

다관절 로봇을 이용한 3차원 곡면가공 방안에 관한 연구[§]

정창욱^{*†} · 노태양^{*}

* 현대중공업 산업기술연구소

Study on Three-Dimensional Curved-Surface Machining Using Industrial Articulated Robot

Changwook Jung^{*†} and Taeyang Noh^{*}

* Industrial Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

(Received December 20, 2010 ; Revised June 28, 2011 ; Accepted July 11, 2011)

Key Words : Articulated Robot(다관절 로봇), Curved Surface(곡면), Machining(가공), Laser Displacement Sensor(레이저변위센서), Teaching Point(교시점)

초록: 본 연구에서는 산업용 다관절 로봇을 이용한 3 차원 곡면가공 방안에 대하여 연구하였다. 가반중량이 큰 산업용 로봇의 경우 반복위치정밀도가 높지 않아 위치오차와 가공 깊이 방향 오차를 발생시키며, 본 연구에서는 레이저 변위센서를 이용하여 이를 보정하는 방법을 제시하였다. 로봇교시 포인트의 수를 줄이기 위하여 가공면의 특이점들만을 이용하여 곡면 가공이 가능하도록 로봇 궤적을 생성하는 방안을 연구하였다. 본 연구에서는 실제 산업용 로봇을 이용하여 가공시험을 수행하였다. 회전수, 가공각도, 가공깊이, 가공속도 등의 가공조건을 변경해가며, 표면조도, 실제 가공깊이, 진동 및 소음 발생에 대한 시험을 수행하여 적용 가능한 가공조건을 도출하였다.

Abstract: NC machines are generally used for machining operations because of their position accuracy, path accuracy, and machining reaction force. However, some NC machines require a very large space and are expensive. Recently, industrial articulated robot arms with large handling capability and wrist torque have been developed and the corresponding sensor technology has been improved. A machining robot for three-dimensional large curved objects was developed on the basis of an automatic-path-generation method. A self-position-compensation method with a laser displacement sensor was adopted for the six-axis robot developed, because the large articulated robot arms had poor position accuracy. An automatic-path-generation method using specific points was adopted to reduce the number of teaching points and time. In order to determine the proper machining conditions, various machining conditions such as tool rotation speed, cutting angle, cutting depth, and tool moving speed, were evaluated.

1. 서론

본 연구에서는 산업용 다관절 로봇을 이용한 3차원 곡면가공 방안에 대하여 연구하였다. 일반적으로 3차원 곡면 가공은 위치 및 궤적 정밀도와 가공 반력에 대응하는 가공 정밀도의 요구로 전용 NC 장비를 적용하는 것이 일반적이다. 그러나 이러한 전용 NC 장비의 경우

규모가 크고 가격이 매우 높다는 문제를 가지고 있다. 최근 가반중량 및 손목축 토오크가 큰 산업용 다관절 로봇들이 개발되었고, 각종 센서 기술이 발전함에 따라 다관절 로봇과 센서를 이용한 3차원 곡면가공 방안을 연구하였다.

가반중량이 큰 핸들링용 로봇은 반복위치 정밀도가 높지 않아 위치오차와 가공 깊이 방향 오차를 발생시키며, 본 연구에서는 레이저 변위 센서를 이용하여 이를 보정하는 방법을 제시하였다. 또한 로봇교시 포인트의 수를 줄이기 위하여 가공면의 특이점들만을 이용하여 곡면 가공이 가능하도록 로봇 궤적을 생성하는 방안을 연구하였다.

[§] 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

[†] Corresponding Author, cwjung@hhi.co.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

