

동적 특성을 고려한 6축 로봇의 서보 파라미터 튜닝에 관한 연구

정원지*, 김효곤⁺, 이춘만⁺⁺, 홍대선⁺⁺, 박승규⁺⁺⁺, 서영교⁺⁺⁺⁺, 이기상⁺⁺⁺⁺⁺

(논문접수일 2006. 11. 10, 심사완료일 2007. 8. 6)

The Study of Servo-Parameter Tuning Technique for 6-Axes Articulated Robot Manipulator in Consideration of Dynamic Characteristics

W. J. Chung*, H. G. Kim⁺, C. M. Lee⁺⁺, D. S. Hong⁺⁺, S. G. Park⁺⁺⁺, Y. G. Seo⁺⁺⁺⁺, G. S. Lee⁺⁺⁺⁺⁺

Abstract

This paper presents a new experimental Servo-Parameter tuning technique for a 6-axes articulated robot manipulator, especially considering robot's dynamics. First of all, investigation for proportional gain of velocity control loop by using a Dynamic Signal Analyzer(DSA) is performed. Using the FUNCTION characteristic of DSA based on the Bode plot, the Bode plot of open loop transfer function can be obtained. In turn, the integral gain of a servo controller can be found out by using the integration time constant extracted from the Bode plot of open loop transfer function. In the meanwhile, the positional gain of the servo controller can be obtained by using the Bode plot of the closed loop transfer function. Using the experimental gain tuning technique proposed in this paper, the testing linear motion of DR6-II robot has been shown to be more accurate rather than the motion with a conventional(empirical) gain tuning technique in Doosan Mecatec Co., Ltd., by improving the dynamic response of the robot as well as synchronizing each joint velocity according to the positional command of an end-effector.

Key Words : Gain Tuning(게인 튜닝), Dynamic Signal Analyzer(동적 신호 분석기), Position Control Loop Tuning(위치 제어 루프 튜닝), Velocity Control Loop Tuning(속도 제어 루프 튜닝), Notch Filter Tuning(노치 필터 튜닝)

* 창원대학교 기계설계공학과 (wjchung@changwon.ac.kr)
주소: 641-773 경남 창원시 사림동 9번지
+ 창원대 기계설계공학과 대학원
++ 창원대 기계설계공학과
+++ 창원대 전기공학과
++++ 두산메카텍(주)
+++++ 엘피시스

1. 서론

최근 산업용 로봇의 수요와 적용 범위의 증가에 따라 산업 전반에 걸쳐 사용되는 로봇은 고성능화가 요구된다. 특히 산업용 6축 수직 다관절 로봇은 전자제품을 조립하는 직교 좌표형 로봇이나 SCARA(Selective Compliance Assembly Robot Arm)로봇과 달리 로봇의 위치와 자세에 따라 기구부의 동적 특성이 크게 변하게 된다.

대부분의 산업용 로봇의 경우 위치제어기는 기능상으로 주제어시스템으로부터 로봇 몸체의 동작명령을 받고, 로봇 몸체의 실제 위치 즉 모터의 실제 위치와의 차이에 대해서 PID(Proportional Integral Derivative) 제어 방법을 적용하여 그 결과를 모터 제어기에 입력하는 기능을 담당한다. PID 게인 튜닝을 통해 정확한 위치 제어는 물론 로봇의 진동 현상을 줄일 수 있다.

로봇의 이동 속도가 빠를수록 프로그램에 의해 교시된 경로를 크게 벗어나는 현상이 발생하고, 속도 변화에 따라 기구부의 진동이 발생한다. 이런 문제점을 해결하기 위해서는 로봇의 동적 특성을 파악하고 제어기의 PID 게인 값을 특성에 맞게 설정하여야 한다. Fig. 1은 게인 튜닝의 효과를 나타내고 있다.

기존의 게인 튜닝 법은 시스템을 모터와 드라이버로 한정지어 튜닝 하기 때문에 로봇의 질량에 따른 동특성과 외란요소를 반영할 수 없다.

