

SolidWorks®와 LabVIEW®를 연동한 6축 수직 다관절 로봇의 게인 튜닝 연구

정창두^a, 정원지^{a*}, 김만수^a

Technique for Simulating Gain Tuning using SolidWorks® and LabVIEW® for a Six-Axis Articulated Robot

C. D. Jung^a, W. J. Chung^{a*}, M. S. Kim^a^a School of Mechatronics, Changwon National University Changwon, 641-773, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	16	September	2013
Revised	6	January	2014
Accepted	16	January	2014

Keywords:

6-axis articulated robot
 SolidWorks®
 LabVIEW®
 Simulation-based gain tuning
 Experimental gain tuning

ABSTRACT

For accurate gain tuning of the lab-manufactured six-axis articulated robot RS2with less noise, in this study, a program routine using dynamic signal analyzer, which is a realization of a controller design algorithm in the frequency domain, is programmed using LabVIEW®. The contribution of this paper is the proposal of a simulation technique based on SolidWorks® and LabVIEW® for the gain tuning of a six-axis articulated robot. To realize the simulation, the LabVIEW® program used for experimental gain tuning is incorporated into SolidWorks®. A comparison shows that the results of simulation-based gain tuning and experimental gain tuning are almost the same within a 5% error bound. On the basis of the comparison, it can be suggested that the simulation-based technique for gain tuning can be applied instead of experimental gain tuning to a six-axis articulated robot by interlocking SolidWorks® and LabVIEW®.

1. 서론

오늘날 산업현장에 산업용 로봇이 널리 보급이 되어 감으로써 로봇의 성능이 발전하고 로봇의 제어 기법 또한 발전하고 있다.

본 연구의 목적은 산업용 6축 수직다관절로봇의 1/4사이즈로 제작된 연구용 프로토타입의 로봇의 최적 제어를 위하여 LabVIEW®^[1,2,7]를 이용하여 주파수가 변하는 사인파형(Swept-sine signal)을 이용한 주파수응답해석을 통해서 최적 게인 튜닝 실험을 수행하고 SolidWorks®와 LabVIEW®를 연동하여 시뮬레이션으로 게인 튜닝을 하고 실험값과 시뮬레이션을 비교하여 시뮬레이션 상으로 게인 튜닝이 가능하다는 것을 증명하는데 있다.

2. 주파수응답해석을 통한 게인 튜닝

2.1 연구용 6축 수직다관절 로봇

본 논문에 사용 되는 로봇은 본 실험실에서 연구 목적으로 자체 설계 및 개발된 6축 수직다관절 핸들링용 1/4사이즈 프로토타입 로봇으로 Fig. 1과 같으며 4절 링크(4-Bar Link)구조와 5축에 슬라이드방식을 이용한 링크 구조를 사용하여 로봇 끝단에 받는 하중을 지지 할 수 있는 구조로 제작 되었다. 또한 로봇의 부하량을 고려하여 가반하중과 진동충격에 강하게 설계하였다. 로봇의 제어를 위해 NI PXI-7350장비의 위치제어장치를 이용하여 수직 다관절 로봇의 모션을 제어하도록 시스템을 구성하였다.

* Corresponding author. Tel.: +82-55-267-1138

Fax: +82-55-263-5221

E-mail address: wjchung@changwon.ac.kr (W. J. Chung).

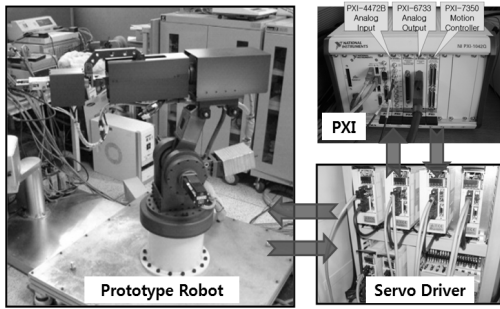


Fig. 1 Drawing of complex tool holder

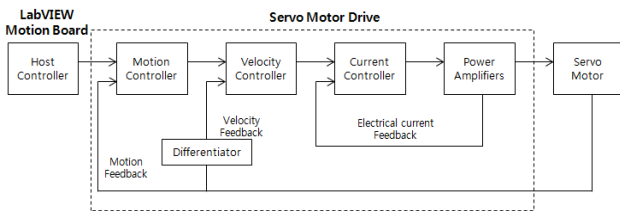


Fig. 2 Block diagram for motion control of 6-axis articulated robot

2.2 로봇의 제어기 구성 및 튜닝 대상

아래 Fig. 2는 서보제어(Servo Control System)의 구성도를 나타내고 있다. 상위 제어기는 위치 제어만 담당하고 서보모터드라이버(Servo Motor Driver)에서 속도 및 전류제어를 담당하고 있다. 6축 수직 다관절 로봇의 동적 특성을 고려한 게인 튜닝은 서보계의 안쪽 루프(Inner Loop)인 속도제어루프(Velocity Control Loop)의 파라미터(Parameter)를 조정한 후 바깥쪽 루프(Outer Loop)인 위치루프(Position Loop)의 게인을 조정한다. 조정될 서보파라미터(Servo Parameter)는 서보모터드라이버의 속도제어기의 비례게인과 적분게인, 상위의 위치제어기에 있는 비례게인 값들이다.

