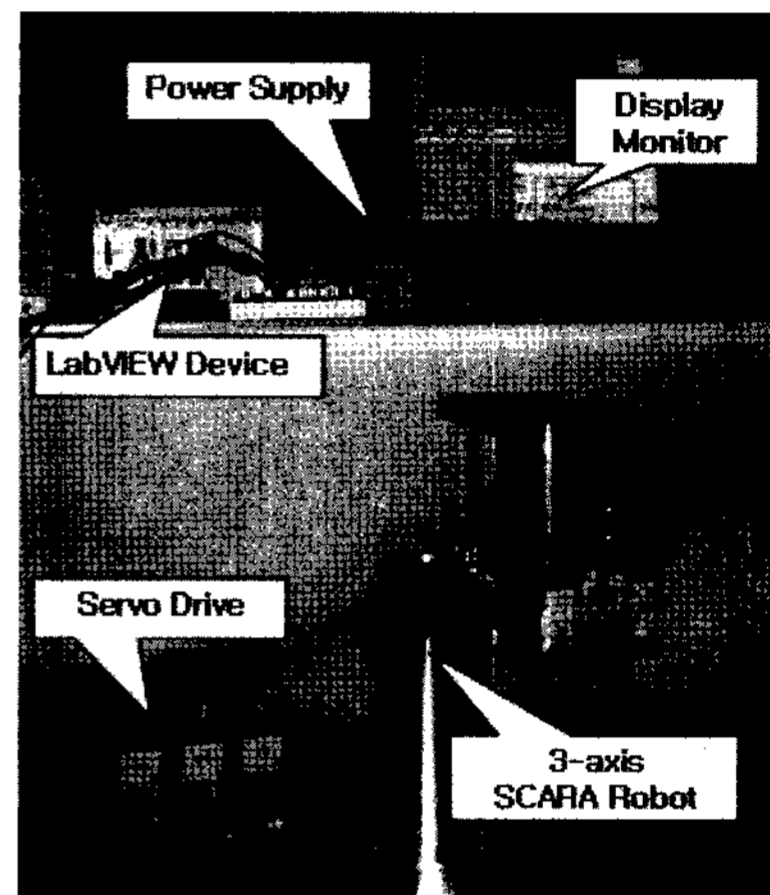
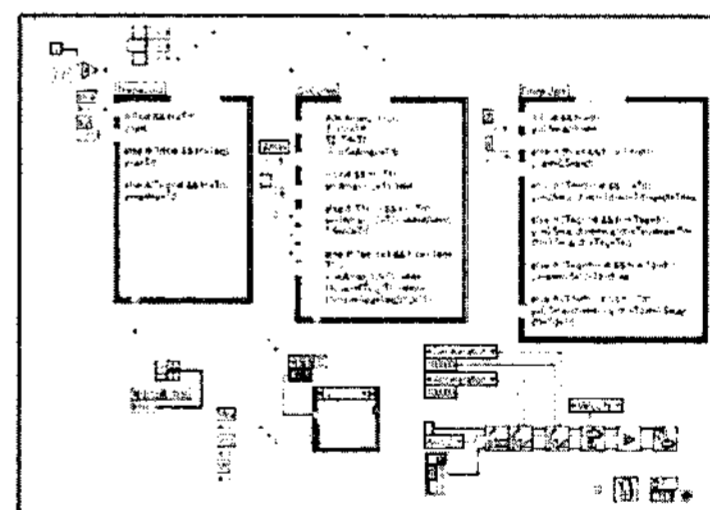
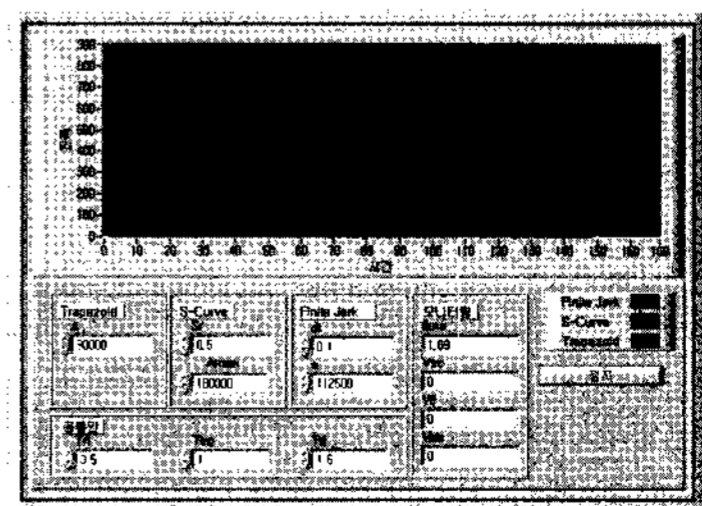


