

곡면가공시 공구간섭에 따른 미절삭체적의 다단계 NC가공

맹희영*, 차지경*

Multi-stage NC Milling of Uncut Volume caused by Gouging Interference at the Machining of Curved Surfaces

Heeyoung MAENG*, Ji-Kyoung CHA*

Abstract

A new efficient intelligent machining strategy named the Steepest Directed Tree method is presented in this study, which makes surface model discrete with triangulation meshes and the cutter paths track along the tree directions. In order to formulate these algorithms practically, it is deduced the multi-stage machining approach of uncut volume caused by cutter gouging in the course of milling using flat end mill.

It is systematized the checking process the cutter interference by grouping the 6 kinds of gouging types, which yields the environment of connectivity data lists including CL-data, and then the multi-stage machining strategy, that minimizes uncut area by continuously sequencing the generative subsequent CL-paths, is shamed to determine the second tool path for the next uncut area and to compose the operating multi-stage cutting processes. The completed machining system of curved surfaces is evaluated by testing the practical machining experiments which have various kinds of shape conditions.

Key Words: Steepest Directed Tree Method, Cutter Gouging, CL-paths, Multi-stage Machining.

1. 서론

일반적으로 곡면형을 설계 및 가공하는 단계는 곡면 모델링 과정과 NC 밀링과정, 그리고 남겨진 커슁(cusp)을 사상가공으로 다듬질하는 3단계로 구분된다. 여기서 곡면의 NC 밀링과정과 사상가공 과정은 생산성과 정밀도를 동시에 요구하게 되는데, 주어진 형상정밀도를 만족하면서 이를 NC가공하는 데에는 매우 긴 절삭경로와 저속의 이송속도를 사용하여야 하는 단점 때문에 다른 유형의 밀링가공 방식에 비하여 절삭능률이 매우 뒤떨어지는 가공이다.

전형적인 NC 절삭경로의 산출방식으로는 크게 나누어 Parametric방식과 Cartesian방식으로 나눌 수 있으나

이들 방식은 모두 가공형상의 기하학적인 산출방법의 편리성에 바탕을 두고 개발된 방법들로서 복잡한 곡면의 경로를 생성하기에는 여러 한계가 있다. 그리고 이들 방법들에 있어서는 대부분 평엔드밀(flat end mill)에 비해 절삭성이 일반적으로 1/3 정도로 떨어지는 볼엔드밀(ball end mill)을 사용하고 있어서 절삭이송속도가 상대적으로 매우 느리게 된다.^(1,2)

곡면가공을 위한 절삭경로 생성에 있어서 이러한 한계성과 단점을 극복하기 위해 곡면 등고선을 따라 가공하는 contour map 방법⁽³⁾, 경계 폐곡선에 등간격으로 오프셋된 폐곡선을 따라 가공하는 offset profile 방법⁽⁴⁾과 평엔드밀을 기울여서 가공하는 5축 가공⁽⁵⁾ 등이 시도되었다.

* 발표자, 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 maeng@snut.ac.kr

주소: 139-743 서울시 노원구 공릉동 172번지

* 서울산업대학교 대학원

한편 평엔드밀 커터를 사용하여 곡면을 3축 NC가공하는 데에 있어서는 최대 경사선을 따라 절삭할 때 표면거칠기가 가장 좋게 나타내고 있음이 밝혀지고 있으나^(1,2), 절삭경로 산출상의 복잡성과 산만한 경로들을 적절하게 연결할 수 있는 방법론이 개발되어 있지 못하여 평엔드밀을 곡면가공에 실용적으로 사용하지는 못하고 있었다.

최근 삼각형요소화(Triangulation)된 곡면모델을 대상으로 최대경사방향 트리추적법⁽⁶⁾(steepest directed tree method)이 개발되어서 삼각형요소화된 메쉬들의 방향성과 토폴로지를 이용하여 방향트리들을 따라 절삭경로를 연속적으로 추적할 수 있는 방법론이 개발되었다. 그러나 최대경사방향 트리추적법에 있어서도 사용되는 커터의 직경이 크게 되면 오목한 곡면이나 교차부위에서 공구간섭으로 인한 미절삭체적이 자주 남게 되고 이들 부위를 어떻게 後가공으로 처리하는 가에 대한 과제가 있다.

