

◆ 특집 ◆ 5 축 가공기술

5 축 가공 효율향상 기술

Machining Efficiency Enhancement Algorithms for 5-axis milling

소범식^{1,✉}, 고태조²
Bum Sik So^{1,✉} and Tae Jo Ko²

1 (재)경북하이브리드부품연구원 (Gyeongbuk Hybrid Technology Institute)
2 영남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.)
✉ Corresponding author: so@ghi.re.kr, Tel: 054-330-8020

Key Words: 5-Axis Machining (5 축 가공), Feedrate Scheduling (이송속도 계획), Machining Speed (가공속도) Machining Time (가공시간), Singular Region (특이영역)

1. 서론

5 축 가공에서 회전축은 여러 가지 이점을 제공하지만 동시에 문제의 원인을 제공하기도 한다. 즉, 회전축 동작으로 다양한 공구 자세를 취할 수 있어 효과적인 가공이 가능한 반면, 아이러니하게도 회전축 때문에 (가공데이터 기준인) 기계 좌표계와 (공구경로 기준인) 공작물 좌표계가 서로 비선형 관계에 놓여 정밀한 가공을 어렵게 한다. 최근 곡면 위주의 제품 디자인이 증가됨에 따라 신발, 가전, 휴대폰과 같은 일반 금형 분야에서의 5 축 가공 도입이 확대되고 있다. 그러나 상대적으로 5 축 가공의 문제를 극복하고 효율을 높이기 위한 검토가 부족하여 공작기계의 성능을 충분히 활용하지 못하는 경우가 적지 않다.

따라서 본 특집에서는 Fig. 1 에 나타난 바와 같

이 5 축 공구경로 생성 단계 후에 필요한 가공속도 향상 기술, 가공오차 최소화 기술 그리고 가공 데이터 변환응용 기술 등 전체 5 축 가공의 효율을 높일 수 있는 다양한 기술에 대해 소개하고자 한다.

2. 5 축 가공속도 향상 기술

2.1 이송속도 계획

이송속도 계획의 기본 알고리즘은 Fig. 2 와 같이 가공이 진행되는 동안 절삭량이나 공구 절삭영역 등의 변화를 고려하여 이송속도를 가변 조정하는 것이다. 즉, 절삭량이 많은 경우 높은 가공 부하를 고려하여 공구의 이송속도를 줄이고, 적은 경우 이송속도를 높임으로써 가공속도를 향상시킬

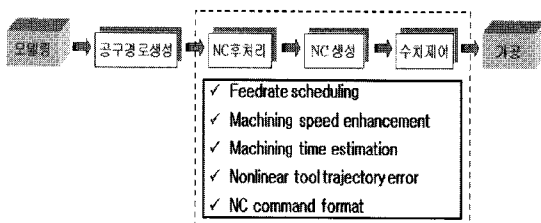


Fig. 1 5-axis NC data generation procedure

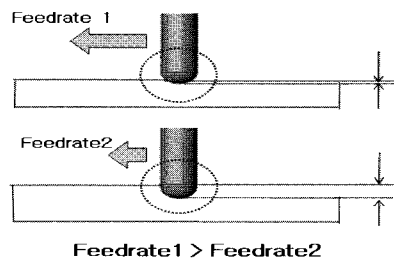


Fig. 2 The principles of the feedrate scheduling

수 있다. 이러한 기술은 3 축 가공에서 먼저 연구 되었으나, Erdim¹ 등의 연구에서 자유 곡면에 대한 가공 부하 계산 알고리즘 등을 통해 5 축 가공에 적용될 수 있도록 검토되었다. 가변 이송속도 계획 방법은 정상·고속가공보다 가공부하가 높은 중·황삭 가공에서 효과적이며 경우에 따라 20% 이상 가공속도를 높일 수 있다.²