Fig. 4 Experimental Equipment Setup



(a) Block Diagram



(b) Front Panel

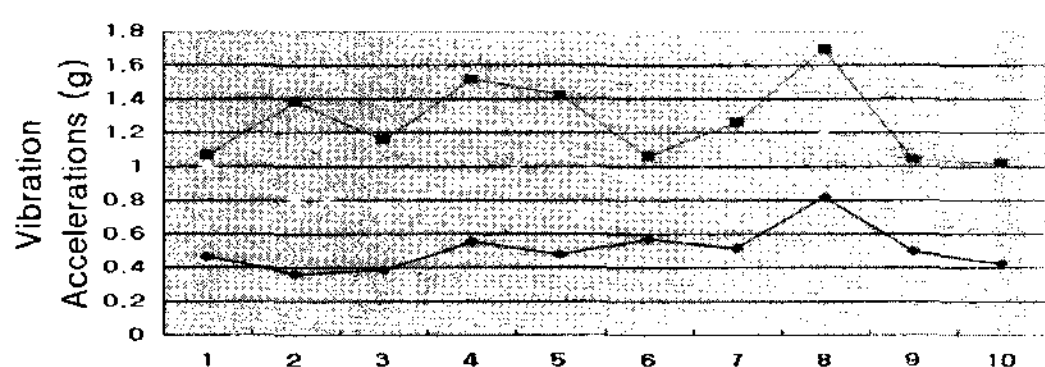
Fig. 5 LabVIEW[®] Program for Motion Control Based on Finite Jerk

Table 2 Experimental Conditions

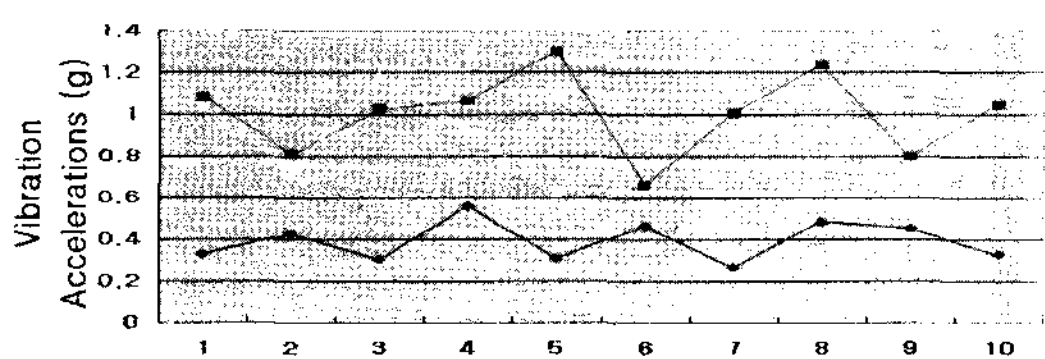
	Trapezoidal	S-curve	Finite Jerk
Input Signal (pulse/s)	45000	45000	45000
A (pulse/s ²)	1764.70	3529.41	2205.88
Δt	-	-	0.1
T_{rf}	0.5	0.5	0.5
T_{cg}	1.0	1.0	1.0
T_d	1.5	1.5	1.5