따라서 본 연구에서는 최대경사방향 트리추적법에서 가장 문제시 되고 있는 미절삭가공 부위의 後가공을 어떻게 효율적으로 가공하는 가에 대한 방법론을 개발하고자 하였다. 이를 위해 곡면상의 z-map모델을 이용하여 삼각형요소들의 위상학적인 특성들에 의한 공구간섭의 여러 가지 유형들을 추출할 수 있는 방법론을 고안하였고, 이를 토대로 하여 미절삭부위를 최소화시키기 위한 2차 다단계 가공 절삭경로의 산출 전략을 개발하였다.

2. 최대경사방향 트리추적법의 원리

2-1. 기초 개념

삼각형요소화된 메쉬곡면상의 임의 절점에 대해 이웃의 절점에 대한 최대 경사선은 Fig. 1과 같이 공간 경사도에 의해 결정된 상향 트리에지(UT: Upward Tree)와 하향 트리에지(DT; Downward Tree)로 나뉜다. 또한 방향선에 대한 절점의 위치에 따라서 UT는 UTo와 UTi로 분리되며, DT는 DTo와 DTi로 분리되는데, A에서 볼 때 B점 및 C점은 각각 UTo 및 DTo로 표시되고, B에서는 UTi 그리고 절점 C의 관점에서 볼 때에는 DTi로 표시된다.

이같은 최대경사 상향트리에서 UTi가 없는 고립점에 대하여 실제의 UTi 대신에 이 점에 대한 DTo의 역방향선으로 정의되는 가상 UTi(virtual UTi : VUTi)를 설정할 수 있다. 또한, VUTi의 상대점은 항상 분기점의 역할을 담당한다.

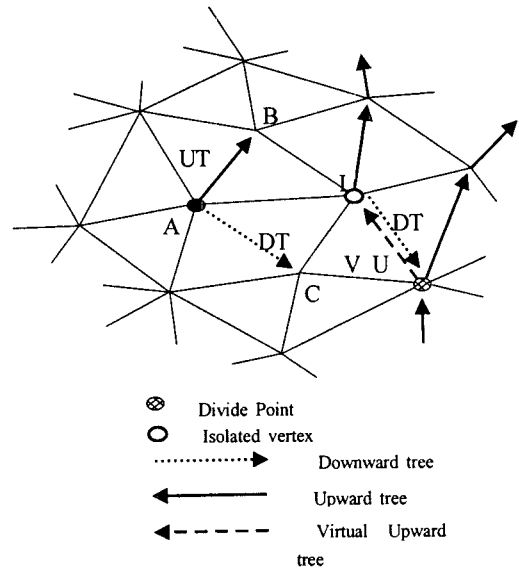


Fig. 1 Upward tree(UT) and downward tree(DT) edge

2-2. 최대경사 방향선 결정

Steepest directed Line 과정은 최대경사방향 트리추적법의 시작단계로서 삼각형요소화된 곡면메쉬에 대하여 각 절점에 대한 상향 및 하향의 최대경사 에지(edge)들을 찾아 UTo 및 DTo를 저장함으로써 시작된다. 현행점을 중심으로 이웃점(adjacent point)들로 이루어진 삼각패치의 각 점들을 반 시계방향으로 차례로 높이값(H)과 거리(D)를 구하여 $\frac{\text{높이값}}{\text{거리}}$ 의 비가 큰 값을 UTo로 취한다. 같은 방법으로 음의 방향의 가장 큰 높이값을 절대값으로 취하여 DTo를 구할 수 있다. 구해진 UTo와 DTo로부터 상대관계를 적용하여 UTi와 DTi를 구한다.