2.3 최적 게인 튜닝 과정^[4]

가. 속도 제어 루프의 비례게인(K_v) 결정

속도제어 루프의 비례게인은 Fig. 3과 같이 동역학신호분석기(Dynamic Signal Analyzer, DSA)를 속도제어 루프에 연결한 후 임의의 비례게인 값을 설정하고 주파수가 변하는 정현파 속도 명령을 인가하고 그 속도 피드백 값과 비교하여 주파수 응답해석을 통하여 폐루프 전달함수의 보드선도를 얻을 수 있다.

폐루프의 보드선도로부터 최대 피크 게인(Maximum Peak Gain) M_p 는 2~6 dB 이하가 되도록 설정한다^[5].

또한 폐루프의 보드선도는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 폐루프 전달함수 $G_c(s)$ 와 개루프 전달함수 $G_o(s)$ 사이의 관계가 존재하므로 추출된 폐루프의 보드선도를 이용하여 개루프 보드선도를 구할 수 있다.

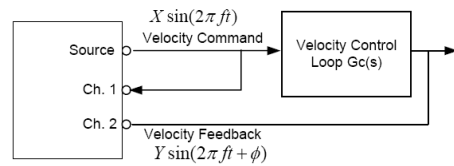


Fig. 3 Interface with the dynamic signal analyzer

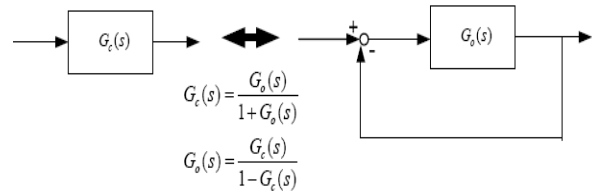


Fig. 4 Conversion to bode diagram of open loop transfer function

이와 같은 방법으로 획득한 개루프의 보드선도로부터 Fig. 5와 같이 이득여유(위상 = 180°)와 위상 여유(이득 = 0)를 구하고 비례게인 선정 기준으로 삼는다.

시스템이 안정성을 확보하고 최적의 운동 제어를 위한 이득여유와 위상여유에 대하여 기존 연구를 통해 실험적인 방법에 의해 구해진 최적 이득여유는 -6 dB ~ -20 dB이고 위상여유는 45° 이상이다^[3]. 이득여유와 위상여유가 최적 범위에 들도록 비례게인을 조정한다. 예를 들어 비례게인이 K_v 일 때 이득여유가 -25 dB일 때, 안정영역에 있지만 응답성을 향상시키기 위해 이득여유(Gain Margin)를 -6 dB이 되도록 새로운 K'_v 을 구하는 계산식은 식 (1)과 같다.

$$20 \log x = \frac{(-6 \text{ dB}) - (-25 \text{ dB})}{-6 - (-25)}$$

$$x = 10^{\frac{19}{20}}$$
(1)