2.2 보간길이 최적화

앞에서 언급한 바와 같이 이송속도 계획에 의한 가공속도 향상 기술은 고속가공에 적용하기에는 한계가 있다. 왜냐하면 고속가공에서는 가공부하 보다 컨트롤러의 데이터 처리속도, 서보모터의 가·감속 능력 등과 같은 공작기계의 성능 한계에 의해 가공속도가 좌우되기 때문이다. 고속가공에서는 가공 형상에 따라 실제 이송속도가 지령 이송속도를 따라가지 못하는 상황이 빈번히 발생한다. 즉, 보간길이가 너무 짧은 경우 공구경로에 대해 컨트롤러가 처리해야할 가공명령의 개수가 많아 실제 이송속도가 낮아지며, 반대로 보간길이가 너무 긴 경우 직선이송 간의 방향변화가 급격하여서보모터 가·감속 성능한계에 의해 실제 이송속도가 낮아진다. Fig. 3 은 5 축 공작기계(MIKRON 사, UCP710)에 대해 다양한 보간길이에 따른 가공시간을 측정한 결과이다. 공작기계에 따라 차이는 있으나 이송속도가 높아질수록 지령 이송속도를 유지하는 보간길이 구간이 줄어드는 경향은 동일하다.

따라서 Fig. 3 에서 지령 이송속도가 10000 mm/min 인 경우 높은 이송속도를 유지하기 위해서는 가공데이터 보간길이가 1.1~2.5mm 가 되도록

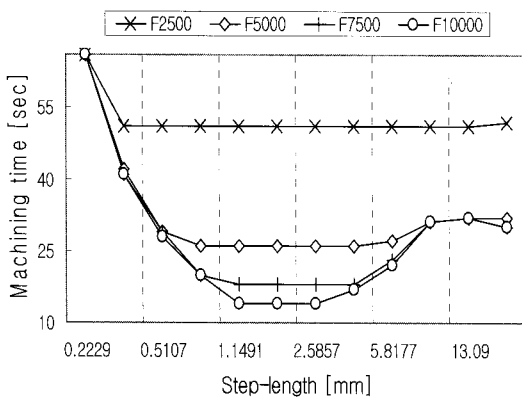


Fig. 3 The machining time vs. step-length

공구경로를 분할해야 한다. Fig. 4 는 보간길이 최적화에 대한 전체 프로세스를 보여주고 있다.

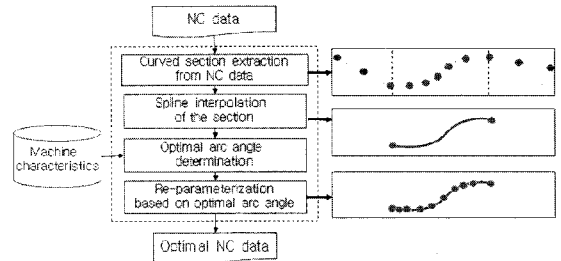


Fig. 4 Schematic process of step-length optimization

먼저, 공구경로에서 곡선구간을 추출하고 스플라인보간 파라미터를 구한다. 그리고 Fig. 3 과 같은 공작기계 동작특성과 추출된 곡선구간의 곡률을 고려하여 최적의 보간길이를 구하고, 이를 근거로 스플라인보간 파라미터를 재배치함으로써 보간길이가 조정된 가공데이터를 얻을 수 있다. 이와 같은 방법으로 고속가공에서 최대 25%정도까지 가공속도를 높일 수 있다.³

2.3 운동축 제어보간

일반적으로 곡면가공에서의 가공데이터는 충분한 정밀도 확보를 위해 매우 짧은 직선으로 생성된다. 이러한 공구경로를 높은 이송속도로 가공하는 경우 공작기계는 과도한 양의 가공명령을 처리해야 하며, 이 과정에서 이송속도의 불균일 문제가 발생한다. 또한 5 축 가공에서는 이송축 동작과 전혀 다른 특성을 가진 회전축 동작이 존재하고 이로 인해 고속가공에서 부드럽지 못한 공구의 움직임이 발생한다. 이를 극복하기 위해 이송축 속도와 회전축 속도를 동시에 보간 하여 가공 속도와 품질을 향상시키는 연구가 다양하게 진행되었다. Fleisig⁴ 등은 회전축을 포함하는 다축가공에 5 차 스플라인 보간을 이용하여 공구의 등속 이송과 등속 자세변화를 동시에 만족하는 보간 기술을 개발하였다. 또한 Xu⁵ 는 이송축과 회전축 이송속도를 동시에 고려하기 위해 이송축 이송속도에 대한 전이함수를 제안하였으며 이를 이용하여 이송축 및 회전축 이송속도 한계를 고려한 이송속도 보간 알고리즘을 개발하였다. 이송속도 보간을 위해 PH(Pythagorean-Hodograph)곡선도 효과적으로 응용되었다. PH 곡선은 매개변수 곡선의 속도성분으로 이 속도성분이 u 와 v 의 제곱으로 표현되고 u, v 가

