

< 논문 >

## 오프셋 다면체를 이용한 5축 가공경로 생성

김수진<sup>†</sup> · 양민양<sup>\*</sup>

(2005년 11월 24일 접수, 2006년 4월 4일 심사완료)

### 5-Axis Tool Path Generation from Offset Polyhedral Mesh

Su-Jin Kim and Min-Yang Yang

**Key Words :** 5-Axis Tool Path(5축 가공경로), Interference(간섭), Offset Mesh(오프셋망), Polyhedral Mesh(다면체)

#### Abstract

In this paper, the 5-axis tool path that has been generated from the original surface is newly generated from the offset polyhedral mesh. In this approach, the interference check between two solid models can be simplified to that of offset polyhedral mesh and axis line. The tool path computation and interference check based on the offset mesh is simpler and faster than that based on the original surface. But 5-axis tool path generation using this approach is able to apply only for ball endmill and still takes longer time than 3-axis tool path generation.

#### 1. 서론

5축 가공은 3축 가공에 비해 가공 면의 품질이 좋고 터빈과 같이 복잡한 모델도 한 번에 가공할 수 있어 선박, 항공, 기계가공에 이용되고 있다. 곡면을 평엔드밀로 5축 가공할 경우에 3축 가공하는 것보다 더 빨리 더 깨끗한 표면을 얻을 수 있다.<sup>(1-3)</sup> 또한 소재를 수회 회전해 고정해야 가공이 가능한 터빈과 임펠러 등도 한번만 물려 모든 면을 가공해 낼 수 있다.<sup>(4-6)</sup>

이렇게 많은 장점을 가지고 있는 반면 NC 데이터를 생성하기 위한 과정은 아주 복잡하다. 기존 논문들에서 5축 가공경로 생성은 공구와 모델이 만나는 접촉점을 결정하는 단계, 공구와 소재 간의 간섭이 발생하지 않는 공구의 자세를 결정하는 단계 그리고 NC 코드로 출력하는 단계로 이루어져 있다. 그 중에 공구와 모델 간에 간섭이 발생하지 않는 자세를 결정하는 단계가 가장 중요해서 지금까지 Bounding Volume 방법,<sup>(7,8)</sup> C-Space 방법<sup>(9,10)</sup>

그리고 Visibility 체크 방법<sup>(11-13)</sup> 등이 연구되어왔다.

3축 가공에서는 쾌속조형에 많이 이용되고 있는 STL 모델을 공구 반경만큼 오프셋하고, 오프셋 다면체 망과 연속된 평면 들의 교선을 계산해 NC 데이터를 생성하는 방법이 많이 연구되었다.<sup>(14-17)</sup> 또한 STL 모델을 오프셋하는 다양한 방법이 연구되었으며,<sup>(15,17-20)</sup> 상용 CAM 시스템에도 다면체 모델을 이용한 NC 데이터를 생성 방법이 이용되고 있다.

하지만 다면체 망을 오프셋해 가공경로를 생성하는 위 방법이 5축 가공에는 적용되고 있지 않아 새로운 연구가 필요하다. 본 논문에서는 다면체 모델을 공구 반경만큼 오프셋해서 5축 가공경로를 생성하는 새로운 알고리즘을 고안하고 C++ 언어로 구현하며 시뮬레이션을 통해 검증하고자 한다.

#### 2. 5축 가공과 오프셋 다면체

##### 2.1 3축 가공과 오프셋 다면체

STL 파일은 삼각형 면들로 이루어진 모델로 쾌속 조형과 NC 가공에 많이 이용되고 있다. 간섭이 없는 3축 가공경로를 생성하기 위해서 다면체 모델을 오프셋하고 연속된 면들과의 교선 중에 가장

† 책임저자, 회원, 경상대학교 기계항공공학부, 공학연구원  
E-mail : sujinkim@gnu.ac.kr

TEL : (055)751-6075 FAX : (055)762-0227

\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

높은 선을 선택하는 CL(공구위치)면 기반의 가공 경로 생성방법이 연구되었다.<sup>(14-17)</sup> STL 파일은 면이나 꼭지점을 법선 방향으로 공구 반경만큼 이동해 읍셋 하게 되며, 이동 방향과 크기를 조정해 다양한 공구에 대한 CL 면도 계산할 수 있다.<sup>(15,17-20)</sup>

### 2.2 5 축에서 CL 면

공구 축이 Z 축과 일치하는 3 축과는 달리 5 축에서는 공구의 자세가 고정되어 있지 않기 때문에 일반적인 공구에 대한 CL 면이 존재하지 않는다. 예를 들어 라운드 엔드밀의 경우에 CL 점은 모델을 공구반경만큼 읍셋한 면과 코너반경만큼 읍셋한 면 사이에 존재하게 된다. 그렇기 때문에 5축 가공경로는 주로 디자인 모델에서 직접 생성되어 왔다.<sup>(7-13)</sup> 공구와 모델의 접촉점들을 먼저 계산하고 각 위치에서 간섭이 없는 최적의 자세를 여러 방법으로 결정한다. 모델과 공구 모두 3차원 데이터이기 때문에 간섭을 계산하는데 많은 시간이 소요되고 있다.

