

공작기계의 선형경로에 대한 오차모델을 이용한 제어기 설계

길형균*, 이건복†

A Controller Design Using Error Model for Line Type Paths in Machine Tool

Hyeong-Gyeun Gil*, Gun-Bok Lee†

Abstract

The work presented here deals with controller design using error model constructed with proportional control ramp response. The design aims at the improvement of transient response, steady-state error reduction with stability preservation, generation of the consistent contour error through the proportional gain regulation of a mismatched system. The first step is to generate tracking-error curve with proportional control only and decide the added error signal shape on the error curve. The next is to construct a table for the steady-state loop gain with step input. The table is used for selecting the proportional gain. The effectiveness of the proposed controller is confirmed through the simulation and experiment.

Key Words : Error Model(오차모델), Ramp Response(경사응답), Contour Error(윤곽오차), Steady-state gain(정상상태 게인)

1. 서론

본 논문은 CNC 밀링머신의 이송장치와 같이 직교하는 2축의 독립된 동작에 의하여 하나의 통합된 경로추적 운동을 통하여 정해진 위치를 추적하도록 하는 시스템의 위치제어에 관한 것이다. 기존의 많은 연구는 각축을 독립적으로 제어하여 각각의 지령경로에 대한 추적성능을 향상 시킴으로써 통합된 운동경로의 위치 추적성을 높이는 방식으로 진행되었으며, 추적성능과는 무관하게 가공면의

윤곽오차를 정의하여 그 오차량을 최소화하는 방식인 윤곽제어⁽¹⁾에 대한 연구를 수행하였다. 위치제어 방식으로 비례제어를 채택하였을 경우에 대하여, 이 두 제어방식 모두는 비례게인 값에 의존하게 되며, 게인 선정은 양 축의 비대칭성을 고려하여 결정하게 된다. 윤곽오차량의 크기의 관점에서 비례제어 방식은 비례게인의 설정에 따른 오차량이 발생하게 되지만, 윤곽제어방식은 윤곽오차가 항상 0 으로 수렴하도록 부가적인 제어입력을 작용시키기 때문에 더욱 안정적인 결과를 가져오게 된다. 하지만 두 방식 모두는

* 길형균, 숭실대학교 기계공학과 (waycon67@empal.com)
주소: 156-743 서울시 동작구 상도5동 1

† 숭실대 기계공학과

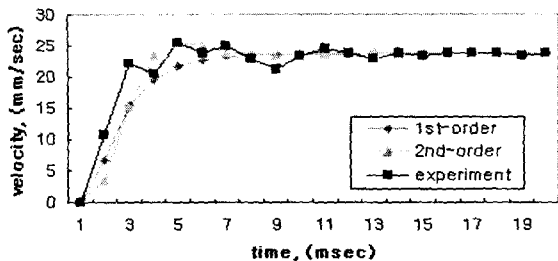


Fig. 1. Step response to system and 1st, 2nd-order approximated model

추적성능은 만족스럽지 못하기 때문에 부가적인 제어입력을 요구한다. 반면에 추적성능 향상을 위한 비례적분제어 방식의 사용은 절삭가공 분야의 특성상 위치의 오버슈트가 발생해서는 안되는 경우가 많은 문제로 인하여 그 사용은 제한적일 수 밖에 없다⁽²⁾. 이러한 문제들의 대안으로써 본 연구에서는 비례제어에 기초하여 추적성능의 향상을 통한 위치정밀성을 향상시킬 수 있는 실용적 방법을 제안하고, 직선형태의 기준경로에 대한 적용방법을 제시한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제어대상에 대한 시스템 모델링 및 시스템 특성을 기술하고, 3장에서는 비례제어와 비례적분제어에 대한 차이점을 설명한다. 4장은 제안하는 제어기 설계 방법 및 제어설정에 대하여 기술하고, 5장에서 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안된 방법의 유효성을 검증하고 6장에서 결론을 맺는다.

2. 시스템 모델링

2.1 모델링

제어 알고리즘의 성능 평가를 위한 플랜트 모델로는 CNC 머시닝센터의 이송구동장치에 장착되는 X-Y table을 사용한다. 각 축의 이송구동장치는 3상 AC서보모터, 5mm 피치의 볼 스크류, 작업 테이블로 구성되며, 이송 서보드라이버는 Yaskawa 속도 서보팩(velocity servo pack)으로서 아날로그 비례-적분(PI)제어 방식에 의해 속도 피드백 제어가 수행된다. 위치 검출을 위하여 1회전당 1500개의 펄스를 발생하는 엔코더에 의해 이루어지며 이 펄스신호를 4채배하여 위치정밀도를 높였다. 서보드라이버에 표준시험신호로 계단 입력전압을 인가하여 500Hz의 샘플주파수로 100개의 데이터를 수집하였다. 실험결과로부터 다음과 같이 근사화한 모델식을 획득하였다.

