기하학적 오차를 고려한 서보 게인 불일치 보정: 시뮬레이션

Compensation of Servo Gain Mismatch excluding Geometric Error: Part I. Simulation

*박성령[1], 권성환[1], #양승한[1]
*S. R. PARK[1], S. H. KWEON[1], #S. H. YANG(syang@knu.ac.kr)[1]
[1]경북대학교 기계공학부

Key words : Servo gain mismatch, Geometric error, Compensation, Simulation

1. 서론

고정도 고품위 가공물의 수요 증가에 의해 이를 가공하는 공작기계 또한 고성능이 요구된다. 현재 공작기계 산업에 있어 많은 발전이 있어왔지만 여전히 각종 오차들이 발생한다. 이러한 오차를 줄이기 위해 하드웨어적인 방법도 있지만 기술의 한계로 인해 기하학적 오차의 경우 오차를 측정하여 소프트웨어적으로 보정하는 방법이 널리 사용되고 있다. 뿐만 아니라 서보 게인 불일치와 같이 오차의 원인 자체가 하드웨어가 아닌 제어부에서 발생하는 오차 요소도 있다. 단일 이송 구동축에 대해 최적의 제어 시스템을 구성했다 하더라도 이러한 구동축을 2축만 구성하더라도 서보 게인의 불일치에 의해 오차 요소로 발생한다. 이렇듯 서보 게인 불일치로 인한 오차의 보정은 고성능의 공작기계를 구현하기 위해서 필수적인 요소이다. 서보 게인 불일치에 의해 발생하는 오차는 두 직선 구동축의 경우 원호의 입력에 대해 45도 방향으로 기울어진 타원 형태로 발생하며 불일치 정도가 커짐에 따라 원이 타원 모양으로 가까워진다[1]. 볼바(Ball-bar System)는 이러한 서보 게인 불일치를 측정 할 수 있는 시스템 중 하나이다.

하지만 볼바를 이용한 기존의 연구[2~3]는 볼바 데이터로부터 기하학적 오차를 정확히 분리하지 못한다. 기하학적 오차에 대한 분리 없이 서보 게인 불일치 오차를 보정하게 되면 기하학적 오차에 의한 영향까지 보정하게 되므로 기하학적 오차에 대한 보정을 수행하게 되면 중복으로 보정을 하게 되어 최종적으로 공작기계에 있어 오차로 남게 된다. 그러므로 볼바를 이용한 서보 게인 불일치 정도를 측정 할 때 기하학적 오차에 대한 영향을 제거할 필요가 있다. 본 논문에서는 두 직선 구동축에 대한 서보 게인 불일치에 대한 보정을 목적으로 두고 그 가능성을 시뮬레이션을 통하여 검토하고자 한다. 먼저 기하학적 오차를 이용한 오차합성모델은 선행 연구 내용을 적용하였다[4-5]. 두 직선 구동축을 이용하여 생성한 원호 경로를 볼바로 측정한 후 기하학적 오차를 분리하고 서보 게인 불일치에 대한 정도를 추정하고 이를 보정하는 알고리즘을 제시하였다.

2. 서보 게인 불일치 보정 원리 및 알고리즘

공작기계에서 준정적 오차의 하나인 기하학적 오차에 대한 수학적 모델은 오차합성모델을 이용한다. 이 모델을 이용하면

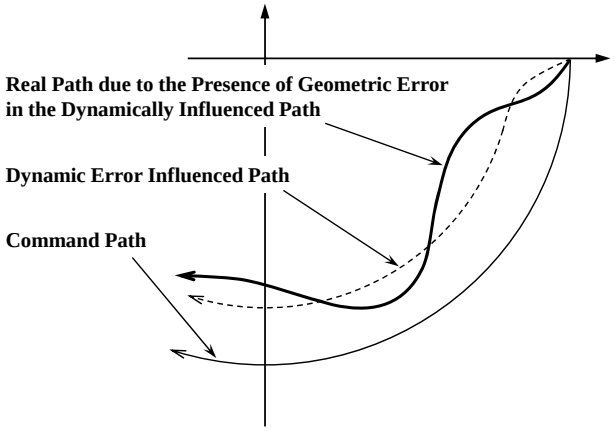

Fig. 1 Influence of geometric and dynamic errors on circular path

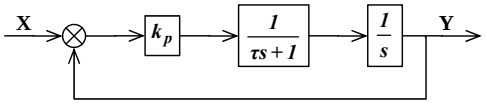

Fig. 2 Single driving axis

각 구동축에 입력을 줄 때 공구의 이상적인 위치 및 자세를 기준으로 한 기하학적 오차 정보를 준다. 본 논문은 서보 게인 불일치에 대한 보정에 더 큰 목적을 두고 있으므로 오차합성모델에 대한 전개 방법 및 각 오차의 측정에 대하여 언급하지 않는다. 또한 오차합성모델[4-5]은 완전히 알고 있다고 가정하고 전개하겠다.