$$K'_v = x K_v$$

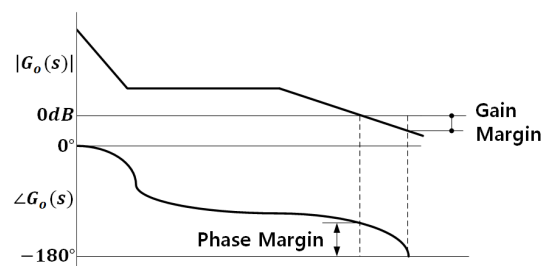


Fig. 5 Bode diagram of open loop transfer function

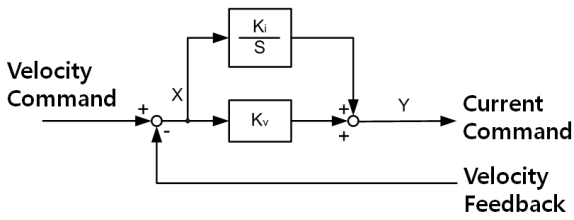


Fig. 6 Block diagram for finding integrational gain

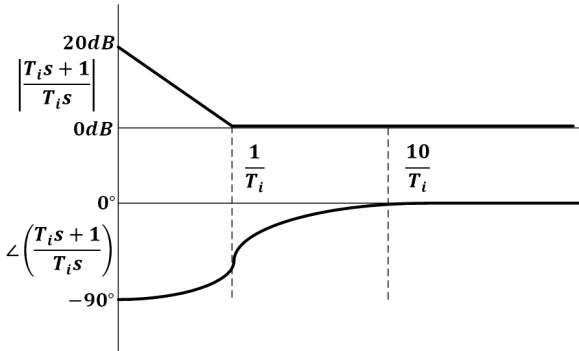


Fig. 7 Bode diagram of open loop transfer function

나. 속도 제어 루프의 적분 시정수 및 적분게인(K_i) 결정

속도루프(Velocity Loop)의 적분 게인은 적분 시정수에 의해 결정되는데 Fig. 6의 블록선도(Block Diagram)를 통해 적분기에 의한 개루프 전달함수를 구할 수 있고 계산된 개루프 전달함수로부터 보드선도의 특성을 알 수 있다^[4].

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

Fig. 6에서 보는 바와 같이 적분기에 의한 개루프 전달함수 $\frac{T_i s + 1}{T_i s}$ 의 보드선도 특성은 게인 교차 주파수(Gain Cross Over Frequency, $1/T_i$)의 10배가 되는 지점에서 위상이 0에 가까워지므로 적분기를 사용하여도 위상여유가 변하지 않도록 위상여유가 계산된 지점의 10배가 되는 지점에 적분기의 시정수가 있도록 한다^[5].

다. 위치 제어 루프의 비례게인(K_p) 결정

속도루프의 비례게인(K_p)을 조정하기 위해 Fig. 8과 같이 추출된 폐루프 전달함수의 보드선도로부터 이득이 -3 dB되는 지점이 위치 제어루프에 유효한 속도제어루프의 대역폭(Bandwidth = Cut-Off Frequency)이 된다.

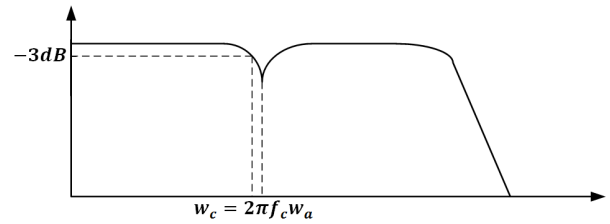


Fig. 8 Bode diagram of closed loop transfer function

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

$$K_p = \frac{\pi f_c}{2\zeta^2} \quad (4)$$

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

여기서 $\zeta\omega = \pi f_c$ 이고, $\omega^2 = 2\pi f_c K_p$ 이므로 위치 제어 루프의 감쇠비(Damping Ratio)인 ζ 가 결정되면 비례게인인 K_p 와 대역폭 f 는 다음 식 (4) 및 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

2.4 동적 특성을 고려한 PID 게인 튜닝

가. 주파수응답기법(Frequency Response Method)

6축 수직 다관절 로봇의 동적 특성을 고려한 최적 PID 게인 튜닝을 위해 본 논문에서는 주파수 응답(frequency response)기법을 이용하였다. 주파수 응답기법은 시스템의 해석과 설계를 위한 실제적이며 효과적인 방법으로, 시스템의 주파수응답은 $Asin(\omega t)$ 와 같이 주파수가 변하는 삼각함수 입력신호에 대한 시스템의 정상상태

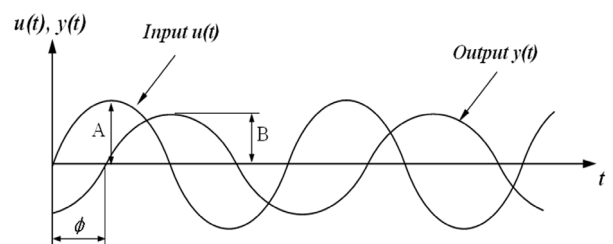
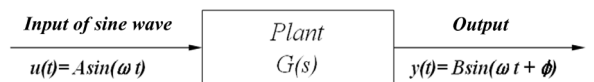


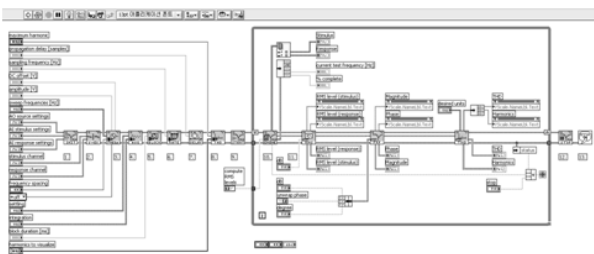
Fig. 9 Frequency response

응답으로 정의된다^[4,8].