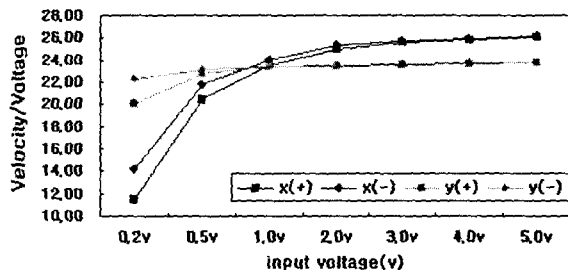


Fig. 2. Relation between input voltage and the ratio of v_{ss}/V_{in} at steady-state

a. 2차 지연형

$$G_i(s) = \frac{K_{vi} u_m^2}{s^2 + 2\zeta_i w_{mi} s + w_{mi}^2}, \quad i = x, y$$

b. 1차 지연형 :

$$G_i(s) = \frac{K_{vi}}{\tau_{vi} s + 1}, \quad i = x, y$$

실험에 의한 실제응답과 근사적으로 구한 1차 및 2차 지연형 모델의 스텝응답을 Fig.1에서 나타내었다. 위의 1차지연형 모델을 제어기설계에 이용한다.

2.2 시스템 특성

실험에 사용된 시스템의 스텝입력과 속도루프의 정상상태 게인과의 관계를 Fig.2에 나타내었다. 그림으로부터 각 축은 양(+)의 입력과 음(-)의 입력에 대하여 다른 특성을 나타내고 있으며, x축과 y축 사이의 비대칭성을 보여주고 있다. 또한, x축은 0.14V의 전압입력까지 무응답 구간(dead zone)을 보이고 있으며, y축은 0.04V까지 나타낸다. 본 연구에서는 무응답 구간에 대해서는 고려하지 않는다.

3. 비례제어와 비례적분제어

지령경로에 대한 추적운동을 하고 있는 경우의 비례제어와 비례적분제어 알고리즘의 차이점은 다음과 같다.

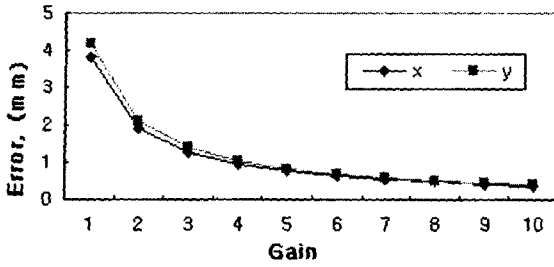


Fig. 3. Relation between proportional gain and tracking error

3.1 비례제어 알고리즘

비례제어 알고리즘을 차분방정식으로 표현하면 다음과 같다⁽³⁾.

$$u_n = u_{n-1} + K_p (e_n - e_{n-1})$$

정상상태 진입 후 제어입력은 다음과 같이 일정하게 된다.

$$u_n = u_{n-1} \quad (1)$$

3.2 비례적분제어 알고리즘

비례적분제어 알고리즘을 차분방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$u_n = u_{n-1} + K_p (e_n - e_{n-1}) + K_i e_n$$

정상상태 진입 후에는 다음과 같다.

$$u_n = u_{n-1} \quad (2)$$

위 두 식을 비교해 보면, 정상상태에서의 수식의 형태는 같다. 그런데 식(1)은 오차를 포함하고 있지만 시스템은 이를 인식하지 못하는 상태에 있고, 식(2)는 정상상태 오차가 완전히 소멸한 상태에 있게 된다. 따라서 비례제어 알고리즘을 통한 제어시스템 구현을 하고자 할 경우 정상상태 오차 감소를 위해서는 시스템에게 반드시 “오차 있음”을 알려주어야 한다. 이러한 관점에서 본 연구에서 비례제어에 의한 피드백제어 시스템을 구성하고자 할 경우 이 “오차있음”을 알려줄 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

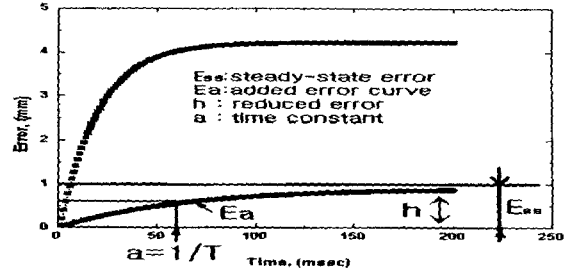


Fig. 4. Tracking Error and added error curve for unit gain P-control

4.4. 제어기설계

4.1 비례게인의 특성

Fig. 3은 게인(K_p)과 추적오차(E_0)사이의 관계를 나타낸다.