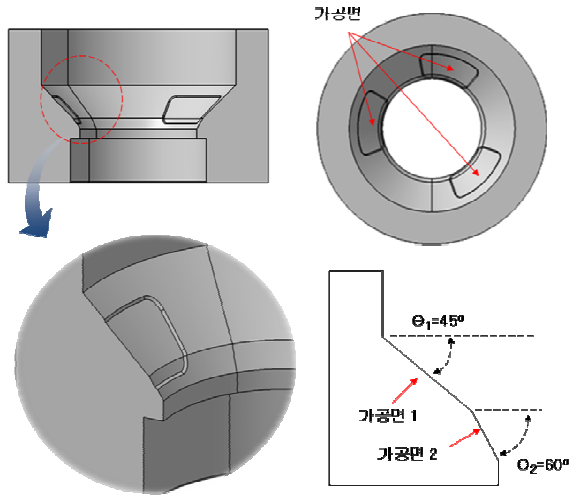


Fig. 1 Configuration of the machining object

본 연구에서는 실제 산업용 로봇을 이용하여 가공시험을 수행하였다. 회전수, 가공각도, 가공깊이, 가공속도 등의 가공조건을 변경해가며, 표면조도, 실제 가공깊이, 진동 및 소음 발생에 대한 시험을 수행하여 적용 가능한 가공조건을 도출하였다.

Fig. 1에 본 연구에서 다룬 가공 대상물의 형상을 나타내었다.

가공 대상물은 원통형의 구조물로서 Fig. 1에서 보는 것과 같이 내부에 3개의 가공이 필요한 가공면이 존재한다. 가공면은 45° 경사면과 60° 경사면으로 구성되며, 원통형 구조물 내부 원주 표면을 따라 일정 깊이 가공을 수행하게 되므로 가공면은 3차원적인 형상으로 존재하게 된다.

다양한 형상과 크기를 가지는 원통형 구조물 내면의 가공면 가공을 위해 본 연구에서는 산업용 로봇을 적용하여 자동화 하였다. 3차원 표면 가공의 자동화를 위하여 1개의 레이저 변위 센서가 사용되었으며, 가공을 위해서 툴을 장착할 수 있는 고주파 스피들이 적용되었다. 가공 대상이 되는 부재의 형상에 대한 CAD데이터 정보를 이용하여 가공 궤적을 자동으로 생성하고, 생성된 궤적으로 전체 경로(global path)를 따라 로봇이 작업을 수행한다. 이때 가공 시 발생하는 오차를 보정하기 위해 레이저 변위 센서를 이용하여 지역 경로(local path)를 보정하도록 하였다.

2. 로봇 시스템

2.1 로봇 시스템의 구성

본 연구에서 적용된 로봇은 현대중공업(주)에서

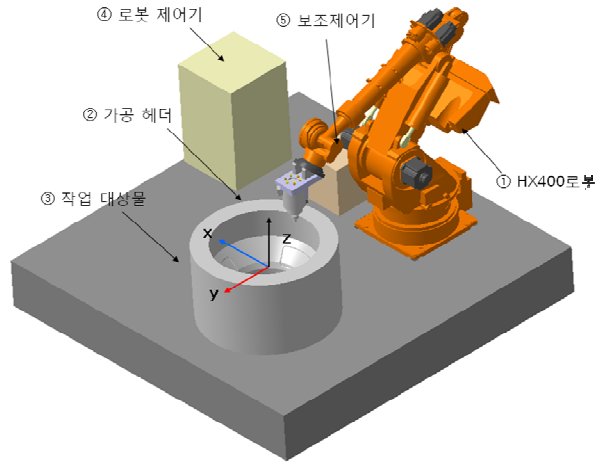


Fig. 2 Machining robot system

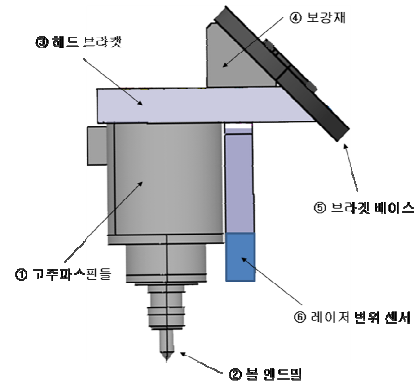


Fig. 3 Tool head composition and the sensor arrangement

생산하는 HX400로봇으로서 400kg의 가반 하중을 가진다. 로봇의 자중은 약2,000kg이고, 로봇 시스템의 구성을 Fig. 2에 나타내었다.

로봇 시스템은 로봇(HX400), 로봇 제어기, 가공 헤더, 작업 대상물 그리고 보조제어기로 구성되었다. 로봇 제어기는 로봇의 가공 궤적 생성 및 보정 그리고 가공 조건 반영을 위한 메인 제어기 역할을 담당하며, 스피들의 구동, 냉각수 그리고 레이저 변위 센서의 신호처리를 위한 보조 제어기가 설치되었다.