Table 3 Experimental Comparison of Each Motion

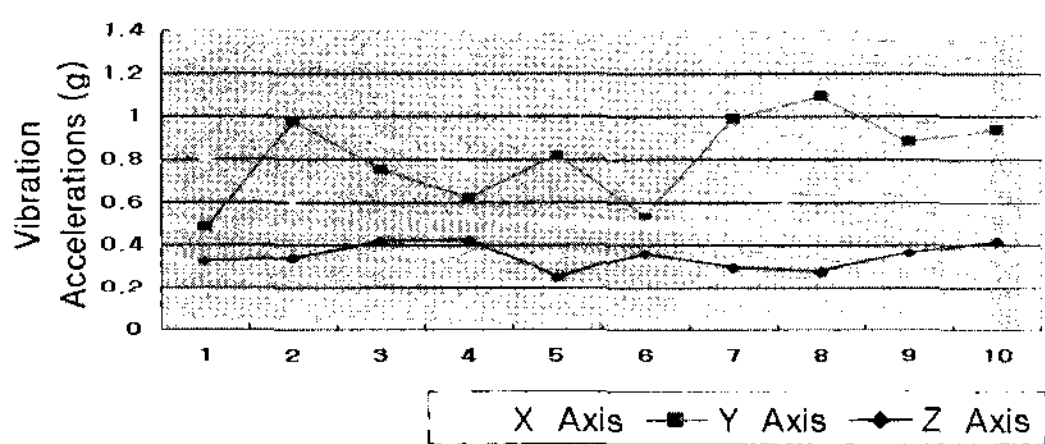
	Trapezoidal Velocity			S-curve			Finite Jerk		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Max. Vibration Accelerations (G)	1.04	1.26	0.51	0.90	0.99	0.39	0.73	0.81	0.34
Vibration reduction (%)	-	-	-	13.5	21.7	22.9	33	35.9	32.3



(a) Trapezoidal Velocity



(b) S-Curve



(c) Finite Jerk

Fig. 6 Maximum Vibration Accelerations of Each Motion

일을 이용한 3축 스카라 로봇의 모션제어를 위해 LabVIEW^R 8.0으로 프로그래밍 한 것을 보여주고 있다. LabVIEW^R 프로그래밍은 블록다이어그램과 프런트패널 두 부분으로 구성되어 있다. 블록다이어그램은 실제적인 프로그램의 그래픽 소스 코드를 보여주며, 프런트패널은 일종의 유저 인터페이스 (User Interface)로서, 사용자가 프로그램의 각종 초기 조건을 설정하며 프로그램의 작동을 컨트롤할 수 있다.

각축의 AC서보 모터에는 1/51 비율의 감속기가 포함되어 있으며 이를 고려하여 각 속도구동 프로파일의 실험 설정 값은 다음 Table 2와 같다.

이상의 각 조건에 대하여 FFT 장비를 이용하여 로봇의 동작 시 진동 측정을 수행하였다. 실험은 각 조건에 대하여 10번의 측정 후, Peak 값의 평균을 통해 결과를 비교하였으며 그 결과는 Fig. 6 및 Table 3과 같다. 모든 조건에서 최대 진동 가속도는 로봇의 회전 방향인 y축에서 최대값이 발생하였으며 로봇이 SCARA type이라는 구조적 특징에 의해 z축 방향의 진동 가속도가 가장 작게 나타났다.

각 조건에 대하여 사다리꼴 속도 구동 시 최대 진동값의 평균은 x축 방향으로 1.04G, y축 방향으로 1.26G, z축 방향으로 0.51G였으며, S-Curve 구동 시 x축 방향으로 0.90G, y축 방향으로 0.99G, z축 방향으로 0.39G가 발생하였다. 이에 반해 유한 저크 속도 구동 시 최대 진동값의 평균은 x축 방향으로 0.73G, y축 방향으로 0.81G, z축 방향으로 0.34G가 나와서 유한 저크기반 가감속 속도 제어가 사다리꼴 속도 구동에 비해 평균 33.7%의 진동 저감 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

3. 동적 특성을 고려한 최적 게인 동조

3.1 주파수 응답기법(Frequency response method)

3축 스카라 로봇의 동적 특성을 고려한 최적 게인 동조를 위해서는 주파수응답기법을 이용하였다. 시스템의 주파수 응답은 시스템의 해석과 설계를 위한 실제적이며 중요한 방법으로 $X\sin(\omega t)$ 와 같이 주파수가 변하는 삼각함수 입력신호에 대한 시스템의 정상상태응답으로 정의된다⁽⁶⁾. 삼각함수는 특별한 입력신호로서 그에 의한 선형시스템의 출력신호나 시스템 내부의 모든 신호들은 정상상태에서 시스템의

동적 특성에 따라서 $Y\sin(\omega t + \phi)$ 와 같이 입력파형에 대하여 진폭의 크기와 위상각이 다른 삼각함수 형태가 된다. 여기서, X와 ω 는 입력신호의 진폭과 각주파수이며, Y와 ϕ 는 각각 시스템의 출력신호의 진폭과 위상각이다. 이와 같이 실험적으로 결정한 시스템의 주파수응답으로부터 모르는 시스템의 전달함수를 유도할 수 있다. 또한 설계자는 주파수영역에서 시스템을 설계함으로써 시스템의 대역폭, 또는 원하지 않는 잡음이나 외란에 대한 시스템의 응답의 척도들을 조정할 수 있다⁽⁷⁾.