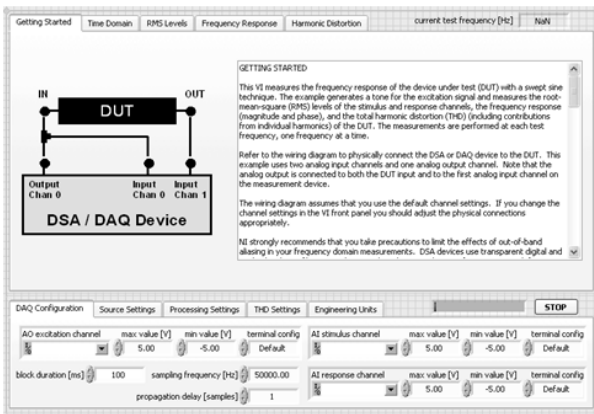
Fig. 9과 같이 $A \sin(\omega t)$ 와 같은 삼각함수가 시스템의 입력신호로 주어졌을 경우, 그에 의한 선형시스템의 출력신호나 시스템 내부의 모든 신호들은 정상상태에서 시스템의 동적 특성에 따라서 $B \sin(\omega t + \phi)$ 와 같이 입력과형에 대하여 진폭의 크기와 위상각이 다른 삼각함수 형태가 된다. 여기서, A 와 ω 는 입력신호의 진폭과 각주파수이며, B 와 ϕ 는 각각 시스템의 출력신호의 진폭과 위상각이다. 이와 같이 실험적으로 결정한 시스템의 주파수응답으로부터 모르는 시스템의 전달함수를 유도할 수 있다. 또한 설계자는 주파수 응답실험을 통해 획득한 전달함수를 이용하여 주파수영역에서 시스템을 설계함으로써 시스템의 대역폭, 또는 원하지 않는 잡음이나 외란에 대한 시스템의 응답의 척도들을 조정할 수 있다^[6].

나. LabVIEW[®]를 이용한 동역학신호분석 프로그램

본 논문에서는 6축 수직다관절로봇의 주파수응답 측정을 위해 LabVIEW[®] Sound and Vibration Toolkit를 이용하여 동역학신호분석기(Dynamic Signal Analyzer, DSA.)를 구현하고 주파수 응답 측정을 통해 6축 수직 다관절 로봇의 전달함수를 보드선도(Bode plot)형태로 변환 후 이를 바탕으로 로봇의 동적 특성을 고려한 최적 게인 동조를 수행하였다^[9].



(a) Block diagram



(b) Front panel

Fig. 10 Graphical programming for gain tuning by using LabVIEW[®]

Fig. 10은 LabVIEW[®]를 이용한 주파수 응답 실험을 위해 프로그래밍한 동역학신호분석기(DSA)를 보여주고 있다. (a)는 블록선도로 주파수가 변하는 Sine 속도 명령 생성하고 속도 명령에 대한 응답을 수집하여 주파수 응답 결과를 분석하고 보드선도(Bode Plot)로 변환해 주는 실제 프로그램이며, (b)는 프론트패널(Front panel)으로써, 유저가 프로그램의 초기 값을 설정하고 실험결과 등을 확인할 수 있는 그래픽 유저 인터페이스이다.

다. 속도 제어 모드 비례게인(K_v) 결정

각축의 게인값은 다른 축의 게인값에 영향을 미치지 때문에 영향을 가장 적게 받는 로봇의 제일 끝단인 6th axis부터 순서대로 튜닝을 한다. 6축(6th axis)에 세팅 되어 있는 속도 루프 비례 게인값으로 개루프(Open Loop)의 보드선도를 추출했을 때 이득여유가 $-6 \text{ dB} \sim -20 \text{ dB}$, 위상여유는 45° 이상인지 확인한다.

이때 모든 축의 적분 시정수 값은 1,000으로 하여 적분 효과를 없앤다. Z축과 LabVIEW[®] DAQ 장비간의 인터페이스를 구성한다. LabVIEW[®] DAQ에서 Source 파형으로 $0.5 \text{ V}_{\text{rms}}$ (root mean square of voltage)의 정현파를 2 Hz에서 500 Hz까지 서보 드라이버의 속도 지령 핀에 인가한다. 그리고 앞에서 프로그래밍 DSA를 이용하여 Fig. 12과 같은 시스템의 페루프의 Bode Plot을 추출할 수 있다.

설정되어 있는 속도 루프 비례 게인 값(K_v)이 이득여유와 위상여유가 만족하는지 판별하기 위해, 추출한 페루프의 보드선도(Bode Plot)를 개루프의 보드선도로 변환 시키는 과정이 필요하며 주파수 응답 측정 후 시스템의 이득과 위상을 획득하는 부분에 적용함으로써 Fig. 12와 같이 Open Loop의 Bode Plot으로 변환된다.