2.2 가공 헤드 및 센서 배치

가공 및 센싱을 위한 가공 헤드는 고주파 스피들, 툴(볼 엔드밀), 헤더 브라켓, 브라켓 베이스, 보강재 그리고 레이저 변위 센서로 구성되었다. Fig. 3에 가공 헤드의 구성을 나타내었다. 가공을 위한 고주파 스피들은 최대 6,000rpm의 회전속도와 최대 15.2Nm의 토크를 가진다. 작업 대상물의 중심축의 위치 보정과 내면에서의 가공 정밀도

Table 1 Specifications of spindle & laser distance sensor

Spindle		Laser Distance Sensor	
Torque	15.2Nm	Range	50~350mm
RPM	600rpm	Resolution	0.1mm
Power	8kW	Error	0.05mm
Dimension	Φ 200 × 400	Dimension	40 × 50 × 13.4
Company	LCM	Company	Baumer

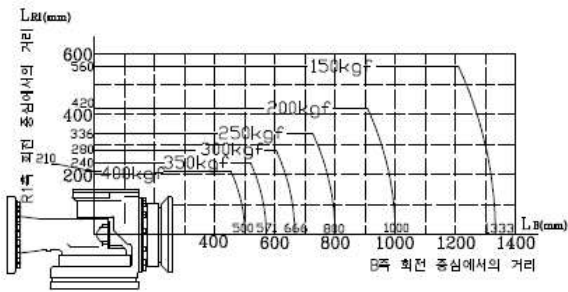


Fig. 4 Torque diagram for robot's wrist axis

보정을 위해 적용된 레이저 센서는 50~350mm의 측정 범위를 가지며, 측정 영역을 사용자가 설정할 수 있다. 정밀도 0.1mm를 기준으로 사용하였으며, 공구중심의 끝부분과 레이저 측정점과의 거리는 118mm이다. 본 시스템에서 적용된 스피들과 레이저 변위 센서의 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

6축 다관절 로봇을 이용한 가공작업에서는 로봇 손목축의 강성이 중요하다. 가공 헤드의 무게와 가공 속도, 가공 깊이를 고려한 가공 반력을 합쳐서 약 200kgf 수준이며, B축(제5축 밴딩축) 회전중심에서 600mm, R1축(제6축 회전축) 회전중심에서의 거리가 200mm 이하이므로 Fig. 4와 같이 로봇이 허용하는 손목축 토크 범위에 안정적으로 포함된다.

2.3 제어 시스템 구성

전체 제어 시스템 구성은 Fig. 5와 같이 로봇 제어기를 메인 제어기로 사용하고 전체 가공 궤적 및 판단을 위한 명령을 담당하게 된다. 스피들 구동을 위한 인버터와 냉각펌프가 스피들과 연결이 되며, 레이저 변위 센서는 A/D 변환을 통해서 RS232C 통신으로 데이터를 메인 제어기와 주고 받도록 하였다. 또한 센서 값의 확인을 위해

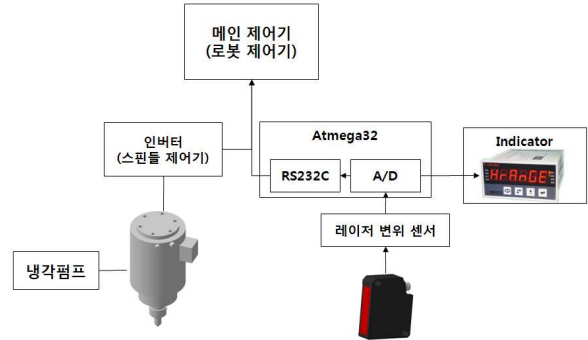


Fig. 5 Control units composition of the system

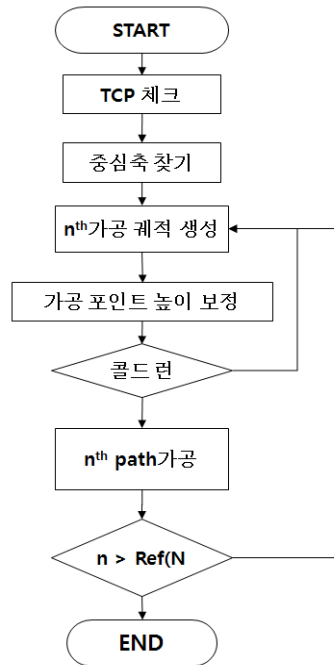


Fig. 6 Overall sequence flow chart of the system

외부에 인디케이터를 별도로 장착하였다.