그렇지만 볼엔드밀의 경우에는 공구반경과 코너반경이 일치함으로 공구의 자세에 관계없이 두 읍셋 면이 일치하게 된다. 이렇게 공구가 볼엔드밀인 경우는 5축 가공에서도 CL 면이 존재하므로 읍셋 다면체를 5축 가공에 적용할 수 있을 것이다.

### 2.3 읍셋망과 5축의 간섭체크

Fig. 1(a)와 같이 공구가 원통형이고 공구의 끝모양이 반구일 때, 다면체 모델을 공구반경 만큼 읍셋하고 공구를 안쪽으로 읍셋하면 모델은 읍셋망이 되고 공구는 축과 일치하는 직선이 된다. 공구와 모델의 위치 관계는 공구 축과 읍셋망의 위치 관계와 일치한다. 공구와 모델 간에 간섭이 없으면 축과 읍셋망이 만나지 않고, 공구가 모델과 접하면 축 직선 또한 읍셋망과 접하며, 공구와 모델에 간섭이 발생하면 축이 읍셋망을 관통하게 된다. 따라서 읍셋망을 이용하면 두 3차원 모델 간의 복잡한 간섭 계산을 3차원 모델과 직선과의 간섭 계산으로 단순화할 수 있다.

또한, 테이퍼형 공구와 모델의 간섭은 Fig. 1(c)와 같이 같은 테이퍼 각을 가진 콘과 읍셋망의 간섭과 같다. 따라서 테이퍼 엔드밀과 모델의 간섭을 읍셋망의 가시도 문제로 바꿀 수가 있다.

홀더와 모델의 간섭은 주로 가공 시뮬레이션에 의해서 검사되었다. 가공경로 생성 과정에서 홀더와 모델의 간섭이 검사되기도 했는데 이 때도 CL 점과 자세를 정한 다음에야 간섭이 검사 되었다.

홀더 역시 원통형이기 때문에 홀더와 모델의 간섭 역시 홀더 축과 읍셋망의 간섭으로 바꿀 수 있다. 이때 읍셋망은 모델을 홀더의 반경만큼 읍셋 해서 얻는다.

1차원 직선과 3차원 솔리드의 간섭 체크는 두 3차원 솔리드 모델의 간섭 체크보다 간단하므로 공구 축과 읍셋망의 간섭을 검사하는 새로운 방법이 공구와 모델의 간섭을 직접 검사하는 기존의 방법에 비해 빠르다. 기존에 간섭 계산 속도를 개선하기 위한 노력이 많이 있으므로 두 방법을 함께 사용하면 더욱 빠른 간섭 제거가 가능하다. 논문에서는 3차원 공간을 일정한 크기의 정육면체 공간들로 나누고 나뉜 공간에 있는 삼각형 면들을 저장해 직선과 간섭을 검사해야 하는 삼각형의 수를 줄였다. 이 때 읍셋망을 이루는 삼각형의 전체 수가 증가하더라도 분할된 정육면체 공간에 있는 삼각형의 평균 수는 일정하도록 하기 위해서 분할 간격은 분할된 정육면체의 수가 삼각형 면의 수에 비례하도록 하였다.

### 2.4 5축 NC 코드 생성

공구의 끝 모양이 볼엔드밀인 경우에 읍셋망을 이용해 공구 경로를 얻을 수 있으며 간섭이 없는 공구의 자세를 결정할 수 있음을 알았다. 또한, 그 방법은 공구 위치 점을 먼저 결정하고 간섭이 없는 자세를 찾았던 기존 알고리즘과 크게 다르다.

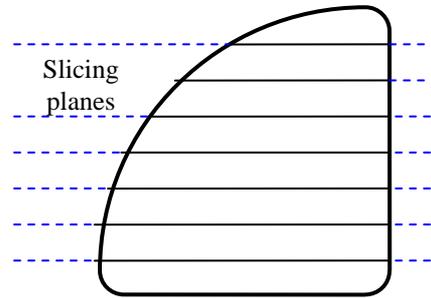
제안된 읍셋 다면체 망 기반의 5축 가공경로 생성 방법을 C++ 언어와 OpenGL 라이브러리로 구현하였으며 검증을 위해 Voxel 방식의 시뮬레이션 프로그램을 함께 개발하였다. 개발된 소프트웨어는 STL 파일을 입력 받아 다음 단계를 통해 5축 NC 코드를 생성하고 시뮬레이션 한다.