본 연구에서 소개하는 게인 튜닝 법은 모터와 드라이버가 로봇에 장착되어진 상태에서, 로봇 각축의 입력과 출력에 대한 비를 보드선도로 추출하여 파라미터를 튜닝하기 때문에 로봇의 질량에 따른 동특성과 외란요소를 반영할 수 있다. 속도 제어 루프의 비례 게인과 적분 시간상수 결정, 위치 제어 루프의 비례 게인, 진동 저감 필터 튜닝, 피드 포워드 필터(Feed-Forward Filter) 튜닝에 대한, 실험적인 튜닝방법에 대해 연구하고 두산메카텍(주)의 DR6-II로봇에 적용하여 본 연구를 검증하였다.



Fig. 1 The effect of gain tuning

2. 서보 파라미터 튜닝

2.1 속도 제어 루프 튜닝

2.1.1 비례 게인 튜닝

로봇의 각 축에 대한, 모터 드라이버의 입력과 출력의 보드 선도를 얻기 위해 동적 신호 분석기(Dynamic Signal Analyzer)를 해당 축의 모터 드라이버에 Fig. 2와 같이 연결한다.

모터 드라이버에 임의의 비례 게인 값을 설정하고 사인파의 진폭 X를 적절하게 선택한 후, 관심 있는 주파수 영역(10Hz~500Hz)내에서의 응답시험을 통하여 페루프 전달함수의 보드 선도를 Fig. 3과 같이 얻을 수 있다.

페루프 전달함수 $G_c(s)$ 와 개루프 전달함수 $G_o(s)$ 사이의 관계는 식 (1)과 같다⁽¹⁾.

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

이 식을 동적 신호 분석기에 함수로 입력하면 페루프 전달함수의 보드선도를 Fig. 4와 같이 개루프 전달함수의 보드선도로 변환 할 수 있다.

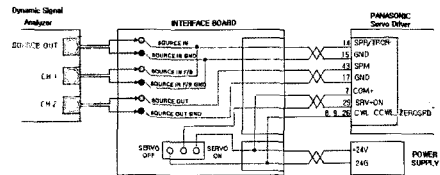


Fig. 2 Hardware schematics of interface board with connectors

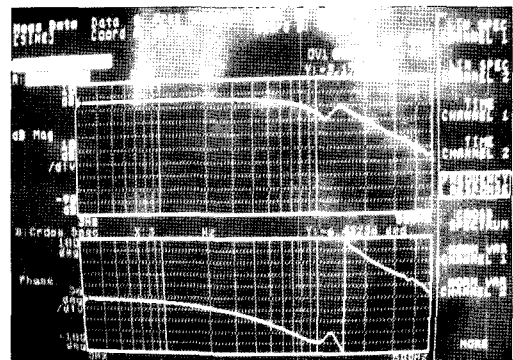


Fig. 3 Bode plot of closed loop of T-axis

Nyquist 안정도를 적용했을 때 개루프 전달함수의 보드선도의 이득여유는 -6dB ~ -20dB, 위상여유는 45deg 이상이 되어야 한다. 그리고 이득여유가 -6dB일 때 응답성이 가장 높다.

DR6-II의 T축에서 속도 제어 루프의 비례 게인, K_v 를 100으로 입력하고 개루프 보드선도를 추출하였을 때, 개루프 보드선도는 이득여유가 -10.178dB, 위상여유는 80.7deg으로 판별되었다. 조건에는 만족하나 응답성을 높이기 위해서 아래의 비례식 (2)를 이용하여 -6dB에 가까워지게 한다. 식 (2)의 첫 번째 식은 보드 선도를 이동시키기 위한 상수값 x 를 구하기 위한 식이다⁽²⁾.