$$\text{즉, } E_{ss} = \frac{E_0}{K_p} \quad (3)$$

4.2 오차모델의 구성 및 변수 설정

동작시키고자 하는 시스템 구동속도에 대하여,

- step 1: 경사입력에 대한 단위게인의 비례제어에 의한 오차곡선 획득.
- step 2: 단위정상상태 오차가 되도록 비례게인 K_p 선정.
- step 3: 부가되는 오차곡선의 모델을 결정하고, 설정변수 a , K_a 를 선정한다.
- step 4: 현재오차에 오차모델의 출력을 더하여 전체루프의 작동오차신호로 사용한다. 즉, $E_t(t) = E_1(t) + E_a(t)$

4.3 직선 경로에 대한 오차모델

Fig. 4로부터, 부가되는 오차모델은 다음과 같다.

$$E_a(t) = h(1 - e^{-at}) \times \Delta R(t) \quad (4)$$

여기서, $\Delta R(t) = R(t) - R(t-1)$ 는 기준경로의 차이이며, 시스템의 정상상태에서 부가되는 오차량의 영향을 소멸시키기

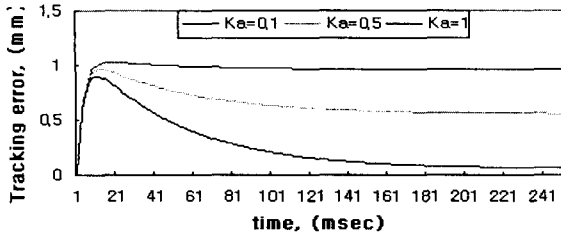


Fig. 5. Relation between tracking error and variable K_a , when $a = 10$

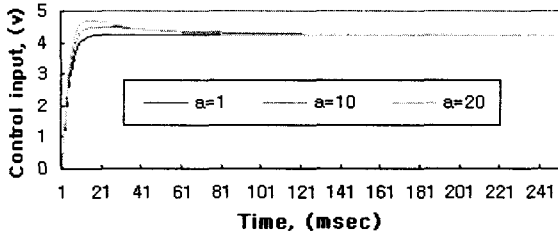


Fig. 6. Relation between control input and variable a , when $K_a=1.0$

위한 항이다. 본 연구에서의 $\Delta R(t)=0.2$ 로 일정하므로 이 후부터는 $K_a=h \times \Delta R$ 로 놓고 전개한다. 따라서 총 오차신호는 다음과 같다.

$$E_t(t) = E_1(t) + K_a(1 - e^{-at}) \quad (5)$$

식(5)에서, 지수함수의 역할은 변수 a 에 따른 부가되는 오차곡선의 기울기에 관여하기 때문에 과도상태에서의 입력의 형태를 결정한다. 하지만 시간이 지남에 따라 그 영향은 소멸하게 되어 정상상태 진입 후 시스템의 동작은 변수 K_a 의 값에 지배된다. 변수 a 의 선택은 더해지는 곡선의 시정수(time constant)를 정하고 그의 역수를 취한다. 그리고 정상상태 오차량의 감소정도를 나타내는 변수 K_a 는 예상되는 정상상태 오차 E_{ss} 보다 작아야 한다. 따라서 시스템의 정상상태 동작은 변수 K_a 의 크기만큼을 현재의 오차량(E_1)에 더해지게 되고, 약 $E_{ss}-K_a$ 만큼의 정상상태 오차를 유지하게 된다. 식(3)에서, 만약 $K_a=0$ 이면 비례제어가 된다. Fig. 5는 변수 K_a 의 값에 대한 추적오차의 변화를 나타내고, Fig. 6은 변수 a 의 값에 대한 제어입력의 변화를 나타낸다.