추출된 Open Loop Bode Plot에서 이득여유가 -15 dB , 위상여유는 -93.3 deg 로 판별되었다. 조건에는 만족하나 응답성을 높이기 위해서 식 (1)을 이용하여 이득여유가 -6 dB 에 가까워지게 한다.

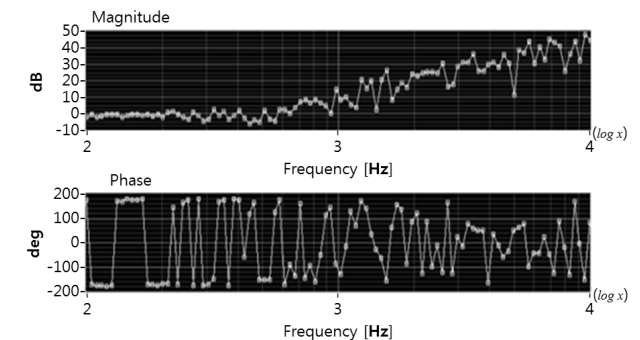


Fig. 11 Bode plot of closed loop transfer function of 6th axis before tuning

$$20\log x = (-6dB) - (-15dB)$$

$$x = 10^{\frac{-6+15}{20}} \tag{6}$$

$$\therefore K'_v = 2.8 \times 50 = 141$$

구해진 K'_v 는 141로, 드라이버에 적용하고 다시 추출한 Open Loop의 Bode Plot은 Fig. 14와 같다. 이득여유가 -8.5 dB, 위상여유가 -116 deg이므로 되어 조건에 만족한다. 따라서 6th axis의 최적 속도 루프의 비례 게인 값(K_v)은 141이다.

같은 방법으로 구한 6축 수직다관절로봇 전축의 최적 K_v 값은 Table 1과 같다.

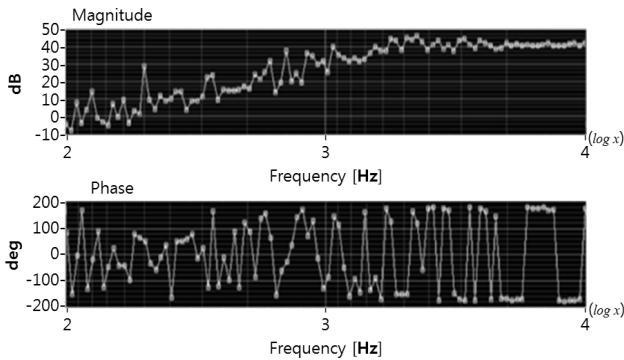


Fig. 12 Bode plot of open loop transfer function of 6th axis before tuning

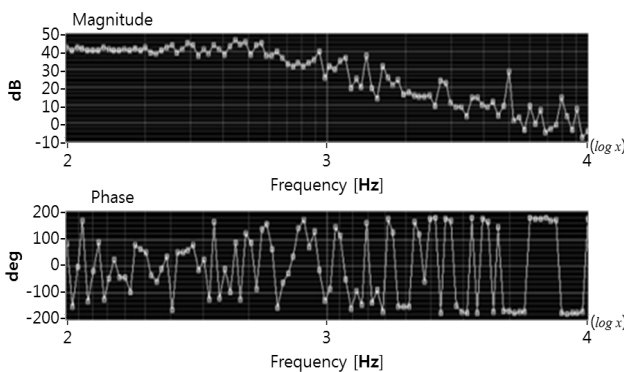


Fig. 13 Bode plot of open loop transfer function of 6th axis before tuning by K'_v

Table 1 Accepted K_v of all axis of RS2

Axis	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
K_v	212	144	182	377	225	141

라. 속도 제어 모드 적분게인(K_i) 결정

속도 제어 모드의 적분게인(K_i)은 적분 시정수에 의해 결정된다. Fig. 6의 블록다이어그램을 통해 적분기에 의한 개루프 전달함수 식은 식 (2)와 같이 구할 수 있으며, 적분 게인은 다음 식 (7)에 의해 유도할 수 있다.

$$K_i = K_v / T_i \tag{7}$$

적분 시정수 (T_i) 역시 끝단인 6th axis Z축부터 튜닝을 시작한다. 앞에서 획득한 로봇의 각 axis속도 루프의 비례 게인 값(K_v)을 적용한 후 적분기를 적용할 때 Phase 변화가 없도록 위상여유 (Phase Margin)의 적용 Hz의 10배 되는 지점을 적분 시정수로 한다.