각각 2 차 다항식으로 구성되는 경우 매개변수에 대한 곡선의 길이와 속도, 곡률반경, 접선, 법선 등 여러 가지 중요한 기하학적인 요소들이 다항식으로만 구성되기 때문에 여러 가지 이득을 얻을 수 있는 곡선이다. Muller⁶ 등은 5 축 가공에서 PH 곡선을 이용하여 5 축 가공데이터를 5 차 스플라인 보간 곡선으로 적용함으로써 부드러운 공구의 동작이 가능함을 보였다. 그러나 이러한 PH 곡선의 이점을 이용하기 위해서는 기존의 매개변수 곡선을 각각 2 차 다항식인 u, v 로 변환해야 한다.

2.4 가공시간 예측

가공시간의 예측은 효과적인 가공과 작업 관리를 위해 중요하다. 밀링공정의 일반적인 가공시간 평가 방법은 Maropoulos⁷ 등의 연구와 같이 공구경로 길이에 지령 이송속도를 나누고 적절한 경험치를 곱하는 것이다. 이것은 3 축 가공에서는 비교적 정확하나 5 축 가공에서는 실제 가공시간과 예측 시간에 상당한 차이가 발생한다. 차이가 발생하는 원인은 공작기계의 회전축 동작의 영향, 서보모터의 가·감속 성능 등과 같은 공작기계의 동작특성을 기존의 방법에서는 고려하지 않기 때문이다. 실제 가공시간에 유사한 예측을 위해서는 공구의 실제 이송속도 프로파일을 구해야 한다. 공구의 이송속도 프로파일을 실제동작과 유사하게 구하기 위해 Fig. 5 와 같이 한 가공명령에 대한 공구 이송속도 프로파일을 두 가지 경우로 나누었다. 즉, (a) 는 직선이송구간에 대한 것이며, (b) 는 가공명령의 시작과 종료위치(공구의 직선이송 양 끝점)에 대한 이송속도 프로파일이다.

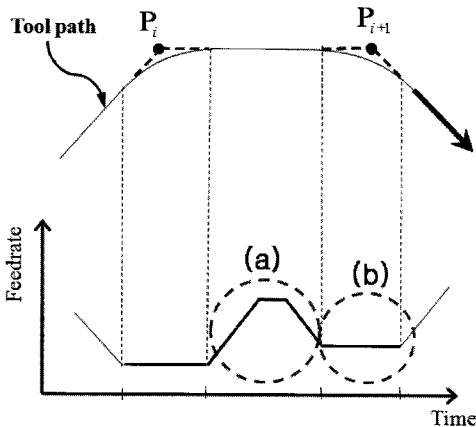


Fig. 5 Velocity profile of 5-axis machining

(a)의 속도 프로파일 기울기와 모양은 측정된 공작기계 가·감속 성능에 따라 결정된다. (b)의 속도 프로파일은 네 가지 이송속도에서 가장 낮은 값으로 구한다. 네 가지 이송속도는 (1) 지령 이송속도, (2) 컨트롤러의 데이터 처리속도 한계에 의해 결정되는 이송속도, (3) 회전축 동작의 성능한계에 의해 제한되는 합성 이송속도, (4) 이송축 동작의 성능한계에 의해 제한되는 합성속도이다. 컨트롤러의 데이터 처리속도 한계에 의한 이송속도는 매우 짧은 직선이송 명령을 빠르게 진행하는 경우에 발생한다. 또한 5 축 가공은 이송축과 회전축의 동시 동작에 의해 진행되며, 이송 또는 회전축 중에서 급격한 동작이 발생하는 운동축에 따라 전체 동시제어 이송속도의 한계가 결정된다. 예를 들어 코너부위 가공에서 이송축 보다 회전축 동작이 급격히 발생하는 경우 회전축의 가·감속성능 한계에 의해 전체 5 축 동시제어 이송속도가 결정된다. 한 가공명령에 대해 경로길이와 속도프로파일을 구할 수 있으므로 가공시간은 경로길이에 속도성분을 나누어 구할 수 있으며, 전체 개별 가공명령에 대한 예상시간을 모두 더하여 실제에 가까운 가공시간을 계산한다. 5 축 가공시간 예측에서 이와 같은 방법은 기존의 상용 프로그램에서의 결과보다 오차 기준 2~10 배 정도 더 정확한 가공시간 예측이 가능하다.⁸