4.4 비례게인 설정

비례제어 게인 K_{px} 와 K_{py} 는 시스템 특성을 고려하여 설

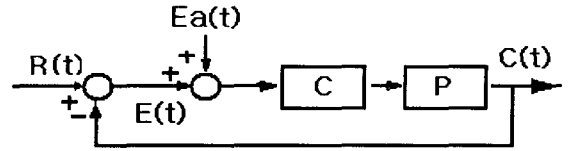


Fig. 7. Block diagram of closed-loop system

Table 1. 입력전압에 대한 정상상태 선속도와 입력전압사이의 비(V_{sz}/V_{in})와의 관계

	0.2V	0.5V	1.0V	2.0V	3.0V	4.0V	5.0V
$x(+)$	11.53	20.39	23.46	24.96	25.50	25.79	26.00
$x(-)$	14.17	21.78	24.00	25.31	25.73	25.95	26.11
$y(+)$	20.00	22.72	23.33	23.33	23.53	23.64	23.72
$y(-)$	22.22	23.11	23.35	23.52	23.63	23.69	23.72

정한다. Fig. 2에서 보는 바와 같이, 시스템의 각 축은 양 (+)의 전압과 음(-)의 전압입력에 대하여 비대칭성을 나타내고 있으며, x축 및 y축 상호간에도 비대칭성을 나타내고 있다. 윤곽오차를 0으로 하기 위해서는 각 축의 추적오차의 크기가 동일해야 한다는 것은 잘 알려진 사실이다⁽¹⁾. 따라서, 2축시스템에서 각 축이 $\theta=45^\circ$ 방향으로 동일한 추적오차를 유지하기 위해서는 정상상태에서 두 축간의 입력전압에 대한 출력속도사이의 비는 항상 다음의 관계를 만족해야 한다. 즉,

$$\frac{v_{rx}}{V_x} = \frac{v_{ry}}{V_y} = K_{px}K_{vx} = K_{py}K_{vy} = Const$$

이러한 관계는 x축으로부터의 각도 θ 와는 무관하게 유지된다. 따라서 다음과 같이 결정된다.

$$K_{py} = \frac{K_{vx}}{K_{vy}} K_{px} \quad (6)$$

여기서, 계인을 설정할 때 시스템의 구조적 특성상 질량에 의한 영향을 덜 받는 축의 계인을 조정해 주는 것이 바람직하다. 그리고 동작속도 및 방향에 따라 K_{vx} 와 K_{vy} 는 Fig.2와 표1에서 나타낸 관계로부터 선택적으로 선정하며, 이로부터 식(6)의 관계로부터 비례게인 K_{px} 와 K_{py} 를 결정한다.

전체 시스템에 대한 블록선도는 Fig. 7에 나타내었다.

5. 시뮬레이션 및 실험

5.1 시뮬레이션

직선 형태의 기준경로들은 직선의 조합에 의해 형성되기 때문에 본 연구에서는 기본적으로 직선경로에 대한 모의 실험을 수행하고, 코너경로에 대하여 실험을 실시하였다.

앞서 기술한 방법을 이용하여 시스템의 동작속도 100mm/sec, $\theta=45^\circ$ 방향에 대하여 룽게쿠타 4차 방법을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 제어기 설정변수들의 값은 다음과 같이 구하였다. Fig. 3으로부터 비례게인 $K_p=1$ 의 경우 x축의 오차는 $E_{ss}=3.84$ 이므로 식(3)의 관계로부터 $K_p=4$ 로 설정하면 정상상태오차는 $E_{ss}=0.96$ 이기 때문에 부가되는 오차모델의 매개변수 $E_{ss}=K_a=h\Delta R$ 로부터 $h=4.8$ 이 되고, $a=10$ 으로 결정한다. 식(6)으로부터 $K_{py}=4.36$ 이 되어 정상상태 오차 $E_{ss}=0.96$ 이므로, $h_y=4.8$, $a=10$ 로 설정한다. 제어 입력 $u(t)$ 는 다음과 같다.

$$u_x(t) = 4.0 (E_1(t) + 0.96(1 - e^{-10t}))$$

$$u_y(t) = 4.36 (E_1(t) + 0.96(1 - e^{-10t}))$$

윤곽오차의 계산은 Srinivasan⁽¹⁾ 등에 의해 제안된 모델을 사용하였다. 즉,

$$\epsilon_x = m_y^2 e_x - m_x m_y e_y$$

$$\epsilon_y = m_x^2 e_y - m_x m_y e_x$$

여기서, $m_x = \cos\theta$, $m_y = \sin\theta$ 이다.

Fig. 8에 직선경로에 대한 각 축의 추적오차 및 윤곽오차의 변화 형태를 나타내었다.