이와 같은 방법으로 구한 6축 수직다관절로봇 전축의 최적 K_i 값은 Table 2와 같다.

마. 위치 제어 모드 비례 게인 동조

마찬가지로 위치제어루프의 비례게인(K_p)은 끝단인 6축부터 튜닝을 한다. 페루프의 보드선도에서 공진점의 -3 dB되는

지점의 주파수 f_c 를 측정하고, ζ 는 0.707으로, 일반적 산업용 로봇에 대한 실험적 방법으로 구해진 값으로 식 (4)에 대입하여 K_p 값을 구한다.

Fig. 13을 통해서 -3 dB되는 지점의 주파수 f_c 는 각각 1축부터 13.8 Hz, 14 Hz, 243 Hz이며 이를 식 (4)에 적용하면 K_p 값은 아래 Table 3과 같다.

축의 응답성이 다르면 위치 명령에 따른 반응이 다르기 때문에 진원과 직선운동을 할 수 없다. 따라서 명령 추종성을 높이기 위해 K_p 가 가장 작은 4축을 기준으로 모든 축의 K_p 를 통일 시킨다^[5].

이상에서 획득한 동적 특성을 고려한 최적 게인 동조를 구한 각

Table 2 Accepted K_i of all axis of RS2

Axis	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
K_v	212	144	182	377	225	141
T_i	0.673	0.163	0.266	0.623	0.714	0.140
K_i	315	884	683	605	315	1007

Table 3 Accepted K_p of all joint of RS2

Axis	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
f_c	209.29	252.95	252.50	15.75	21.15	311.01
K_p	465	562	561	35	47	691

Table 4 Servo parameter after gain tuning

	Gain margin (dB)	Phase margin (deg.)	K_v	K_i	K_p
1st	-11	-68	212	315	465
2nd	-9.7	-75	144	884	562
3rd	-10.3	-100.4	182	683	561
4th	-16	-46.5	377	605	53
5th	-10.7	-85.9	225	315	47
6th	-8.5	-116	141	1007	691

각의 최적 게인 설정 값들은 Table 4와 같다.

3. SolidWorks®와 LabVIEW®를 연동한 게인튜닝

3.1 SolidWorks®를 이용한 로봇 설정

실험결과를 증명하기 위하여 SolidWorks®와 LabVIEW®를 연동하여 시뮬레이션을 실시한다. 시뮬레이션을 수행하기 위하여 RS2(1/4 사이즈의 연구용 6축 수직다관절로봇)를 SolidWorks®를 이용하여 3D 모델링을 수행한 후 RS2의 실제 구동과 같이 움직일 수 있도록 각 축에 맞게 1축부터 6축 까지 설정한다.

3.2 SolidWorks®와 LabVIEW®를 연동한 시뮬레이션

시뮬레이션을 구현하기 위하여 앞서 실험에서 사용한 LabVIEW® 8.0의 프로그램을 이용하고 SolidWorks®와 연동을 시행한다. 순서는 다음과 같다.

- 1) LabVIEW®에서 SolidWorks®의 3D 모델링한 RS2 로봇을 불러온다.
- 2) LabVIEW® 상에서 가상의 로봇의 각축을 제어하기 위한 6개의 가상의 드라이버를 생성한다.

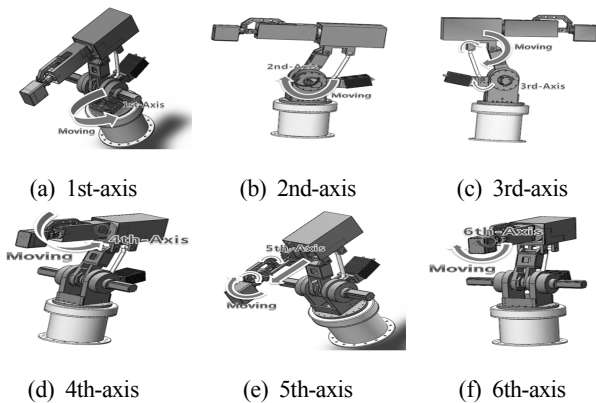


Fig. 14 Set axes of RS2 (6-axis articulated robot)