3.2 LabVIEW[®]를 이용한 DSA 프로그래밍

본 논문에서는 LabVIEW[®]를 이용하여 DSA를 프로그래밍하고 주파수응답실험을 통한 데이터를 수집하여 로봇의 전달함수를 실험적으로 획득하여 보드 선도로 변환 후 이를 바탕으로 최적 게인 동조를 수행하였다.

LabVIEW[®]는 그래픽 기반 프로그래밍 언어로써, 다른 텍스트 기반 프로그래밍 언어와는 달리 아이콘 형태의 함수들의 조합으로 구성되어 있다. 또한 LabVIEW[®] 프로그램은 일반적인 물리적 계측장비의 기능을 프로그램 내에서 구현하기 때문에 버추얼 인스트루먼트(Virtual Instrument, VI)라고 불린다⁽³⁾. 때문에 LabVIEW[®]를 이용하여 테스트 환경을 구축하여 실제 계측 및 제어 장비를 통해서 수행할 수 있는 다양한 테스트를 수행 할 수 있으며, 기존의 C 또는 BASIC등의 프로그램 및 계측, 제어 및 모니터링, 측정 데이터의 분석등 광범위한 공학 영역에 사용하여 제품의 개발 및 성능 향상시간을 혁신적으로 단축시킬 수 있다.

Fig. 7은 LabVIEW[®]를 이용한 3축 스카라 로봇의 게인 동조를 위한 하드웨어 연결선도이다. 본 실험에서 DUT (Device Under Test, 피시험장치)는 3축 스카라 로봇의 각 축의 액츄에이터(Actuator)로 사용한 AC서보 모터이며, 주파수응답시험에서 입력신호는 속도 제어 루프의 속도 명령 신호로서, 2HZ~500HZ까지 변하는 Sine 파형이며 속도 명령 신호의 전압레벨은 $0.5V_{rms}$ 이다. 주파수응답기법을 이용

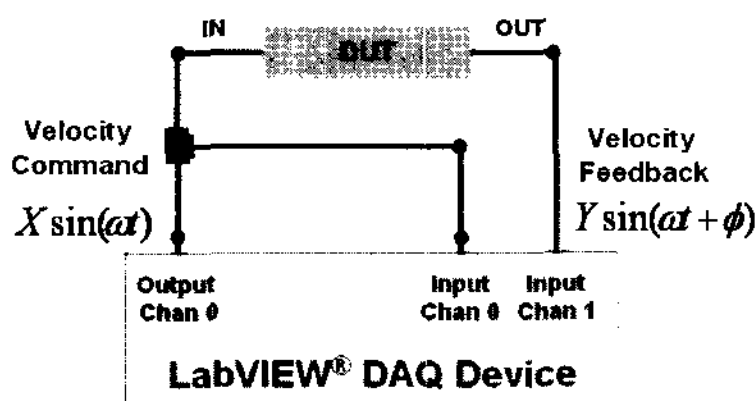


Fig. 7 Frequency Response Measurement Connection Diagram

한 로봇의 최적 게인 동조를 위한 LabVIEW[®] DAQ하드웨어 구성은 다음과 같다. PXI-4472B는 아날로그 입력장치로서 $X\sin(\omega t)$ 형태의 입력신호를 발생시키며, PXI-6763은 아날로그 출력장치로서 DUT를 통과한 출력신호를 수집한다. 또한 PXI-7350은 Motion Controller로서 3축 스카라 로봇의 상위 모션 제어를 담당하게 된다.

Fig. 8은 LabVIEW[®]를 이용한 주파수 응답실험을 위해 프로그래밍한 동역학 신호 분석기의 GUI인 프론트 패널을 보여주고 있다⁽⁸⁾. 유저는 이 프론트 패널상에서 게인 동조를 위한 주파수 응답실험을 위한 초기 설정과 실험 결과를 확인할 수 있다.

3.3 동적 특성을 고려한 서보 게인 동조

상기 실험 장치와 프로그램을 이용한 게인 동조 순서는 속도 루프 비례게인, 적분게인, 그리고 위치 제어 루프의 비례게인 순으로 설정하게 된다.