2-3. 기하학적 성질 결정

곡면 위의 임의 절점이 곡면형상의 변화과정에서 어떠한 역할을 차지하고 있는 가를 지정하기 위해서 Steepest directed Line 과정에서 결정된 UTo, UTi, DTo 및 DTi의 존재 개수, 포인터(pointer) 그리고 요소 포인트(element pointee)로 구분된 정보를 바탕으로 각 절점에 기하학적 성질을 부여한다.

3. 미절삭체적의 다단계 가공 알고리즘

3-1. 공구간섭의 특성 해석

공구 간섭이란 곡면을 가공하면서 원하지 않는 부분으로 정의 하며, 여기서는 삼각형요소화된 모든 z(value) 에 대하여 간섭을 유형별로 체크하고 간섭이 생기지 않는 가장 낮은 위치를 결정하는 방법을 사용하였다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 예상 접촉점 P(현행절점)로부터 커터 원호를 둘러싸는 최근접 내부루프(inside loop)와 외부루프(outside loop)를 구하고 이를 진행하는 과정에서 커터원호와 교차하는 횡단 에지들의 양단 절점 리스트들을 결정하고 내부루프가 둘러싸고 있는 모든 점들을 결정한 후 간섭을 6가지 유형으로 정의하고 z값을 결정한다.

(1) 간섭유형 1

내부루프 내부에 존재하는 점들 중에서 최대점이 내부루프 최대점과 외부루프 최대점보다 동시에 큰 경우(Fig. 3) 커터의 간섭이 내부에서 일어나는 것으로 인정하고 이 최대 내부높이값을 커터의 결과 높이값으로 결정하였다.

(2) 간섭유형 2

횡단에지의 내부점(loopnodein)이 횡단에지의 외부점(loopnodeout) 보다 높고 현행점(stnode)보다 큰 경우(Fig. 4) 간섭으로 인정한다.

(3) 간섭유형 3

Fig. 4에서 횡단에지의 교차점의 높이값이 현행점의 높이값보다 큰 경우 간섭으로 인정한다.

이 유형의 간섭은 곡면 전반에 걸쳐서 존재하는 일반적인 간섭이다. 본 연구에서는 이 간섭이 곡면을 이루는 삼각패치가 면으로 구성이 된 이유로 기하학적 형상오차에 의해 생기는 불완전 간섭으로 간주하고 현행점에 대하여 결과 높이값이 결정되기 이전에 전체적인 곡면형상이 변하지 않는 범위에서 현행점의 z(value)값에 패치 간격의 약 10%이내의 값을 더함으로서 이 불완전 간섭을 털어 내고 나머지 잔여 간섭에 대해서는 2차 CL-data를 생성하는 과정에서 공구의 직경을 줄여서 제거했다. 그 후 2과정과 3과정을 현행점에서 생성된 모든 교차점에 대하여 조사한 다음 여기서 결정된 높이값을 결과 높이 값으로 하고 이를 다시 내부루프 최대점과 비교하여 큰 값을 최종 결과 높이 값으로 한다.

(4) 간섭유형 4

함몰점에서 부터 모든 절점에 대한 거리값(xy-평면)을 구하여 공구 반경보다 작을 경우는 간섭이 생기는 것으로 취

급한다. 이 때의 높이값은 간섭체크 유형 3번에 의해서 결정된다.

