LabVIEW® 기반 6축 수직다관절 로봇의 게인 스케줄링 구현 연구

김만수^a, 정원지^{a*}, 김성빈^a

Gain Scheduling in a 6-Axis Articulated Robot Based on LabVIEW®

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received	6	January	2014
Revised	10	April	2014
Accepted	29	April	2014

Keywords:

LabVIEW®

PID(Proportional Integral Derivative) control

Gain scheduling

Gain tuning

Servo parameter

Dynamic signal analyzer

ABSTRACT

Recent years have witnessed a growing demand for a wide variety of high-performance industrial robots. In this paper, for accurate gain tuning of a 6-axis articulated industrial robot with reduced noise, a program routine for a dynamic signal analyzer (DSA) using the frequency response method will be programmed using LabVIEW®. Then, robot transfer functions can be obtained experimentally using the frequency response method with the DSA program. Data from the robot transfer functions are transformed into Bode plots, based on which an optimal gain tuning will be executed. Gain tuning can enhance the response quality of the output signal for a given input signal during real-time control of the robot. The effectiveness of our proposed technique will be verified by implementation with a (lab-manufactured) 6-axis articulated industrial robot (hereinafter called "RS2") and comparison with the zero position gain tuning, as well as other positions.

1. 서 론

1.1 연구배경

현재 로봇 관련 기술과 제어 기법들이 발전함에 따라 로봇의 능력이 크게 향상 되어가고 있으며 몇몇 분야에는 로봇들이 인간들의 능력으로 불가능한 영역까지 작업을 하고 있다. 실제 산업에서는 이러한 산업용 로봇의 활용도가 크게 증가하고 공장 자동화(Factory Automation)에 있어 중요한 비중을 차지하고 있다. 산업용 로봇이 널리 보급되어감으로써 로봇의 제어기법 또한 발전하고 있다. 이 중 PID제어기법이 널리 사용되고 있다. 이는 1936년 영국의 캘린더(Callender)등에 의해 개발되었을 때부터 각종 산업공정에 활발하게 응용되었으며, 오늘날에도 산업현장에서는 이 PID제어기가

주제어기로서 많이 쓰이고 있다.

로봇을 제어 할 때 로봇의 이동 속도가 빠를수록 프로그램에 의해 입력된 경로를 크게 벗어나는 현상이 발생하고, 속도 변화에 따라 기구부의 진동이 발생하게 된다. PID 제어를 사용하는 로봇의 제어 성능을 더욱 향상시키기 위하여 PID 제어 게인 튜닝 기법에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다.

로봇 시스템은 비선형성이 강하므로 제어 파라미터를 이론적으로 계산해내는 것은 매우 어려운 실정이다. 기존에는 Trial and error 방법을 이용하였으나, 게인 튜닝 기법이 도입 되었고, 최근에는 동역학신호분석기(DSA)를 이용하여 로봇의 주파수 응답 측정을 수행하여 로봇의 동적 특성을 파악하고 이를 바탕으로 제어기의 PID 게인 튜닝을 하는 연구가 수행되기도 했다.

* Corresponding author. Tel.: +82-55-213-3624

Fax: +10-55-263-5221

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

Fig. 1 Prototype robot

본 논문에서는 산업용 로봇 중 복잡한 작업의 수행이 가능한 다관절 로봇, 그중에서도 6축 수직다관절 로봇의 제어에 관한 연구를 실시하였다^[1-3].

1.2 연구순서

본 논문에서 사용되는 로봇은 Fig. 1과 같으며 본 실험실에서 연구 목적으로 자체 설계 및 개발한 6축 수직다관절 로봇이다. 설계 기준 프로토타입의 4배 크기에 해당하는 600 kg 이상 급의 가반 하중을 갖는 고 강성, 고 토크 초중량물 로봇이지만, 연구를 목적으로 축소하여 제작 하였다.

6축 수직다관절로봇의 주파수 응답을 측정하기 위해 LabVIEW[®] Sound and Vibration Toolkit을 이용하여 동역학신호분석기(DSA)를 구현하고 주파수 응답 측정을 통해 로봇의 전달함수를 보드선도(Bode Plot)형태로 변환하여 게인튜닝을 실시하였다. 로봇의 주파수 응답을 받기 위해서 NI社의 LabVIEW[®] DAQ Device를 이용하였다. 로봇의 제로포지션에서 각 축의 게인튜닝을 실시한 후 그 이전과의 응답성을 비교하여 응답성향상을 확인하고, 정해진 작업 영역별에서 게인튜닝을 실시해 영역별 최적 게인값을 찾아내는 것이 연구 목적이다.