가공 프로세스의 전체 흐름도를 Fig. 6에 나타내었다. 먼저 로봇의 TCP(Tool Center Point)가 기준 값 이내에서 만족하는지를 체크하는 과정을 거친다. 이 과정에서 가공 대상물과 로봇의 좌표계의 수평도가 기준 값 이내에 있는지를 동시에 체크하게 된다. TCP체크 과정이 끝나면 가공 대상물의 중심축이 CAD 데이터로부터 계산된 좌표와 일치하는지 확인 및 보정과정을 거친다.

그리고 계산된 n번째 궤적으로 로봇이 이동하게 되고 가공 높이를 보정하게 된다. n번째 궤적 보정 후 콜드런(Cold run)을 통해 이상이 없는 경우 가공을 시작하게 된다. 이렇게 n회의 반복을 통해 전체 가공 궤적에 대한 보정과 가공을 완료하면

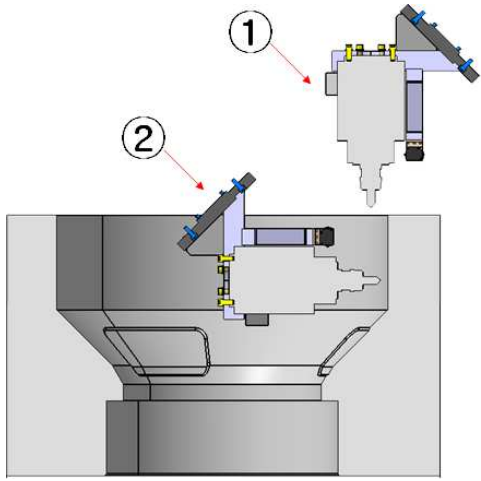


Fig. 7 Center finding position between the robot & work

작업이 끝나게 된다.

3. 궤적 생성 및 가공 프로그래밍

3.1 중심축 찾기

로봇과 가공 대상물의 중심축간 거리는 CAD 데이터로부터 입력 받아 계산하여 전체 궤적 생성에 사용한다.

이때, 로봇이 가지는 오차와 로봇과 가공 대상물과의 셋팅 오차 등을 감안하여 실제 중심축의 위치를 레이저 센서를 이용하여 보정해야 한다. 중심축 찾기에서의 로봇과 가공 대상물과의 자세를 Fig. 7에 나타내었다. ②자세의 경우 내경이 작은 작업 대상물의 경우 불가능하다. 따라서 ①의 자세를 이용하여 중심축 찾기를 실행하였다. 이 경우는 레이저 센서의 거리 값을 직접 이용하지 못하고 이분법(bisection method)을 이용하여 경계점을 찾아가는 방법을 적용하였다.

Fig. 9에 나타난 것과 같이 작업 대상물의 내면을 기준으로 4개의 포인트를 선정하고 4개의 포인트의 위치를 이분법으로 찾아내고 이를 통해 원의 중심점을 찾아낸다. 측정을 시작한 기준 포인트를 생성하기 위한 중심 좌표는 CAD데이터로부터 획득할 수 있으며, Fig. 8의 기준점 P_c 로부터 P_1 으로의 반경 벡터를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R_1 = P_c + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -r_{cylinder} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $r_{cylinder}$ 은 가공 대상물의 내경이다.