3. 가공 오차 최소화 기술

3.1 특이영역 회피

5 축 가공은 공구가 특정 자세에서 공작물 좌표계와 기계 좌표계 간의 비선형성이 극대화 되는 영역이 존재하며, 이러한 공구 자세 영역을 5 축 가공에서의 특이영역이라 한다. 특이영역에서는 Fig. 6 의 (c)-(d)와 같이 특정 회전축이 급격한 동작을 하게 되며, 이로 인해 공작물의 가공품질에 문제가 발생한다.

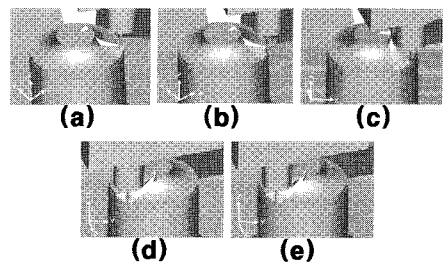


Fig. 6 5-axis machine behavior in singular region

Affouard⁹ 등은 table-tilting type 5 축 공작기계에 대해 특이영역에서 발생하는 급격한 궤적오차를 줄이기 위해 특이영역을 원뿔 모양으로 형상화 하고 공구경로를 변형함으로써 특이영역을 회피하였다. 그러나 공구경로는 공구간섭을 고려하여 생성되었기 때문에 쉽게 바꿀 수 없다. 따라서 최근에는 공구경로 생성 단계에서 특이영역을 회피하도록 하고 있으며, 이를 위해 공작기계의 기구적인 특성을 공구경로 생성 단계에서 미리 고려하고 있다.

3.2 NC 궤적 선형화

일반적으로 공작물 좌표계와 기계 좌표계 간의 비선형성에 의해 발생하는 공구 궤적오차는 NC 후처리(Post-process)에서 충분한 개수의 가공명령을 추가함으로써 줄일 수 있으며, 이러한 과정을 NC 궤적 선형화라 한다. 상용 CAM 소프트웨어의 선형화 방법은 Fig. 7 과 같이 공구궤적오차가 큰 구간간의 가공명령에 대해 공구가 선형적으로 진행할 수 있도록 충분한 미소구간의 NC 가공명령을 추가 삽입하는 것이다.

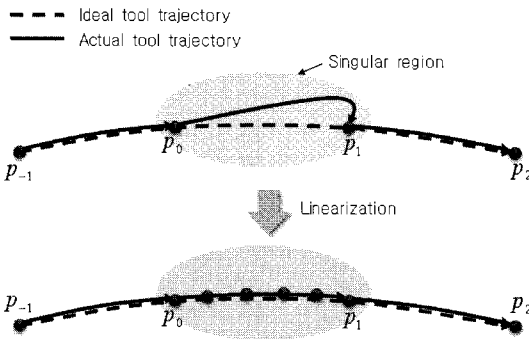


Fig. 7 NC data linearization for tool trajectory error

그러나 이러한 선형화 방법은 필요 이상의 많은 가공명령을 삽입하기 때문에 실제 가공에서 가공 속도가 저하되는 결과를 초래한다. Choi¹⁰ 등은 Spindle-tilting type 5 축 공작기계에서 공구의 자세 변화량에 대해 필요한 가공명령의 개수를 미리 계산하여 가공명령을 삽입하였다. 이 방법의 경우 불필요하게 삽입되는 가공명령의 개수는 줄일 수 있으나 선형화 후의 오차가 균일하지 않은 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Fig. 8 과 같이 선형화 후 궤적오차가 균일해 지도록 삽입할 가공명령의 간격을 조절하였다.