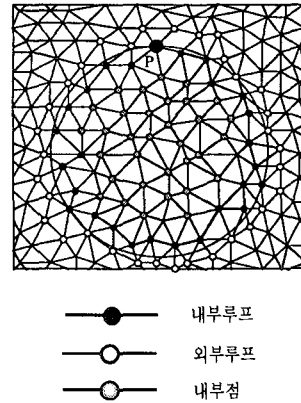


Fig. 2 Built-up interference check using z-map

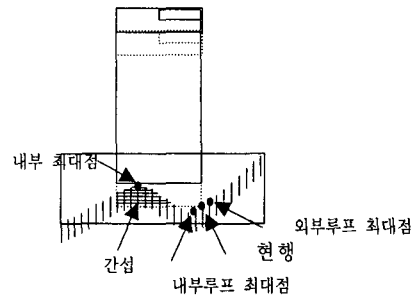


Fig. 3 Configuration for a type of Gouge_1

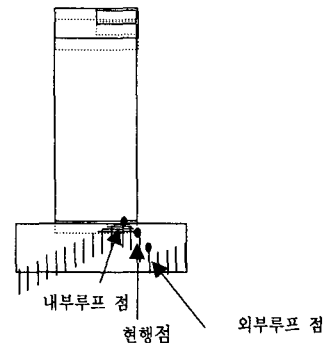


Fig. 4 Configuration for a type of Gouge_2

(5) 간섭유형 5

함몰점 이외에 공구직경으로 인하여 오목한 부분이 가공이 안 되는 영역(예, 타원형의 양끝)이다. 이 때의 높이값은 간섭체크 유형 3번에 의해서 결정된다. 간섭체크 유형 4번과 5번의 경우는 높이값이 간섭체크 유형 3번의 경우에 의해서 결정되지만 다단계 가공을 위해 2차 NC-data를 생성할 경우 유형별 가공을 위해서 분류한다.

(6) 간섭유형 6

이 간섭의 경우는 모든 경로리스트의 결과가 나온 후 각각의 가공경로에서 현행 절점(P)의 높이값이 이전 절점(P') 높이값 보다 작은 경우 최대경사선의 정의에 위배되므로 이를 간섭으로 간주하고 이 현행점의 높이값을 이전점의 높이값으로 취하였다.

위의 6가지 간섭 중에서 불룩한 복합곡면의 교차부(에지)에 생기는 미절삭체적은 주로 간섭유형 3번에 의해서 체크된다. 반대로 오목한 곡면에 생기는 미절삭체적의 간섭은 주로 간섭유형 4번과 5번에 의해서 체크된다. 이러한 간섭은 공구의 직경과 곡면형상과의 관계로 생기는 간섭이므로 공구의 직경을 작게 함으로써 미절삭체적을 줄일 수 있다.

4. 적용 실험 및 고찰

본 알고리즘의 실용성 여부 및 최대경사방향 트리추적법을 이용한 다단계 가공의 적용성능을 평가하기 위해 타원형 복합곡면의 교차부위에 대한 평가실험을 실시해 보았다. 크기는 60×60×10mm이고 삼각형요소화 과정에서의 grid 크기는 1.68mm이다. 곡면형상은 Fig. 9, 10에서 보이는 바와 같다.

Fig. 11은 $\phi 12\text{mm}$ 평엔드밀을 사용하여 1차 가공할 경우 발생하는 간섭인데 보이는 바와 같이 복합곡면의 교선부위 4곳에서 미절삭체적을 나타낸다. Fig. 12는 $\phi 4\text{mm}$ 평엔드밀로 2차 가공할 경우 생기는 미절삭체적을 나타내는데 1차 가공때 보다 미절삭체적이 줄어든 것을 확인할 수 있다. Fig. 13에서는 최대경사방향 트리추적법을 적용하여 얻어진 커터경로(커터와 곡면의 접촉점들로 표현)를 나타내고 있으며 정점을 향해 최대경사방향선을 따라서 가공경로가 형성된다.

Fig. 14에서는 1차 가공 후 남아있던 교선 부위의 미절삭체적에 대한 2차 가공경로를 보여 주고 있으며, Fig. 17은 실제 가공 결과이다.