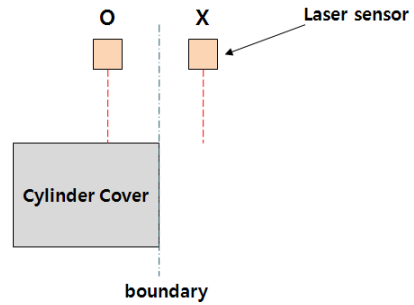


Fig. 8 Center finding by bisection method

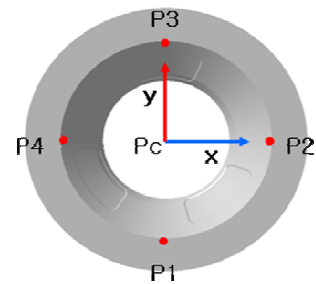


Fig. 9 Reference points for center finding

$$R_{i+1} = A_\theta R_i \quad i = 2, 3, 4 \quad (2)$$

$$\text{where } A_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, θ 는 z축을 기준으로 반시계 방향으로 측정된 각도를 말한다. 식 (2)와 같이 반경벡터를 변환하여 중심점 P_c 를 더하여 측정 위치 좌표를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$P_i = P_c + R_i \quad (4)$$

식 (4)와 같이 계산된 4개의 측정 기준 포인트에서 개별적으로 이분법을 적용하여 새로운 P_i 를 생성하고 이렇게 보정된 P_i 를 이용하여 다음과 같이 보정된 중심점을 찾을 수 있다.

$$P_c = \begin{bmatrix} 0.5(P_2 + P_4) \\ 0.5(P_1 + P_3) \\ z \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, z 는 중심점의 좌표를 그대로 사용한다.

3.2 가공 궤적의 생성

Fig. 10에 나타난 것과 같이 가공 형상은 부채꼴

모양을 하고 있으며, 가공 대상물의 모델에 따라서 G1부터 G3까지 2~3개의 가공면이 존재한다. 또한 개별 가공면의 위치 및 형상 데이터($\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, r_1, r_2$)는 CAD데이터로부터 주어진다. 이때, 개별 가공면 G_i 의 가공 시작 위치 P1은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_1 = A_{\theta_1} R_1 \quad (6)$$

여기서, 식 (6)의 좌변의 R1은 P_c 으로부터 P1까지의 반경벡터이고, 우변의 R1은 식 (1)로부터 구할 수 있다.

$$P_i = P_c + R_i \quad i = 2, 3 \quad (7)$$

$$\text{where } R_i = A_{\phi/2} R_{i-1} \quad (8)$$

Fig. 11에 나타난 것과 같이 곡선 가공 궤적을 형성하기 위해서는 3개의 포인트가 필요하며, 식 (7)과 같이 P2와 P3를 계산할 수 있다.

개별 가공면(G_i)의 1차 가공 궤적 P1-P2-P3를 가공한 이후 P3에서 P_c 를 향하는 방향으로 지정된 간격(d)에 해당하는 만큼 시프트 시켜서 P6를 생성한다. 같은 방법으로 P2→P5, P1→P4를 생성시킬 수 있다. 이러한 방법으로 반경 r2에 해당하는 위치까지의 가공궤적을 모두 완성할 수 있다.

P1에서 P6까지 6개 지점이 생성되면, 레이저 변위센서를 이용하여 각 지점에 대한 높이오차를

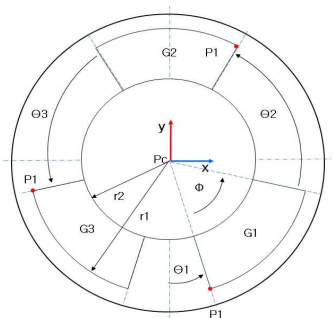


Fig. 10 Machining path configuration

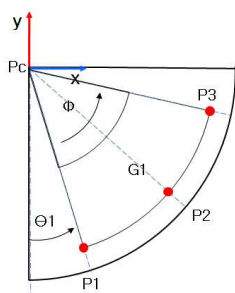


Fig. 11 Machining path configuration of each surface

보정하게 된다. 이 보정 과정을 통해 부재의 셋팅 오차, 로봇의 TCP오차 등을 제거할 수 있다. 6개 지점 사이의 내부 경유점들은 로봇 제어기에서 자동 계산 처리되므로 궤적 전체를 보정할 필요는 없다.

4. 가공 테스트 결과

가공테스트를 통해 가공 면에 대해서 틀이 수직인 자세로 가공하는 것보다 Fig. 12과 같이 가공진행 방향으로 드래그(drag) 자세가 되도록 각도 ψ 를 이루는 것이 가공 부하를 줄이는데 유리하였다. 이것은 본 연구에서 적용한 가공툴이 인서트 타입 가공팁을 사용하고 있어 각도를 가질 때 가공면에 접촉성이 좋아지기 때문이다. 가공 테스트 결과를 Table 2에 나타내었다.