$$20\log x = (-6dB) - (-10dB),$$

$$K'_v = xK_v \quad (2)$$

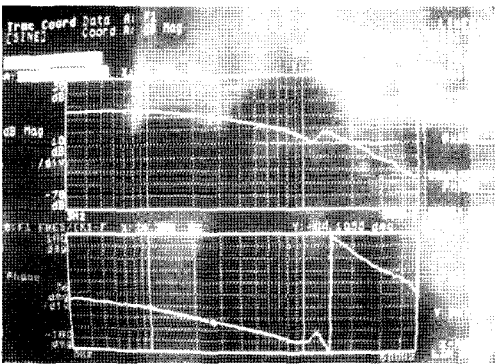


Fig. 4 Bode plot of open loop transfer function of T-axis before tuning

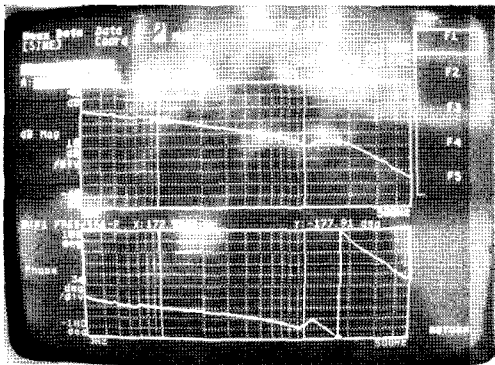


Fig. 5 Bode plot of open loop transfer function of T-axis after tuning

x 를 곱한 비례 게인, 즉 비례 상수 K'_v 는 158의 값으로 계산되어졌다. 구해진 K'_v 을 T축의 모터 드라이버에 적용하고 다시 추출한 개루프의 보드선도는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5의 보드선도에서 동적 신호 분석기의 스크로프를 이동시키면 이득여유와 위상여유를 판별할 수 있는데, 이득여유가 -6.82dB, 위상여유가 51deg으로 판별되었다. 이 값은 이득여유가 -6dB ~ -20dB, 위상여유는 45deg 이상의 조건에 만족한다. 따라서 DR6-II 로봇, T축의 속도 제어 루프 비례 게인 값은 158이 최적 값이다.

2.1.2 적분 시상수 결정

속도 제어 루프의 적분 게인은 적분 시상수에 의해 결정되는데, Fig. 6의 블록선도를 통해 적분기에 의한 개루프 전달함수를 구할 수 있고 계산된 개루프 전달함수로 부터 보드선도 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. 7에서 보는 바와 같이 적분기에 의한 개루프 전달함수의 보드 선도 특성은, Gain Cross Over Frequency($1/T_i$)의 10배가 되는 지점에서 위상(Phase)이 0에 가까워지므로

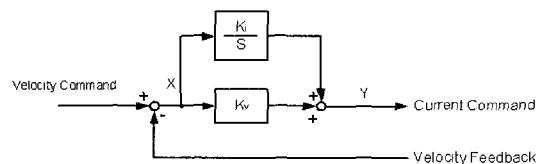


Fig. 6 Block diagram for finding integration time constant

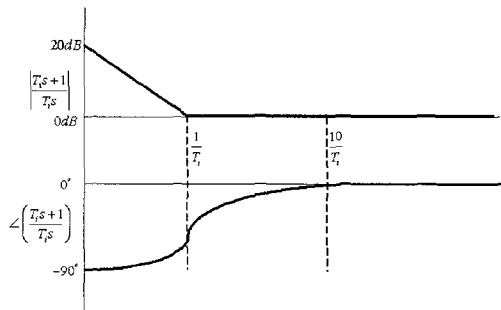


Fig. 7 Bode diagram of open loop transfer function

적분기를 사용하여도 위상여유(Phase Margin)가 변하지 않도록 위상여유가 계산된 지점의 10배가 되는 지점에 적분기의 시상수가 있도록 한다⁽³⁾.

앞서 추출한 T축, 개루프 보드선도 Fig. 5에서 위상여유를 계산한 지점은 0dB일 때의 주파수로, 51.3Hz로 측정하였다. 따라서 적분시상수는 2ms로 계산되어진다.

2.2 위치 제어 루프 튜닝

속도 제어 루프의 비례 게인을 조정하기 위해 추출한 페루프의 보드선도로부터 크기가 -3dB되는 지점이 위치 루프에 유효한 속도루프의 차단주파수 f_c (Cut-Off Frequency)가 된다⁽⁴⁾.

Fig. 8은 기구부 강성이 낮을 경우에 기구부 공진주파수보다 작은 지점이 속도 루프의 차단주파수로 지정되어 지는 것을 나타낸다.

위에서 얻은 속도 루프의 차단주파수, f_c 로 속도 루프의 전달함수를 Fig. 9의 블록선도와 같이 1차 시스템으로 근사화 시킨다. 여기에서 위치 루프의 전달함수를 구하면 식 (4)와 같다.