폐루프의 보드 선도는 식 (1)과 같이 폐루프 전달함수 $G_c(s)$ 와 개루프 전달함수 $G_o(s)$ 사이의 관계가 존재하므로 추출된 폐루프의 보드 선도로 개루프 보드 선도를 구할 수 있다.

$$G_o(s) = \frac{G_c(s)}{1 - G_c(s)} \quad (1)$$

개루프의 보드선도로부터 이득 여유(gain margin : 위상 (Phase)이 180° 되는 지점)과 위상 여유(phase margin : magnitude가 0이 되는 지점)을 구하고 속도루프의 비례게인(Kv)의 선정 기준으로 삼는다. 그리고 일반적으로 이득여유는 -6dB ~ -20dB, phase margin은 45도 이상이 되도록 속도루프 비례게인(Kv)을 조정한다.

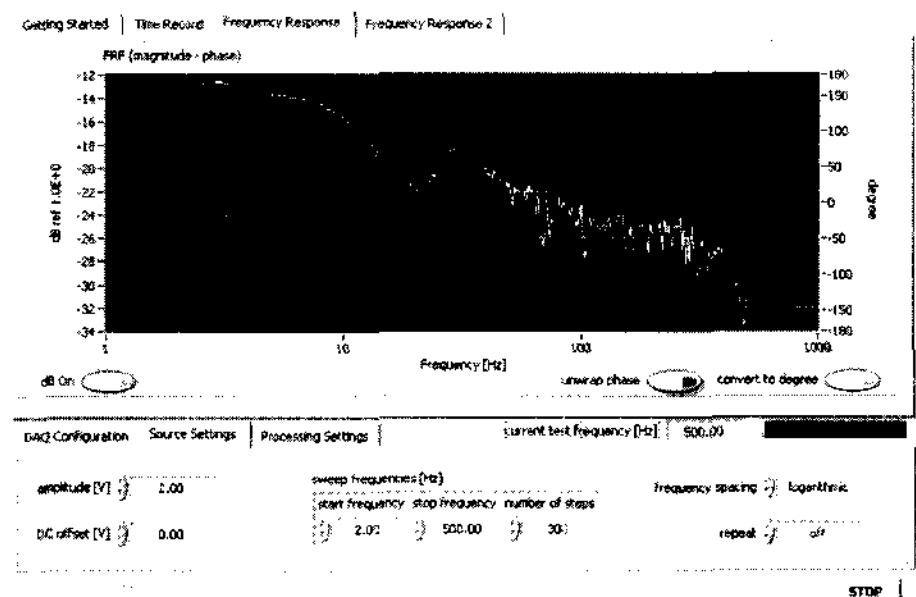


Fig. 8 Front Panel of LabVIEW[®] Program for Dynamic Signal Analyzer

Table 4 Tuning Result of 3-axis SCARA Robot

	Gain margin (dB)		Phase margin (Degree)		Kv		Ki		Kp	
	before	after	before	after	before	after	before	after	before	after
1st Joint	-17	-11	-	-68	50	177	100	201	20	43
2st Joint	-19	-13	-	-46.5	50	223	100	305	20	44
3st Joint	-15	-8.5	-91.3	-116	50	141	100	1014	20	700

$$G_{vo} = \frac{Y}{X} = \left(\frac{K_i}{s} + K_p \right) = K_p \left(\frac{\frac{K_i}{K_p}}{s} + 1 \right) = K_p \left(\frac{T_i s + 1}{T_i s} \right) \quad (2)$$

속도루프의 적분게인(Ki)은 적분 시정수에 의해 결정된다. 개루프 전달함수는 식 (2)와 같으며, 적분기에 의한 개루프 전달함수의 보드 선도 특성은 적분시정수 1/Ti의 10배되는 지점에서 위상이 0에 가까워지므로 적분기를 사용하여도 위상여유가 변하지 않도록 위상여유가 계산된 지점(gain cross over frequency)의 1/10 이 되는 지점에 적분기의 시정수가 있도록 한다. 따라서 속도루프의 적분 시정수는 속도루프 비례게인 조정시에 얻은 위상여유가 변하지 않도록 gain cross over frequency의 1/10이 되는 지점을 적분시정수로 정한다.