5.2 실험

실험은 코너경로에 대하여 시뮬레이션에 사용된 조건과 동일하게 수행하였다. 또한 윤곽제어 알고리즘은 Srinivasan⁽¹⁾ 등에 의해 제안된 알고리즘을 사용했으며, 비례게인 $K_{px}=3.0$, $K_{py}=3.27$ 그리고 $w=0.1$ 로 설정하여 실험하였다. Fig. 9는 설정변수 h 의 변화에 대한 제안된 알고리즘과 윤곽제어 방식의 코너경로에 대한 추적오차와 윤곽오차의 변화의 형태를 나타내며, Fig. 10은 기준경로의 코너

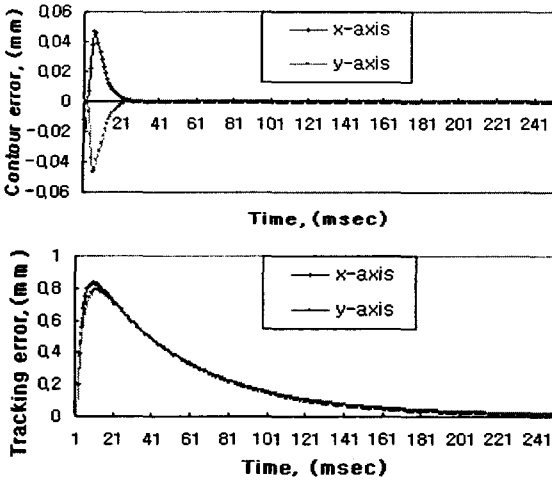


Fig. 8. Simulation result with the proposed algorithm

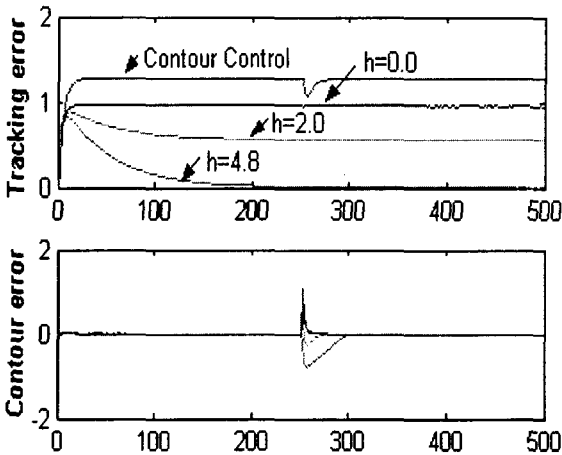


Fig. 9. Experimental result for the corner path in x-axis

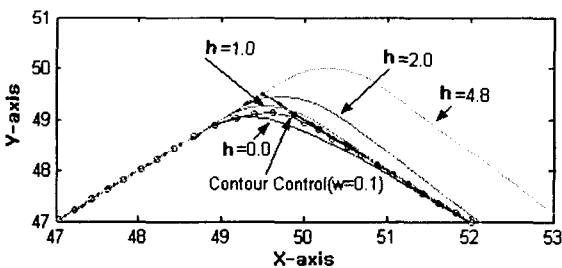


Fig. 10. Plot of actual position with experiment

부분을 확대하여 위치추적 경향을 나타내었다. Fig. 9와 Fig. 10으로부터 본 연구에서 제안하고 있는 알고리즘에 의해 "0"오차로의 수렴성을 보증할 수 있으며, 기준경로에 대한 추적형태를 쉽게 조정할 수 있음을 확인할 수 있다.

6. 결론

비례제어에 기초한 오차모델을 사용하여 직선형 경로에 대한 제어기설계 방법을 제안하였다. 현재 오차량에 오차모델의 출력량을 부가하여 이를 작동오차신호로 사용함으로써 과도응답의 안정성 확보 및 정상상태 오차를 감소시킬 수 있고, 설정변수를 도해적으로 쉽게 조정할 수 있는 특성으로부터 실제 정상상태 오차의 정도를 예측 및 조정이 가능하기 때문에 고속가공 시 작업의 편의성을 도모할 수 있음을 확인하였다. 또한, 실험으로부터 얻어진 결과들에 기초하기 때문에 설계가 정확하고 간편하여 현장에서 쉽게 응용할 수 있을 것으로 기대된다

앞으로의 연구는 원형 경로 등과 같이 속도가 연속적으로 변화하는 경로에 대하여 시스템의 비선형 특성을 고려하여 제어시스템을 구성하는 방법에 대한 추가적인 연구를 수행해야 하며, 또한 이론적 관점에서 제안된 방법에 대한 해석이 요구된다.

참 고 문 헌

- (1) Kulkarni, P.K. and Srinivasan, K.. 1990, "Cross-Coupled Control of Biaxial Feed Drive Servomechanisms", ASME J. of Dynamics systems, Measurement and Control. Vol. 112, pp. 225~232.
- (2) S. J. Kim, 2000, "Automatic control." Seong An Dang, seoul, pp. 104~105.
- (3) John G. Bollinger, Neil A. Duffie 1989, "Computer Control of Machines and Processes" Addison-Wesley, pp. 24~26