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

여기서,

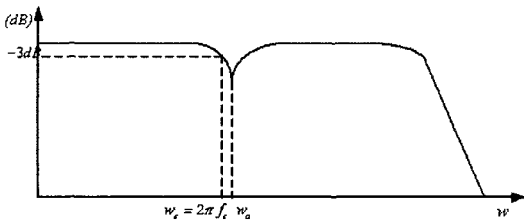


Fig. 8 Bode diagram of closed loop transfer function

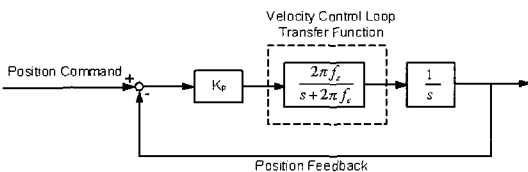


Fig. 9 Block diagram of closed loop transfer function

$$\begin{aligned} \zeta\omega &= \pi f_c \\ \omega^2 &= 2\pi f_c K_p \end{aligned} \quad (5)$$

이므로 위치제어 루프의 감쇠비인 ζ 가 결정되면 비례게인 K_p 와 대역폭 f 는 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{\pi f_c}{2\zeta^2} \\ f &= \frac{\omega}{2\pi} = \frac{f_c}{2\zeta} \end{aligned} \quad (6)$$

T축의 페루프의 보드 선도는 Fig. 10과 같다. 그림에서 공진점의 -3dB되는 지점의 주파수 f_c 는 87.8Hz이다. 식에 적용하면 K_p 값은 276이다. 이와 같이 모든 축에 대한 K_p 값을 구하고, 모든 축의 반응성을 일치시키기 위해 가장 작은 값으로 전 축을 통일 한다.

3. 노치 필터 튜닝

노치 필터 튜닝은 공진 주파수를 상쇄시켜 진동을 저감시

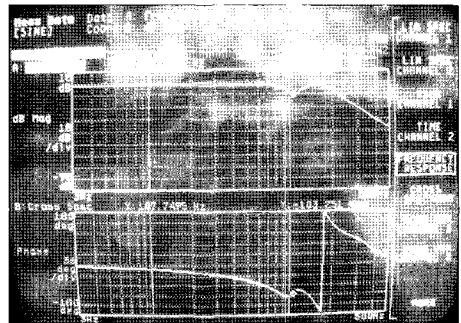


Fig. 10 Bode plot of closed loop of T-axis.

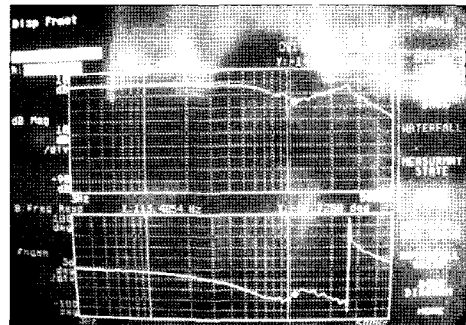


Fig. 11 Bode plot of closed loop of R-axis

키는 필터이다. 공진 주파수는 페루프의 보드선도에서 찾을 수 있다⁽⁶⁾.

마찬가지로 T축부터 파라미터를 튜닝 한다. 근궤적이 안정화 된 상태를 유지할 수 있게 공진주파수에 0.9를 곱한 값이 적용 할 노치 주파수이다. DR6-II, R축의 공진점은 R축의 페루프의 보드선도에서 113Hz으로 구하여진다.

따라서 노치 주파수는 102Hz이다. 노치폭 선택 파라미터는 모터 회전각 90°로 하고 감가속도 시간을 최소로 한 동작

을 구현하여 진동 발생을 최대한 한 다음, 진동을 측정하여 가장 진동이 적게 발생하는 제인 값을 구한다. 노치 필터 튜닝 전의 노치 주파수 무효 값인 -1500Hz, 노치폭 2일 때의 진동 측정결과는 Table 1과 같다⁽⁶⁾.

노치 폭에 대한 R축의 진동 테스트 결과는 Table 2와 같다. 노치 주파수 102Hz, 노치폭 1 일때 Overall 값이 가장 작다. 로봇의 경로 생성 동작 중에 측정한 진동 값이므로 전반적인 진동값을 나타내는 Overall값으로 판단을 하면 R축의 최적 노치 파라미터는 노치 주파수 102Hz, 노치 폭 1이다.