Fig. 1에서 가는 실선은 두 직선 구동축에 대한 입력 값으로 원호 경로를 나타낸다. 또한 점선은 입력에 대해 동적 영향만 고려한 경로이고 굵은 실선은 이 경로(점선)에 대한 기하학적 오차의 영향을 고려한 경로이다. 여기서 볼바에 의한 측정 데이터는 굵은 실선의 경로를 따라 움직이면서 생기는 편차 값이다. 이렇듯 볼바 데이터에는 서보 게인 불일치에 의한 영향뿐 아니라 기하학적 오차에 의한 영향도 포함된다. 즉 서보 게인 불일치에 대한 평가는 점선으로 거동할 때 생기는 편차를 이용해야 한다.

각 직선 구동축에 정현파 형태로 입력을 주게 되면, 과도응답상태를 제외하면 입력 정현파에 대하여 크기 및 위상차가 생기면서 출력으로 나타난다. 식 (1)은 각 직선 구동축에 대한 입력을 나타내고 식 (2)는 출력에 대하여 과도응답상태를 제외한 형태가 된다.

$$u_x(t) = -R + R\cos\omega t \qquad (1)$$
$$u_y(t) = -R\sin\omega t$$

$$x(t) = -R + m_x\cos(\omega t + \varphi_x) \qquad (2)$$
$$y(t) = -m_y\sin(\omega t + \varphi_y)$$

여기서, R: 원호 경로(입력)의 원 반지름,
ω: 원호 경로(입력)의 각속도,
m: 출력에 대한 정현파의 크기(Amplitude),
φ: 출력에 대한 위상차(Phase shift)이다.

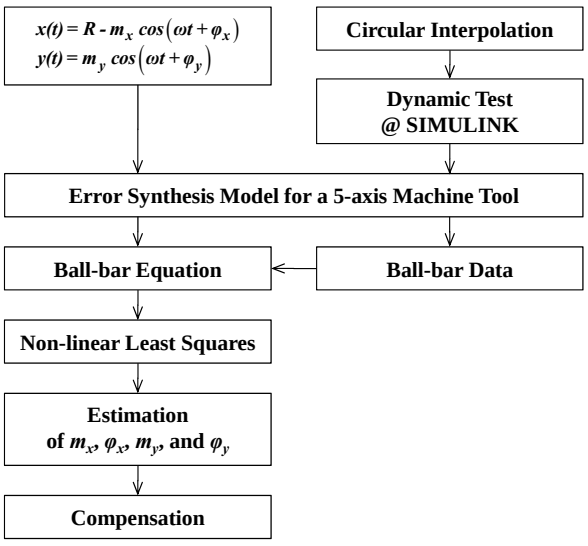

Fig. 3 Flow chart of simulation and compensation algorithm

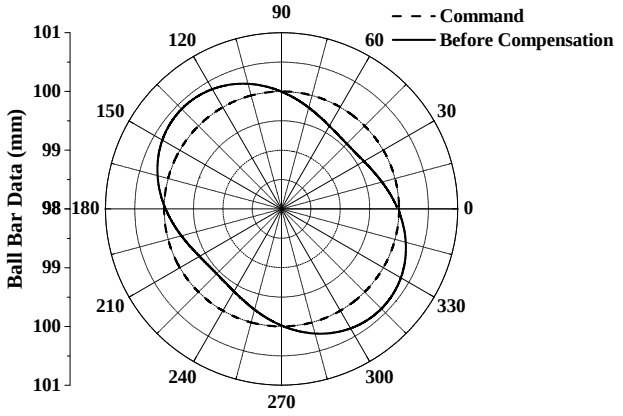

Fig. 4 Simulation of ball-bar data before compensation considering dynamic and geometric effects

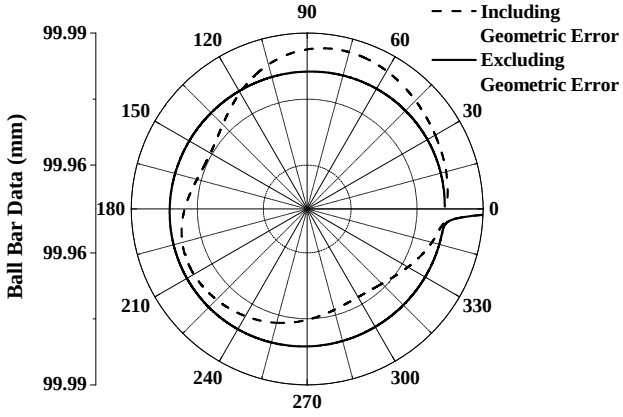

Fig. 5 Simulation of ball-bar data after compensation of servo gain mismatch

앞서 언급했듯이 식 (2)는 Fig. 1에서 점선의 경로를 나타낸다. 식 (2)를 오차합성모델에 적용한 후 위치와 관련된 정보만을 고려하면 Fig. 1에서의 굵은 실선이 된다. 이렇게 구한 실제 경로(굵은 실선)에 대한 수식을 보면, 한 구동축에 대하여 크기 및 위상차(m, ϕ)가 모르는 변수로 두 구동축을 고려하면 각각 두 개씩 총 네 개의 변수가 존재한다. 이 식을 벡터 크기로 변환(볼바 데이터)한 후 비선형 최소자승법으로 해를 구하면 기하학적 오차에 대한 영향을 볼바 데이터에서 분리하고 각 구동축에 대한 출력(크기 및 위상차)을 추정하게 된다. 여기서 각 구동축의 제어루프를 Fig. 2와 같이 가정한 후 정현파 입력에 대한 출력으로 그 크기와 위상각을 계산한 후 비선형 최소자승법으로 추정한 값(크기 및 위상차)과 비교하면 식 (3)과 같다.