속도루프의 비례게인을 조정하기 위해 추출된 페루프 전달함수의 보드 선도로부터 크기가 -3dB되는 지점이 위치루프에 유효한 속도루프의 대역폭(bandwidth : cut-off frequency)가 된다⁽⁶⁾. 위에서 얻은 속도루프의 대역폭으로 속도루프의 전달함수를 1차 시스템으로 근사화 시키면 식 (3) 및 식 (4)와 같이 속도루프의 전달함수를 구할 수 있다.

$$G_p(s) = \frac{2\pi f_c K_p}{s(s+2\pi f_c)} = \frac{2\pi f_c K_p}{s^2 + 2\pi f_c s + 2\pi f_c K_p} = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} \quad (3)$$

$$\zeta\omega = \pi f_c, \quad \omega^2 = 2\pi f_c K_p \quad (4)$$

여기서, 위치제어루프의 감쇠율인 ζ 가 결정되면 비례게인 K_p 와 대역폭 f 는 다음식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$K_p = \frac{\pi f_c}{2\zeta^2}, \quad f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{f_c}{2\zeta} \quad (5)$$

Table 5 Average Value of Response Error

Axis	Case	Conventional gain tuning [mV]	Proposed gain tuning [mV]	Error reduction rate [%]
The 1st Axis		81.84	48.19	41.1
The 2nd Axis		41.39	22.49	45.7
The 3rd Axis		- 4.43	- 1.41	68.2