Table 1 Result of vibration experiment of R-axis before notch filter tuning

	ch X	ch Y	ch Z
Overall [RMS]	0.0723	0.2189	0.0271
Peak [RMS]	0.0000407	0.0000375	0.0000276

Table 2 Result of vibration experiment by notch width

Chanel		X	Y	Z
Notch Parameter				
	Notch 주파수: 102Hz 노치폭: 0	Overall [RMS] 0.0751	0.2001	0.0258
	Peak [RMS]	5.10×10^{-5}	3.85×10^{-5}	1.81×10^{-5}
Notch 주파수: 102Hz 노치폭: 1	Overall [RMS]	0.0752	0.1982	0.0256
	Peak [RMS]	6.41×10^{-5}	5.16×10^{-5}	2.50×10^{-5}
Notch 주파수: 102Hz 노치폭: 2	Overall [RMS]	0.0766	0.2056	0.0252
	Peak [RMS]	3.55×10^{-5}	3.24×10^{-5}	1.67×10^{-5}
Notch 주파수: 102Hz 노치폭: 3	Overall [RMS]	0.073	0.216	0.0262
	Peak [RMS]	3.73×10^{-5}	3.88×10^{-5}	1.52×10^{-5}
Notch 주파수: 102Hz 노치폭: 4	Overall [RMS]	0.0705	0.2091	0.0266
	Peak [RMS]	5.31×10^{-5}	3.07×10^{-5}	2.45×10^{-5}

4. 피드 포워드 필터 튜닝

서보 제어시스템의 안정성에 영향을 주지 않으면서 시스템의 응답성을 키울 수 있는 피드-포워드 필터(Feed-forward Filter)를 사용하면 명령 추종 에러를 대폭 줄여 시스템의 응답성을 크게 개선할 수 있다.

통신 프로그램인 ‘PANATERM’을 이용하면 속도 명령 파형과 실제 속도 파형을 확인 할 수 있다. Fig. 12은 T축의 피드-포워드 필터 튜닝 전, 속도 명령 파형과 실제 속도 파형이다. 명령 추종 에러가 발생함을 확인할 수 있다.

적절한 피드-포워드 값을 적용해서 속도 명령 파형과 실제 속도 파형을 일치 시킬 수 있다. 그러나 피드-포워드 필터 튜닝은 오버슈트를 발생시켜 진동을 발생시킨다. 피드-포워드 필터 시상수(Feed forward filter time constant)를 적용하면 오버슈트를 감소시킬 수 있다⁽⁷⁾.

모터 회전각 90°로 하고 가감속도 시간을 최소로 한 동작을 구현하여 진동 발생을 최대한 한 다음, 진동을 측정하여 가장 진동이 적게 발생하는 피드-포워드 필터 시상수 값을 구한다. T축에서 속도 명령 파형과 실제 속도 파형을 일치시키고 로봇의 진동을 가장 적게 하는, T축의 피드-포워드 값은 80이고 피드-포워드 필터 시상수 값은 1500이다.