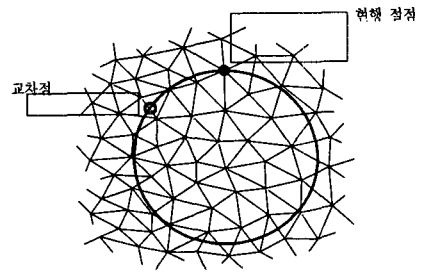


Fig. 5 Abnormal gouging type of Gouge_3

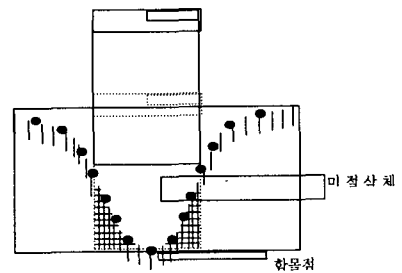


Fig. 6 Gouging at sink point

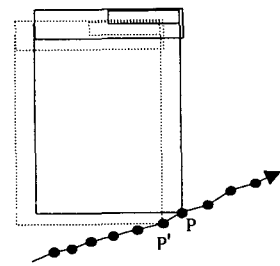


Fig. 7 Traditional type of steepest directed upward path

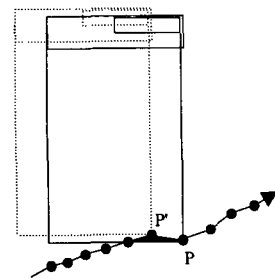


Fig. 8 Non-traditional type

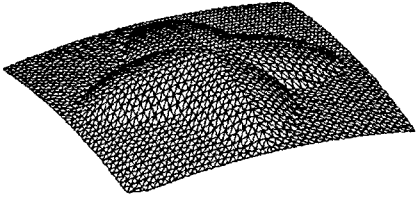


Fig. 9 Model configuration and geometric forms at each node

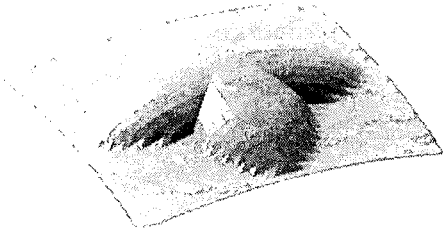


Fig. 10 Rendered display model configuration

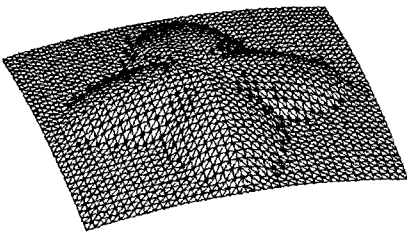


Fig. 11 Gouge notation in the case of using $\phi 12\text{mm}$ flat end mill

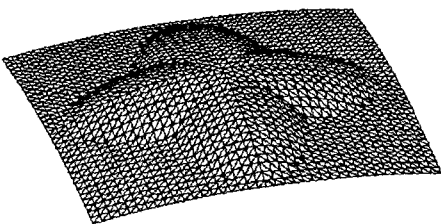


Fig. 12 Gouge notation in the case of using $\phi 4\text{mm}$ flat end mill

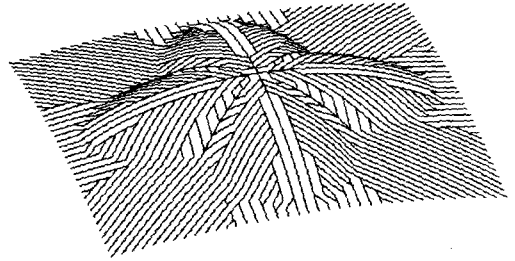


Fig. 13 Primary-stage cutter pathways expressed by cutter contact points

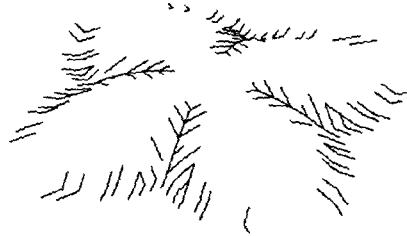


Fig. 14 Secondary-stage cutter pathways expressed by cutter contact points

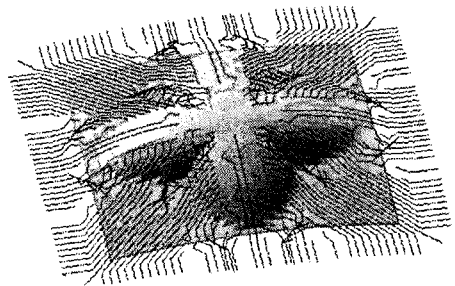


Fig. 5-15 Primary-stage cutter pathways expressed by cutter center location

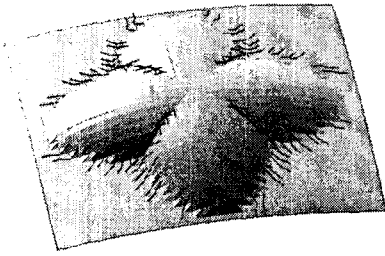


Fig. 16 Secondary-stage cutter pathways expressed by cutter center location

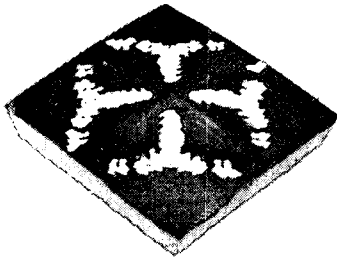


Fig. 17 Machined workpiece by secondary-stage paths

5. 결 론

본 연구에서는 곡면형을 삼각형요소화 모델로 近似시키고 최대경사방향 트리추적법에 입각하여 CL-data를 산출하는 과정에서 간섭을 6가지 유형으로 분류하여 체계화하였다. 또한 이러한 간섭에 의해 생기는 미절삭부분을 최소화하고자 시도 결과 다음 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 삼각형요소화된 각 절점의 높이값을 구하는 과정에서 공구간섭으로 인한 미절삭체적의 데이터를 얻어냈고 이 영역을 2차 가공함으로써 미절삭체적을 최소화할 수 있었다.