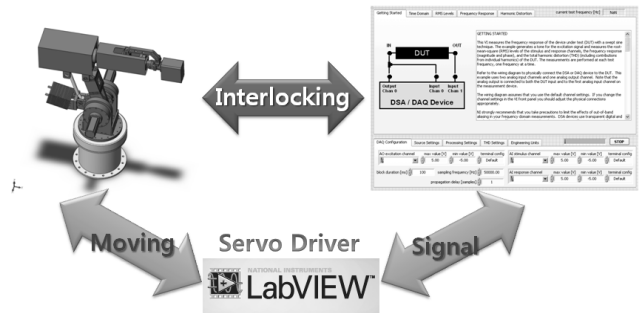


Fig. 15 Interlocking program configuration

- 3) 이전 SolidWorks®에서 설정한 6개의 각 축들을 순서에 맞게 각 가상의 드라이버들과 연결한다.
- 4) LabVIEW® 상에서 생성한 가상의 6개의 드라이버와 SolidWorks®에서 설정한 6개의 축들을 LabVIEW® 프로그램상에서 각각 연결한다.
- 5) 실험에서 계측에 사용한 LabVIEW®의 측정 프로그램을 불러와 각 축과 드라이버를 연결한 LabVIEW® 프로그램상에서 설정 후 실험을 수행한다. 이는 Fig. 2의 서보드라이버를 대신하는 것이다.

설정을 마친 후 시뮬레이션을 수행한다. Fig. 16은 LabVIEW®와 SolidWorks®의 연동을 하기위한 프로그램 구성이다.

3.3 시뮬레이션 결과

아래는 실험과 같은 방법으로 식 (1), (4), (7)을 이용하여, 각 축의 최적 게인값 K_v , K_i , K_p 값을 계산한다. 아래의 Table 5는 각 축의 최적 게인값의 시뮬레이션 결과이다.

3.4 게인 튜닝 실험결과와 시뮬레이션 비교

위 Table 6은 이전에 실험한 RS2의 게인 튜닝 결과와 시뮬레이션 기반의 게인 튜닝의 비교를 나타낸다.

게인 튜닝 실험결과와 게인 튜닝 시뮬레이션의 결과는 5%의 오

Table 5 Servo parameter after gain tuning

Axis	Gain margin (dB)	Phase margin (Degree)	K_v	K_i	K_p
1st	-10.8	-68.2	210	309	471
2nd	-9	-75.5	151	879	580
3rd	-9.3	-98.4	180	679	568
4th	-19	-46.1	364	615	57
5th	-18.7	-85	239	327	49
6th	-9.5	-110	139	1014	700

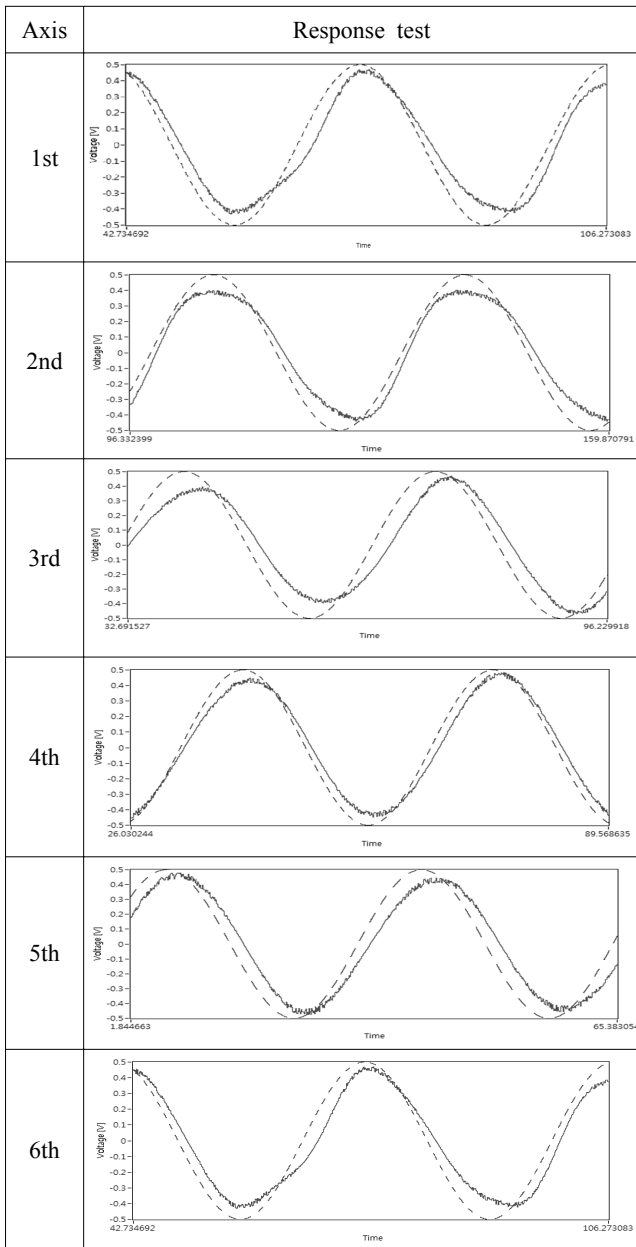


Fig. 16 Response test of experimental and simulation

Table 6 Comparison of experimental and simulation-based gain tuning

	Experimental			Simulation		
	K_v	K_i	K_p	K_v	K_i	K_p
1st	212	315	465	210	309	471
2nd	144	884	562	151	879	580
3rd	182	683	561	180	679	568
4th	377	605	53	364	615	57
5th	225	315	47	239	327	49
6th	141	1007	691	139	1014	700