가공 테스트 조건으로는 각도 ψ , 가공 깊이, 가공 속도를 구분하였으며, 테스트 항목으로서 표면조도, 가공 깊이, 진동/소음을 기준으로

Table 2 Machining test results

테스트 조건			테스트 결과		
가공 각도	가공 깊이	가공 속도	표면 조도	가공 깊이	진동 소음
deg	mm	mm/sec	상중하	상중하	상중하
0	3	2	나쁨	부족	과다
		5	보통	부족	과다
		10	보통	보통	과다
15	2	2	나쁨	부족	보통
		5	우수	양호	적음
		10	우수	양호	적음
	4	2	나쁨	부족	과다
		5	나쁨	부족	보통
		10	나쁨	부족	보통
20	2	2	나쁨	부족	과다
		5	보통	보통	보통
		10	보통	보통	과다

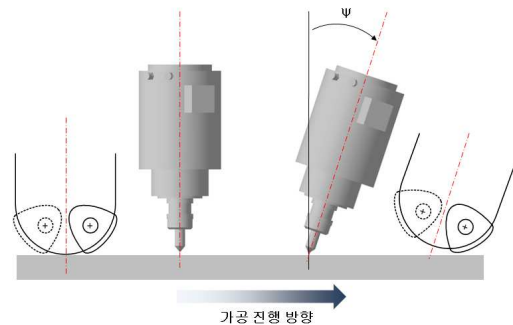


Fig. 12 Machining angle for the reducing machining load



Fig. 13 Machining test result

하였다. 테스트 결과는 정량적 측정이 어려워 상대적인 비교로 평가하였다. Table 2의 결과에 따라서 가공 조건은 가공 각도 15도에서 가공 깊이 2mm, 가공 속도 5mm/sec 또는 10mm/sec가 적합하다. Fig. 13은 실제 가공된 면을 보여준다.

5. 결론

본 연구에서는 원통형 부재의 내면에 존재하는 3차원 형상의 가공면의 가공을 자동화하기 위한 로봇시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 산업용 로봇과, 레이저 변위센서 신호처리를 위한 보조제어기 그리고 가공 궤적 및 보정을 위한 주제어기로 구성되었다. 본 시스템은 가공 대상물의 형상데이터로부터 자동으로 가공 궤적을 형성하고, 레이저 변위센서를 이용하여 형상 데이터를 보정하고 생성된 가공 궤적을 보정하여 가공을 완성한

다. 또한 가공 테스트를 통해 제품을 가공하기에 적합한 가공 조건을 찾아 적용하였다.

참고문헌

- (1) Noh, T.-y. Lee, Y.-s. Jung, C.-w. and Oh, Y.-c., 2009, "Development of a Grinding Robot System for the Engine Cylinder Liner's Oil Groove" *Trans. Of the KSME(A)*, Vol. 33, No. 6, pp. 614~619.
- (2) Jung, C.W., Lee, Y.S., Kim, J.G., Jeon, D.J., Kim, J.O. and Park, J.W., 2007, "Development Of Off-Line-Programming System For Automatic Propeller Grinding Robot System," *ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress And Exposition (IMECE2007)*, Paper No. IMECE2007-41755 pp. 807~811.
- (3) Park, J.-W., Lee, J.-G. and Jun, C.-S., 2009, "Near net-shape five-axis face milling of marine propellers," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 4, pp. 5~12.
- (4) Shin, Y.H., Park, J.H. and Jeong, Y.C., 2003, "Mold Machining Simulation Using DVM and Z-Map Complex Model," *Journal of Korean Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 20, No. 5, pp. 47~56.
- (5) Nikravesh, P. E., 1988, "Computer Aided Analysis of Mechanical Systems," *Prentice Hall*, , pp. 347~352.
- (6) Hyundai Heavy Industry Co. Ltd., 2001, "Hi4a Controller Manual," *Hyundai Heavy Industry*, pp. 11-1~11-20.
- (7) Kim, J., 2001, "Control System Design," *Chungmungak*, pp. 518~561.