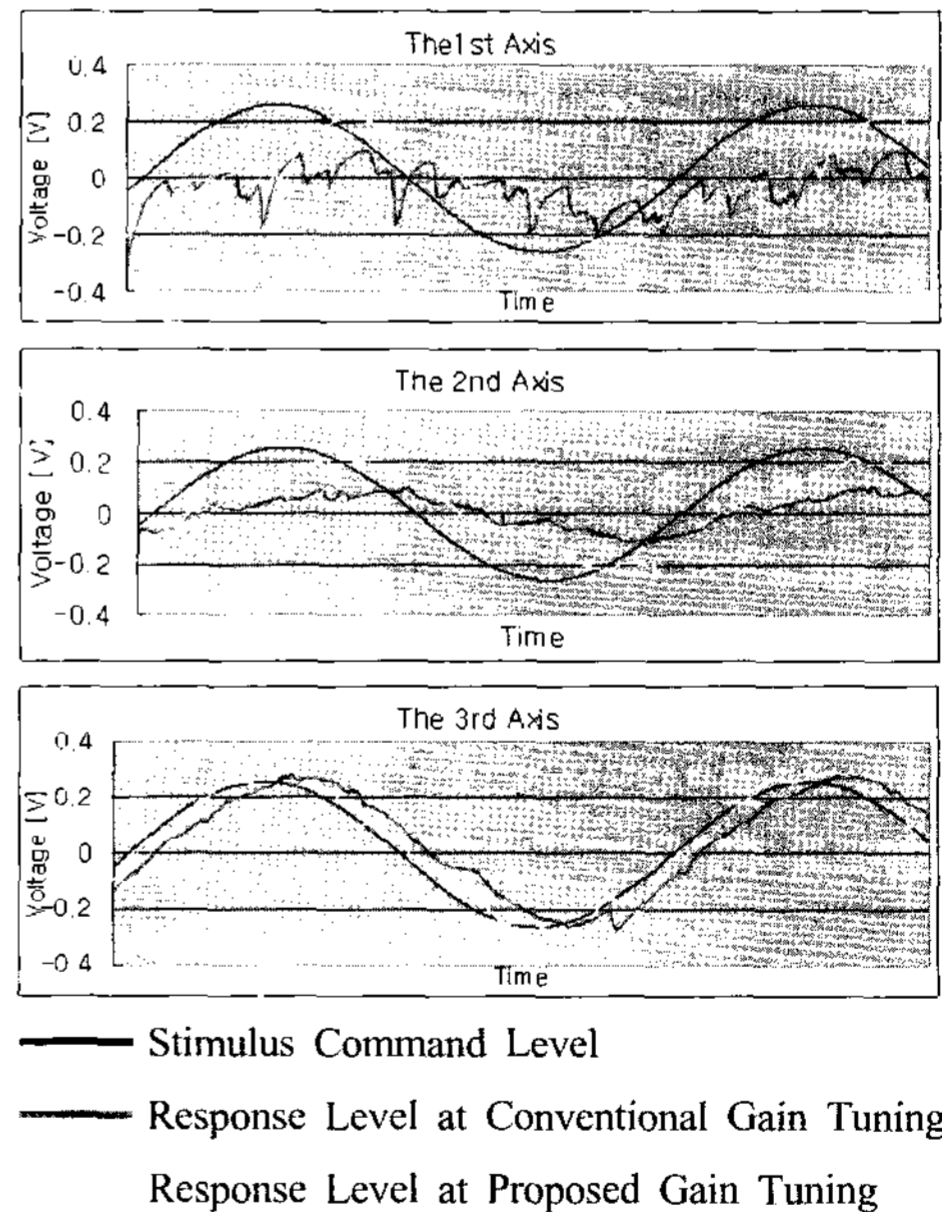


Fig. 9 Response Test Results of 3-axis SCARA Robot

이상의 방법을 이용하여 3축 스카라 로봇의 동적 특성을 고려한 게인 동조 결과는 Table 4와 같다.

LabVIEW^R를 이용한 최적 게인 동조 기법을 이용한 3축 스카라 로봇의 성능 평가를 위한 실험을 수행하였다. 500mV_{rms}를

속도 명령으로 인가했을 경우 기존 게인 값과 동조 후의 게인 값을 적용하였을 경우의 속도 응답을 측정하여 평균 응답 오차값을 비교하였다. Fig. 9는 그 결과를 보여주고 있으며, Table 5는 각 축의 평균 응답 오차값(mV : millivolts)과 응답 오차율을 보여주고 있으며, 본 논문에서 제안한 게인 동조 후 응답 오차율이 현저히 감소하였음을 볼 수 있다.

4. 결론

본 논문은 LabVIEW[®] 기반 유한 저크 기반 가감속 제어 및 주파수응답실험을 통한 동적 특성을 고려한 게인 동조법을 이용한 3축 스카라 로봇의 최적 모션 제어를 수행하였다.

LabVIEW[®]를 이용하여 유한 저크 기반 가감속 제어 알고리즘을 프로그래밍하여 사다리꼴 구동 프로파일 및 S-curve 구동 프로파일과 비교하여 진동 저감효과를 검증하였다.

또한, 로봇의 동적 특성을 고려한 게인 동조를 위해서 LabVIEW[®]를 이용하여 동역학 신호 해석기를 구현하고 주파수 응답실험을 통해 로봇의 전달함수를 실험적 방법으로 도출하였으며, 이를 이용하여 동적 특성을 고려한 최적 게인 동조를 수행하였다. 최적 게인 동조를 통한 성능 검증은 입력 신호에 대한 응답신호의 오차율을 통해 확인하였다.

후 기

본 논문은 한국 산업기술재단 지원으로 수행한 지역전략 산업 석박사 연구 인력양성 사업의 지원으로 수행된 연구결과입니다.

참 고 문 헌

(1) Chung, W. J., 2007, "The study of Servo -Parameter Tuning Technique for 6-Axes Articulated Robot Manipulator in consideration of dynamic characteristics," *Journal of the Korean Society of Machine Tool*

Engineers, Vol. 16, No. 5, pp. 1~6.

(2) Zieler, J. G. and Nichols, J. G., 1942, "Optimum Setting for Automatic Controllers," *Trans. ASME*, Vol. 64, pp. 759~768.

(3) Chung, W. J., 2006, "Acceleration Optimization of a High-speed LCD Transfer Crane Using Finite Jerk.," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 23, No. 3, pp. 110~117.

(4) National Instruments, 2005, *LabVIEW Fundamentals*, Korea.

(5) Fu, K. S., Gonzales, R. C., and Lee, C. S. G., 1987, *ROBOTICS Control, Sensing, Vision, and Intelligence*, Mac Graw Hill, Inc, New York.

(6) Richard, C. D., 1992, *Modern Control Systems*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Korea, pp. 305~354.

(7) Bolton, W., 1999, *Mechatronics*, Addison Wesley Longman Limited, Korea, pp. 293~338.

(8) National Instruments, 2005, *Sound and Vibration Toolkit User Manual*, Korea.

(9) Ha, H. K., 1999, "On-line Gain Tuning of Industrial Robot Using MRAC," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 8, No. 5, pp. 76~82.

(10) Jeong, Y. C., 2001, "Controller Auto-tuning Scheme for Improving Feedback System Performance in Frequency Domain," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 3 pp. 26~30.

(11) Jeong, S. H., 2006, "A Study on the Optical Element Alignment Automation using Multi-Axis Ultra Precision Stage," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 6, pp. 64~70.