2. 주파수 응답해석

2.1 로봇의 제어기 구성

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 게인튜닝은 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 게인값을 조정한다. 조정될 서보파라미터(Servo Parameter)는 서보모터드라이버의 속도제어기의 비례게인과 적분게인, 상위의 위치제어기에 있는 비례게인 값들이다.

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

2.2 게인튜닝 과정

속도제어 루프의 비례게인은 동역학신호분석기(DSA)를 속도제어 루프에 연결한 후 임의의 비례게인 값을 설정하고 주파수가 변하는 정현파 속도 명령을 인가하고 그 속도 피드백 값과 비교하여 주파수 응답해석을 통하여 페루프 전달함수의 보드선도를 얻을 수 있다^[6].

페루프의 보드선도는 페루프 전달함수 $G_c(s)$ 와 개루프 전달함수 $G_o(s)$ 사이에 식 (1)과 같은 관계가 존재하므로 추출된 페루프의 보드선도를 이용하여 개루프 보드선도를 구할 수 있다.

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

이와 같은 방법으로 획득한 개루프의 보드선도로부터 Fig. 3와 같이 이득여유(위상 = 180도)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 45도 이상이다^[4]. 이득여유와 위상여유가 최적 범위에 들도록 비례게인을 조정한다. 예를 들어 비례게인이 K_v 일 때 이득여유가 -25 dB이면, 안정영역에는 있지만 응답성을 향상시키기 위해 이득여유(Gain Margin)를 -6 dB이 되도록 새로운 K_v' 을 구한다. 계산식은 식 (2)와 같다.

$$20 \log x = \frac{(-6 \text{ dB}) - (-25 \text{ dB})}{-6 - (-25)} \quad (2)$$

$$x = 10^{\frac{19}{20}}$$

$$K_v' = x K_v$$

속도루프(Velocity Loop)의 적분 게인(K_i)은 적분 시정수에 의해 결정되는데 Fig. 4의 블록선도(Block Diagram)를 통해 적분기

에 의한 개루프 전달함수를 구할 수 있고 계산된 개루프 전달함수 식 (3)으로부터 보드선도의 특성을 알 수 있다.

$$G_{vo} = \frac{Y}{X} = \left(\frac{K_i}{s} + K_v \right) = K_v \left(\frac{\frac{K_v}{K_i}s + 1}{\frac{K_v}{K_i}s} \right) = K_v \left(\frac{T_i s + 1}{T_i s} \right) \quad (3)$$

Fig. 5에서 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^[4].

속도루프의 비례게인(K_p)을 조정하기 위해 Fig. 6과 같이 추출된 폐루프 전달함수 식 (4)의 보드선도로부터 이득이 -3 dB되는 지점이 위치 제어루프에 유효한 속도제어루프의 대역폭(Bandwidth)이 된다.

$$G_p(s) = \frac{\frac{2\pi f_c K_p}{s(s + 2\pi f_c)}}{1 + \frac{2\pi f_c K_p}{s(s + 2\pi f_c)}} = \frac{2\pi f_c K_p}{s^2 + 2\pi f_c s + 2\pi f_c K_p} \quad (4)$$

$$= \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}$$

여기서 $\zeta\omega = \pi f_c$ 이고, $\omega^2 = 2\pi f_c K_p$ 이므로 위치 제어 루프의 감

Fig. 3 Bode diagram of open loop transfer function

Fig. 4 Block diagram for finding integrational gain

Fig. 5 Bode diagram of gain cross over frequency characteristics

Fig. 6 Bode diagram of closed loop transfer function

쇠비(Damping Ratio) 인 ζ 가 결정되면 비례게인 K_p 와 대역폭 f 는 다음 식 (5) 및 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.

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

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{f_c}{2\zeta} \quad (6)$$

2.3 제로포지션 게인튜닝

우선 로봇의 제로포지션에서 주파수 응답을 통해 보드 플롯을 추출 해낸다. 상대적으로 다른축의 게인값에 가장 영향을 적게 받는 로봇 제일 끝단인 6축부터 순서대로 튜닝을 한다.