차 범위 내에 있다는 것을 확인 할 수 있다. 이는 실험과 시뮬레이션 게인 튜닝이 거의 일치한다고 할 수 있으며 게인 튜닝의 실험여건이 되지 않는다면 시뮬레이션으로 실험을 대신하여 게인 튜닝을 할 수 있다고 판단한다.

또한 이 게인 튜닝은 0.5 V_{rms}에서 실험과 시뮬레이션의 응답속도는 위 Fig. 16과 같다. 실선이 RS2의 실제 실험 응답속도이며, 점선이 시뮬레이션 응답속도이다. 실제 실험 응답이 시뮬레이션 보다 응답속도가 조금 느리다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문은 주파수 응답 실험을 통한 동적 특성을 고려한 최적 게인 튜닝 방법을 6축 수직다관절로봇에 적용하여 로봇의 명령 추종성을 향상시키고 기구부 진동을 감소시켜 로봇 성능을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다.

먼저 본 논문에서 제안한 LabVIEW[®]를 이용하여 6축 수직다관절로봇의 게인 튜닝을 수행하였다. 속도 제어 루프에서 비례게인(K_v)과 위치 제어 루프의 비례게인(K_p)을 유도한 후 게인 튜닝을 검증하기 위해 SolidWorks[®]를 이용하여 LabVIEW[®]와 연동한 시뮬레이션을 수행하였다. 6축 수직다관절 로봇의 3D 모델링을 이용하여 LabVIEW[®]를 통한 서보드라이버를 대신 할가의 드라이버를 각 축에 맞게 생성하여 RS2의 3D 모델링을 연동하였다. 이를 통하여 게인 튜닝 실험과 같은 방법으로 LabVIEW[®]의 계측 프로그램을 이용하여 시뮬레이션에서의 측정을 수행하고 비례게인(K_v), 적분게인(K_i), 비례게인(K_p)을 유도하였다.

이를 기반으로 게인 튜닝의 실험 데이터와 시뮬레이션을 비교 검증하였고 0.5 V_{rms}를 인가하여 실제 RS2와 시뮬레이션상의 RS2의 응답속도를 측정하여 실험응답 속도가 시뮬레이션의 응답속도 보다 조금 뒤쳐진다는 것을 확인 하였다. 이는 시뮬레이션이 입력에 대한 출력값이 즉각적으로 반응하는 반면 실제 로봇에서는 약간의 지연이 있으며, 최적적인 값을 적용하여 지연을 최소화한 결과이다.

이를 바탕으로 실제 산업용 6축 수직다관절로봇의 게인 튜닝 실험이 여의치 않는 환경이나 실험이 어려울 때에는 시뮬레이션으로 게인 튜닝을 수행하여 실제 산업용 6축 수직다관절로봇에 적용가능하다는 제시하였다.

후기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0013902).

References

- [1] Kim, H. K., 2007, A Study on Servo Gain Tuning Technique of a 6-Axes Articulated Robot Manipulator Considering Dynamic Characteristics, Master Thesis, Changwon National Univ, Republic of Korea.
- [2] Kim, J. H., 2008, A Study on Optimal Motion Control of LabVIEW®-based 3-axis SCARA Robot, Master Thesis, Changwon National Univ, Republic of Korea.
- [3] Kuo B. C., 1991, Automatic control systems, Prentice-Hall, Inc. 154-156.
- [4] Richard C. D., Robert H. B., 2005, Modern control systems, Prentice-Hall, Inc. 533-567.
- [5] Kuo B. C., Golnaraghi F., 2006, Automatic control systems, WILEY, 485, 630-635
- [6] An J. S., Kim S. M., Lee S. K., 2011, Vibration Compensation due to Spindle Unbalance using An Electro Magnetic Exciter, KSPE (:21) 505-509.
- [7] Lee D. S., Chung W. J., Jang J. H., Kim M. S., 2013, Implementation of LabVIEW®-based Joint-Linear Motion Blending on a Lab-manufactured 6-Axis Articulated Robot (RS2) KSMTE (:22) 318-323.
- [8] Ogata K., 1990, Modern Control Engineering, Prentice-Hall, Inc. 448-467.
- [9] National Instruments 2012, NI-DAQmx Description <<http://www.ni.com/white-paper/3021/en/#toc1>>