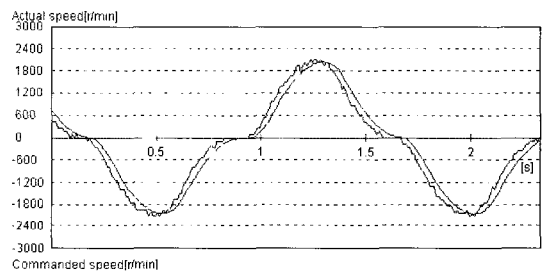


Fig. 12 Wave form graphic of T-Axis before feed-forward filter tuning

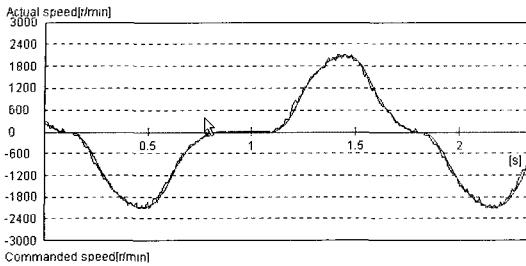


Fig. 13 Wave form graphic of T-Axis after feed-forward filter tuning

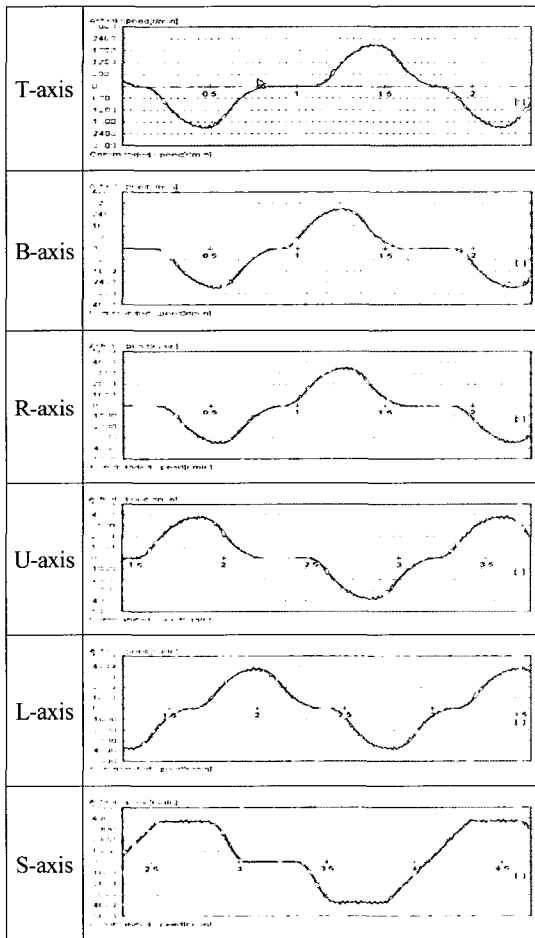


Fig. 14 Wave form graphic of all axis after gain tuning

피드-포워드 필터 튜닝 후의 속도 명령 파형과 실제 속도 파형은 Fig. 13과 같다. 속도 명령 파형과 실제 속도 파형이 일치되었음을 확인 할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 동적 특성을 고려한 게인 튜닝 기법에 대한 것으로 다축 동기 제어를 고려한 각 축의 최적 게인 값의 도출 방법과 진동 저감 필터인 노치필터의 최적 파라미터 도출법에 대해 이론과 실험적인 방법으로 접근하였다. 모터와 드라이버가 로봇에 장착되어진 상태에서, 로봇 각축의 입력과 출력에 대한 비를 보드선도로 추출하여 파라미터를 튜닝하였기 때문에, 로봇의 질량에 따른 동특성과 외란요소가 반영 되었다. 게인 튜닝 적용결과는 Fig. 14와 같다.

- (1) 비례 게인 튜닝으로 응답성을 향상시키고 적분상수 튜닝으로 오프셋(Off-set)을 제거하였다.
- (2) 피드-포워드 필터 튜닝으로 두 파형의 시간 지연을 제거하였다.
- (3) 최종적으로 제어기에서 DR6의 각축에 전달되는 속도 명령 파형과 실제 속도 파형의 모양을 일치 시켰다.

후기

이 논문은 2006년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었습니다. 본 연구는 창원대학교 공작기계기술 연구센터 지원으로 수행된 연구결과임을 밝힙니다.

참고 문헌

- (1) Kuo, B. C., 1991, *Automatic control systems*, Prentice-Hall, Inc., pp. 747~762.
- (2) Ogata, K., 1990, *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall, Inc., pp. 448~467.
- (3) Shinnars, S. M., 1992, *Modern Control system theory and design*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 240~248.
- (4) Haugen, F., 2004, *PID control of dynamic systems*, Intl specialized book service Inc., pp. 342~349.
- (5) Lau, C. Y., 1980, "A digitally tuned notch filter," *Hewlett-Packard Journal*, Vol. 31, No. 8, pp. 14~15.
- (6) Kim, T. H. and Jeong, S. H., 2001, "A Study on Control Characteristics of Translation System Using PD Control and LQR," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 10, No. 5, pp. 78~84.
- (7) An, J. S., Kim, S. M. and Lee, S. K., 2001, "Vibration Compensation due to Spindle Unbalance using An Electro Magnetic Exciter," *Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21, pp. 505~509.