모든 축의 적분 시정수 값은 1,000으로 하여 적분 효과를 없애고, LabVIEW[®] DAQ Device에서 Source 파형으로 0.5 Vrms (root mean square of voltage)의 정현파를 2 Hz에서 500 Hz까지 서보드라이버의 속도 지령 핀에 인가한다. 그리고 6축에 기본세팅되어있는 속도 루프 비례게인값으로 폐루프(Closed Loop)보드선도를 추출한다. 식 (1)을 통해서 개루프(Open Loop)보드선도로 변환하여 이득여유가 -6 dB~-20 dB, 위상여유는 45 deg 이상인지 확인한다.

Fig. 7의 프로그램을 통해 추출해낸 6축의 각각 폐루프, 개루프 보드선도는 Fig. 8과 같다^[7]. 그림에서 (a)는 개루프 보드선도의 게인값(dB)을 나타내고 (b)는 개루프 보드선도의 위상각(도)을 나타낸다. (c)와 (d)는 각각 폐루프 보드선도의 게인값과 위상각을 나타낸다.

Fig. 7 DSA Programming by using LabVIEW®

Fig. 8 Bode plot of open loop & closed loop transfer function of 6th axis before tuning

추출된 Open Loop Bode Plot에서 이득여유가 -14.4 dB, 위상여유는 52.3 deg로 판별되었다. 조건에는 만족하나 응답성을 높이기 위해서 식 (2)을 이용하여 이득여유가 -6 dB에 가까워지게 한다.

식 (2)을 이용하여 새롭게 구한 K_v' 는 132이다.

속도 제어 모드의 적분게인(K_i)은 적분 시정수에 의해 결정된다. Fig. 4의 블록 다이어그램을 통해 적분기에 의한 개루프 전달함수 식은 식 (3)과 같이 구할 수 있으며, 적분 계인은 다음 식 (7)에 의해 유도할 수 있다.

$$K_i = K_v / T_i \quad (7)$$

적분 시정수(T_i) 역시 끝단인 6축부터 튜닝을 시작한다. 앞에서 획득한 로봇의 각 축의 속도 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 모든 축의 최적

K_i 값은 Table 1과 같다.

마찬가지로 위치제어루프의 비례게인(K_p)은 끝단인 6축부터 튜닝을 한다. 페루프의 보드선도에서 공진점의 -3 dB되는 지점의 주파수 f_c 를 측정하고, ζ 는 일반적 산업용 로봇에 대한 실험적 방법으로 구해진 값 0.707을 식 (5)에 대입하여 K_p 값을 구한다. 제시한 방법을 통해 구한 각 축의 K_v , T_i , K_i , K_p 값은 Table 1과 같다.

Table 1 The result of gain tuning each joint

Axis	state	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
K_v	before	50	50	50	50	50	50
	after	64	82	141	77	89	132
K_i	before	100	100	100	100	100	100
	after	256	713	1698	576	685	763
K_p	before	20	20	20	20	20	20
	after	125	273	379	236	242	182
T_i	after	0.252	0.115	0.083	0.133	0.130	0.172

Fig. 9 Frequency response

Fig. 10 The result of frequency response level

2.4 응답성 확인

게인튜닝 결과를 확인하기 위해 Fig. 9와 같이 주파수응답기법을 이용하였다. 주파수 응답기법은 시스템의 해석과 설계를 위한 실제 적이며 효과적인 방법으로, 시스템의 주파수응답은 $A \sin(\omega t)$ 와 같이 주파수가 변하는 삼각함수 입력신호에 대한 시스템의 정상상태 응답으로 정의된다^[5].

정현파 입력 $\sin$ 곡선에 대해 외란없이 얼마나 입력 곡선과 일치하느냐의 여부에 따라 응답성을 확인 할 수 있다.

아래의 Fig. 10은 각축의 제로포지션에서 게인튜닝 이전과 이후에 응답성을 비교한 것으로 모든 축이 게인튜닝했을 이전보다 이후에 높은 응답성 곡선을 그리는 것을 확인 할 수 있다(점선이 input sine곡선, 실선이 output sine곡선이다.).

3. 작업영역별 게인튜닝

3.1 작업영역 지정

이전 Jung의 연구^[9]에서는 정지된 일정한 지점에서의 게인튜닝만 이루어졌다. SolidWorks[®]를 이용한 시뮬레이션으로 가상의 실험가능성은 입증했지만, 실제 산업에 적용하기위한 작업영역별로 게인튜닝은 이루어지지 못했다. 이번 3장에서는 제로포지션에 대한 게인튜닝값들이 다른 동작에서도 최적운동을 실시하는지 알아보고 영역별 최적 게인값을 도출 해 낼 것이다.