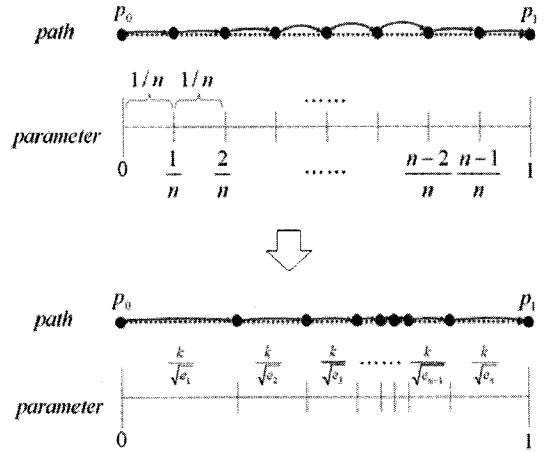


Fig. 8 Tool trajectory error of uniform chordal error

가공명령의 간격은 매개변수(k)로 표현되는 1 차 선형 보간식에서 매개변수 구간 크기를 궤적오차(e)의 제곱근에 반비례 하도록 배열함으로써 구할 수 있다. 이와 같은 방법은 선형화 후의 궤적오차가 기존의 방법에 비해 20~30 배 정도 균일하며, 또한 최소 개수의 가공명령만 삽입하여 선형화를 가능하게 한다.

4. 가공데이터 변환 응용

4.1 NURBS 가공

짧은 직선보간으로 이루어진 가공데이터는 다음의 세 가지 불리한 요소가 있다. 즉, 가공 정밀도를 높이기 위해서는 비정상적으로 큰 가공데이터의 용량을 감수해야 하며, 고속가공에서 컨트롤러의 데이터 처리속도 한계로 인한 가공속도 저하가 발생할 수 있으며, 또한 직선 이송의 미세한 방향변화 때문에 가공면의 품질에 문제가 생길 수 있다. 이러한 문제의 대안으로 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline) 가공이 개발되었다.¹¹ NURBS 가공은 가공데이터를 NURBS 파라미터로 정의하여 가공을 하는 것으로 Fig. 9 에 나타난 바와 같이 기존의 NC 후처리 기능이 컨트롤 시스템에 포함되어 있다. 또한 NURBS 가공은 기존의 CAD 시스템의 데이터를 그대로 활용할 수 있을 뿐 아니라 파라미터에서 컨트롤러가 직접 가·감속 제어를 수행하므로 고속가공에서 고품질 가공이 가능하다.

그러나 경우에 따라 가공면의 품질과 무관하게 전체적인 오프셋 오차가 발생하며, 기존의 대부분

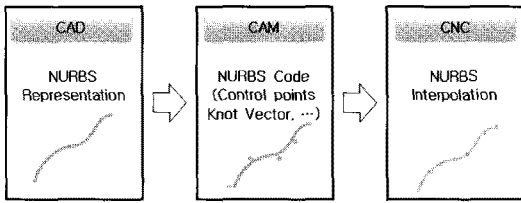


Fig. 9 NURBS process for machining curves

가공데이터가 일반적인 직선보간 형식이기 때문에 NURBS 가공은 아직 널리 적용되지 못하고 있다.

4.2 공작물 좌표계 데이터에 의한 가공

공작물 좌표계는 작업자가 가공 형상을 생각하는 CAD 시스템에서의 좌표계이다. 그러나 5 축 가공의 가공데이터는 작업자를 고려한 공작물 좌표계가 아닌 공작기계의 운동축 값을 나타내는 기계 좌표계로 구성되어 있기 때문에 3 축가공의 경우처럼 작업자의 재량에 따라 효과적인 작업이 불가능하다. 예를 들어 작업자가 공작물 세팅에서 위치나 자세변경이 발생하는 경우 매번 NC 후처리를 통해 가공데이터를 재계산해야 하며, 상당한 시간소요가 발생한다. Lo¹²는 Fig. 10 과 같이 이러한 별도의 NC 후처리 과정을 줄이기 위해 공작물 좌표계의 공구경로를 가공데이터로 활용할 수 있는 컨트롤 시스템을 제안하였다.