(2) 연구결과를 가시화 하는 과정에서 개발된 소프트웨어를 통해 여러 가지 간섭유형 및 삼각형을 구성하고 있는 모든 절점에 대한 기하학적성질을 파악 할 수 있었고, 곡면을 가공하기 전에 Simulation을 통해 간섭을 최소화 할 수 있는 적절한 공구직경을 선택할 수 있었다.

(3) 볼엔드밀에 비하여 여러 가지 잇점 때문에 평엔드밀

로 가공을 하였으나 평엔드밀의 절삭부위 특성상 평엔드밀의 직경보다 더 작은 오목한 부위는 가공할 수 없었다. 그러므로 볼엔드밀에 의한 가공이나 방전가공 등 다른 後 가공을 필요로 한다.

(4) 다단계가공에서 공구를 교체할 때 발생하는 기계적오차에 의해서 가공표면에 흔적(패임, 단차등..)이 남는데 이것은 공구의 길이보정 및 직경보정의 측정오차와 기계의 접촉오차에 의하여 발생하는 현상이므로 측정 및 기계조작숙련에 따라 줄일 수 있다.

참고문헌

- [1] Vickers, G. W. and Quan, K. W., 1989, "Ball-Mills Versus End-Mills for Curved Surface Machining", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 115, Nov., pp. 424~431.
- [2] Ralph-Id, W. L. and Loftus, M., 1992, "Cusp Geometry Analysis in Free-Form Surface Machining", Int. J. of Production Research, Vol. 30, No. 11, pp. 2697~2711.
- [3] Catania, G., 1992, "A Computer-Aided Prototype System for NC Rough Milling of Free-Form Shaped Mechanical Part-Pieces", Computers in Industry, Vol. 21, pp. 275~284.
- [4] Suh, Y. S. and Lee, K., 1990, "NC Milling Tool Path Generation for Arbitrary Pockets Defined by Sculptured Surfaces", Computer Aided Design, Vol. 22, No. 5, pp. 273~284.
- [5] Li, S. X. and Jerard, R. B., 1994, "5-Axis Machining of Sculptured Surfaces with a Flat-End and Ball-End Cutter", Computer Aided Design, Vol. 26, No. 3, pp. 165~178.
- [6] 맹희영, "최대 경사방향 트리를 이용한 삼각형요소화 곡면모델의 NC 엔드밀링가공에 관한 연구", 대한기계학회지, Vol. 9, 1994. Computers in Industry, Vol. 21, pp. 275~284.