Fig. 11 Coordinated gravity-against motion or robot

Table 2 The result of gain tuning each position

Axis	zero position		A position		B position	
	2nd	3rd	2nd	3rd	2nd	3rd
K_v	82	141	89	223	69	182
K_i	713	1698	824	2468	589	1799
K_p	273	379	291	347	268	311
T_i	0.115	0.083	0.108	0.090	0.117	0.101

아래 Fig. 11과 같이 제로포지션에서 로봇이 중력방향으로 움직이는 A, B 지점에서 가장 처음 구했던 게인값을 적용하고 응답성을 확인해보았다. A지점은 제로포지션 기준으로 2축 joint가 30° 회전했을 때의 위치이고, B지점은 60° 회전했을 때의 위치이다. 회전 각도를 정하는 데는 일정한 기준이 없고, 사용자가 임의로 지정하게 된다. 실제로 로봇이 움직일 때는 2, 3축만이 동작하므로 해당축에 대해 응답성을 확인해보았다.

실험결과, 제로포지션에서 수행했던 게인튜닝 결과값은 일정 각도로 이동 이후에는 응답성 향상에 영향을 주지 않는 것으로 판단되었다.

Fig. 12 The result of frequency response level about zero position

Fig. 13 The result of frequency response level about 2nd, 3rd axis

3.2 작업영역별 게인튜닝

2가지 작업영역별 새로운 게인튜닝을 실시하였다. 게인튜닝 방법은 위 제로포지션에서의 방법과 일치하고, 실제 움직이는 2, 3축에 대한 게인튜닝을 실시해 Table 2와 같이 결과값을 비교하였다.

응답성 그래프를 확인해보니 앞의 Fig. 12와 확연하게 비교되는 Fig. 13의 그래프를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 논문은 LabVIEW[®]를 이용한 동역학신호분석기(DSA)를 구현하고 주파수 응답측정을 통해 로봇의 각 서보모터별 게인튜닝을 실시하며 응답성 향상을 시키는데 목적을 두고 연구를 수행하였다.

서보 게인튜닝을 실시하기 위해 다음 일련의 단계를 거쳤었다.

- (1) 속도제어루프의 K_p 값을 임의로 설정.
- (2) 동역학신호분석기(DSA)의 sin 정현파를 2 Hz에서 500 Hz까지 서보드라이버의 속도 지령 핀에 인가하면서 보드플롯을 추출.
- (3) 동역학신호분석기(DSA)의 사용자 정의 함수 기능을 이용하여 페루프의 보드플롯을 개루프 보드플롯으로 변환.
- (4) 개루프의 보드플롯으로부터 이득여유가 기준치인 -6 dB~-20 dB, 위상여유가 45 deg 이상이 되도록 K_p 를 조정해주면서 (2)의 과정을 반복 수행.

위의 과정을 통해 로봇의 제로포지션에서 게인튜닝 이후의 응답성은 향상되었음을 확인했고, 로봇의 작업영역별 새로운 게인튜닝을 통해 각 지점별 최적 게인값도 구해냈다.

산업용 로봇이 반복 동작으로 이루어지는 작업을 할 때 단기간에는 큰 문제점을 가지지 않지만 장기간 운영을 목표로 설계하는 것이 대부분이기에 로봇의 최적 게인값을 구하는 것은 매우 중요하다. 본 논문에서 제안한 영역별 게인튜닝을 통해서 로봇의 명령 추종성을 향상시킬 수 있고 기구부의 안정성을 향상시킬 수 있다.

위 연구를 바탕으로 향후에 로봇의 작업영역을 쪼개어 그에 적절한 게인값을 구해주고 이를 순차적으로 바꾸는 프로그래밍을 적용한 게인 스케줄링의 구현가능성을 제시하였다.

후 기

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] 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.
- [4] Kuo, B. C., 1991, Automatic control systems, Prentice-Hall, New Jersey.
- [5] Ogata, K., 1990, Modern Control Engineering, Prentice-Hall, New Jersey.
- [6] Haugen, F., 2004, PID control of dynamic systems, Intl specialized book service inc.
- [7] National Instruments., n.d., viewed 22 August 2013, NI-DAQmx Description <<http://www.ni.com/white-paper/3021/en/#toc1>>
- [8] 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 22:2 318-323.
- [9] Jung, C. D., Chung, W. J., Kim, M. S., 2014, Technique for Simulating Gain Tuning SolidWorks[®] and LabVIEW[®] for a Six-axis Articulated Robot, KSMTE 23:1 75-82.