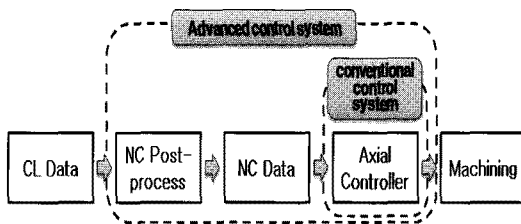


Fig. 10 Advanced control system in 5-axis machining

공구경로를 가공데이터로 활용하는 기술은 작업자가 3 축가공과 동일한 방식으로 5 축 가공을 조작할 수 있게 하며, 가공데이터가 공작기계의 종류나 공구의 길이 등 외부적인 조건에 영향을 받지 않기 때문에 매우 유용한 기술이다. 그러나 이러한 기술은 컨트롤러의 계산 부담을 가중시켜 높은 이송속도가 요구되는 고속가공에는 적용되지 않고 있다.

5. 결론

이제까지 주어진 5 축 가공데이터가 실제 가공에 적용될 때 발생하는 여러 가지 문제와 이를 극복하고 가공 효율을 높일 수 있는 다양한 기술들을 살펴보았다. 5 축 가공기술은 기존의 3 축 가공에 비해 가공효율을 파격적으로 높일 수 있는 기술임에는 틀림없다. 그러나 이러한 이점을 충분히 활용하기 위해서는 숨어있는 5 축 가공의 문제점을 파악하고 효율을 높일 수 있도록 다양한 기술들을 활용해야 한다. 향후 5 축 가공의 가공효율 향상 기술은 공구경로 생성과 별도로 다루어지기 보다는 공구경로 생성 과정에서 공작기계의 기구학적 구조, 제어특성, 가·감속 성능 등 가능한 모든 요소들이 고려되어 종합적인 고효율화로 발전될 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 산연 공동기술개발지원사업(과제번호 00038962-1) 연구지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Erdim, H., Lazoglu, I. and Ozturk, B., "Feedrate scheduling strategies for free-form surfaces," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, No. 7-8, pp. 747-757, 2006.
2. CGTech, <http://vericut.com/>
3. So, B. S., Jung, Y. H., Kurfess, T. R. and Hwang, S. M., "5-Axis machining speed enhancement by step length optimization," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187-188, pp. 2-5, 2007.
4. Fleisig, R. V. and Spence, A. D., "A constant feed and reduced angular acceleration interpolation algorithm for multi-axis machining," Computer-Aided Design, Vol. 33, No. 1, pp. 1-15, 2001.
5. Xu, H. Y., "Linear and angular feedrate interpolation for planar implicit curves," Computer-Aided Design, Vol. 35, No. 3, pp. 301-317, 2003.
6. Muller, M., Erdos, G. and Xirouchakisa, P., "High accuracy spline interpolation for 5-axis machining," Computer-Aided Design, Vol. 36, No. 13, pp. 1379-1393, 2004.
7. Maropoulos, P. G., Baker, R. P. and Paramor, K. Y. G., "Integration of tool selection with design Part 2: Aggregate machining time estimation," Journal of

- Materials Processing Technology, Vol. 107, No. 1, pp. 135-142, 2000.
8. So, B. S., Jung, Y. H., Park, J. W. and Lee, D. W., "Five-axis machining time estimation algorithm based on machine characteristics," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187-188, pp. 37-40, 2007.
 9. Affouard, A., Duc, E., Lartigue, C., Langeron, J. M. and Bourdet, P., "Avoiding 5-axis singularities using tool path deformation," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, No. 4, pp. 415-425, 2004.
 10. Cheng, M. Y., Tsai, M. C. and Kuo, J. C., "Real-time NURBS command generators for CNC servo controllers," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, No. 7, pp. 801-813, 2002.
 11. Choi, B. K., Park, J. W. and Jun, C. S., "Cutter-location data optimization in 5-axis surface machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 25, No. 6, pp. 377-386, 1993.
 12. Lo, C. C., "A tool-path control scheme for five-axis machine tools," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, No. 1, pp. 79-88, 2002.