$$k_p = \frac{m\omega}{R|\sin\varphi|} \qquad (3)$$
$$\tau = \frac{1}{\omega}\left(\frac{m}{R|\sin\varphi|} + \frac{1}{\tan\varphi}\right)$$

서보 게인 불일치를 보정한다는 것은 타원으로 생성된 경로를 원의 형태로 출력되는 것이다. 이렇듯 원 형태로 출력되게 하기 위해서 두 구동축의 출력으로 생기는 위상차를 같게 두고 게인을 계산하게 되면 보정하기 위한 구동축의 게인값을 추정하게 된다. 게인 값의 보정을 위하여 각 구동축에 대하여 임의의 게인 값으로 튜닝이 가능하지만 본 연구에서는 x 구동축의 게인 값을 기준으로 y 구동축의 게인을 튜닝하였으며 식 (4)와 같다.

$$k'_{py} = k_{px} + \frac{\omega}{R}\left(-\frac{m_y - R\cos\varphi_y}{\sin\varphi_y} + \frac{m_x - R\cos\varphi_x}{\sin\varphi_x}\right) \qquad (4)$$

3. 서보 게인 불일치 시뮬레이션

본 논문에서는 오차합성모델을 생성하기 위하여 테이블 틸팅 형태의 5축 공작기계를 이용하였다. 기하학적 오차는 실제 측정 데이터의 형태를 기반으로 생성하여 오차합성모델에 적용하였다. 오차합성모델에 각 구동축의 이송 위치를 입력으로 주게 되면 테이블을 기준으로 한 공구 끝단의 실제 위치를 알게 된다. 본 논문에서의 시뮬레이션은 Fig. 3에서와 같은 순서로 상용 프로그램인 MATLAB을 이용하였다. 먼저 식 (1)에서처럼 원호 보간에 필요한 각 변수(반지름 100 mm 및 각속도 0.5 rad/sec)를 설정한 후 MATLAB SIMULINK를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 마지막으로 이 데이터를 오차합성모델에 적용하면 각 구동축에 대한 기하학적 오차 및 동적 영향을 고려한 원호 경로가 생성된다. Fig. 4는 원호 경로 및 서보 게인 불일치에 의한 경로를 나타낸다. 여기서 원호 경로에 대한 정보는 벡터 형식으로 볼바 데이터를 얻기 위하여 벡터의 크기로 변환하였다. 2장에서 설명한 방법을 이용하면 식 (3)과 같이 게인 값이 추정되고 식 (4)의 보정 값을 이용하여 앞서 SIMULINK에서 시뮬레이션한 모델에 적용하게 되면 Fig. 5와 같이 나타난다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 실선은 기하학적 오차를 제거한 후 y 구동축의 게인을 보정하여 얻은 경로이고 점선은 이 경로(실선)에 대한 기하학적 오차에 의해 생성된 경로이다.

4. 결론

본 연구는 두 직선 구동축에 대하여 볼바를 이용한 측정 방법을 이용하여 서보 게인 불일치에 대한 보정 방법을 시뮬레이션으로 검증하였다. 먼저 동적 영향을 기술하기 위해 MATLAB SIMULINK에서 원호 보간에 대하여 시뮬레이션을 하였다. 또한 기하학적 오차에 대한 영향을 고려하기 위하여 틸팅 형태의 5축 공작기계에 대한 오차합성모델을 생성한 후 동적 영향에 의해 생성된 경로를 적용하였다. 직선 구동축은 1차 시스템으로 가정하여 게인 값을 추정하고 이를 기반으로 각 구동축의 게인 값을 계산하여 보정하였다.

후기

이 논문은 정부의 재원으로 한국과학재단의 지원(2009년도 국가지정연구실사업)을 받아 수행된 연구임 (R0A-2009-0083054).

참고문헌

1. ISO 230-4, “Circular Tests for Numerically Controlled Machine Tools," ISO, 2005.
2. Lei, W.T., Paung, I.M. and Yu, C.C., "Total Ballbar Dynamic Tests for Five-axis CNC Machine Tools," International Journal of Machine Tools & Manufacture, 49, 488-499, 2009.
3. Schmitz, T. and Ziegert, J., "Dynamic Evaluation of Spatial CNC Contouring Accuracy," Precision Engineering, 24, 99-118, 2000.
4. 이동목, 권성환, 양승한, "3축 공작기계의 기하학적 오차 측정 및 평가," 한국정밀공학회 2009년도 추계학술대회 논문집, 11-12, 2009.
5. 이동목, 양승한, "공작기계의 기하학적 오차 합성 모델링을 위한 수학적 분석 기법," 한국정밀공학회 2008년도 춘계학술대회 논문집, 71-72, 2008.