읍셋 다면체 망을 이용한 5축 가공경로 생성방법의 흐름도는 Fig. 2와 같다. 먼저 CAD 시스템에서 생성된 STL 파일을 입력 받아 꼭지점의 다중법선 벡터를 이용한 읍셋 방법으로 읍셋 다면체 망을 만든다.<sup>(14)</sup> 둘째로 Fig. 1(b)와 같이 서로 평행인 여러 평면과 위에서 계산된 읍셋 다면체 망의 교선을 계산해 초기 공구 경로를 얻는다. 공구의 초기 자세는 면의 법선 벡터와 공구의 이송방향을 이용해 초기화한다. 여기서 생성된 공구경로와 자세는 간섭이 제거되지 않은 상태로 간섭이 없을 때까지 자세를 바꾸어 가며 간섭 여부를 검사한다. 이때 기존 방법처럼 모델과 공구의 간섭을 직접 검사하지 않고 Fig. 1(a)와 같이 읍셋 망과 공구 축 직선의 간섭을 검사해 간섭이 없는 공구 자세를 빠르게 계산한다. 이렇게 간섭이 없는 자세를 결정하며 모든 방향에서 간섭이 발생하는 경로는 삭

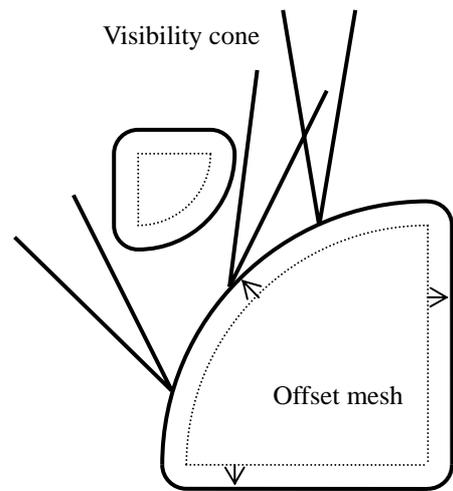
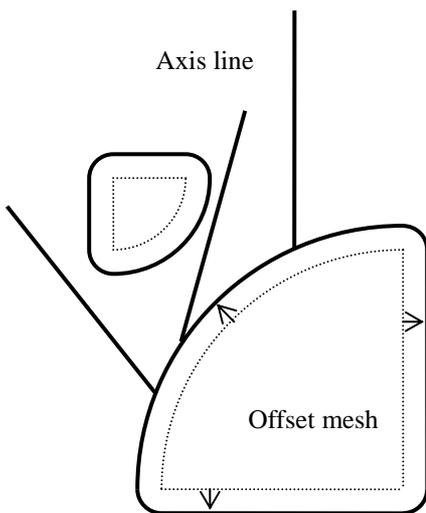
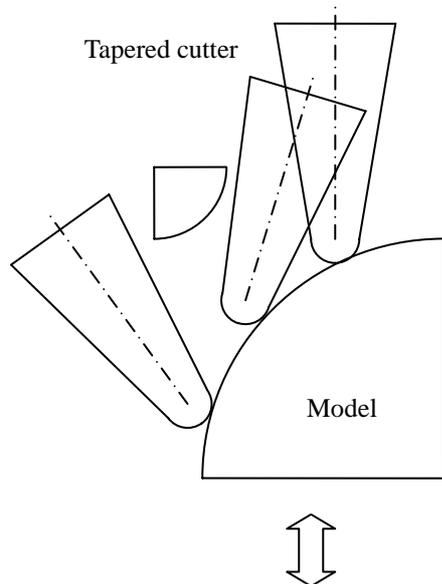
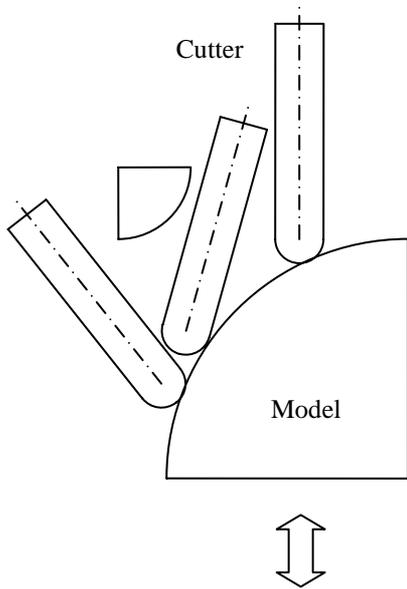
제한다. 이렇게 생성된 간섭이 없는 5축 가공경로는 NC 코드로 출력된다.

2.5 5축 시뮬레이션

위 알고리즘으로 생성된 5축 NC 데이터를 검증하기 위해서 Voxel 기반의 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 일반적으로 3축 시뮬레이션은 Z-map 이 이용되고 5축 시뮬레이션은 Dexel 이나 Voxel 이 이용되는데, 3차 배열을 이용하는 Voxel 은 데이터 크기가 길이의 세제곱에 비례하는 단점이 있지만 구현이 간단한 장점을 가진다.



(b) Slice by planes



(a) Interference between cutter and model is same to interference between offset mesh and axis line

(c) Interference between tapered cutter and model is same to that of offset mesh and visibility cone

Fig. 1 Offset polyhedral mesh based interference check

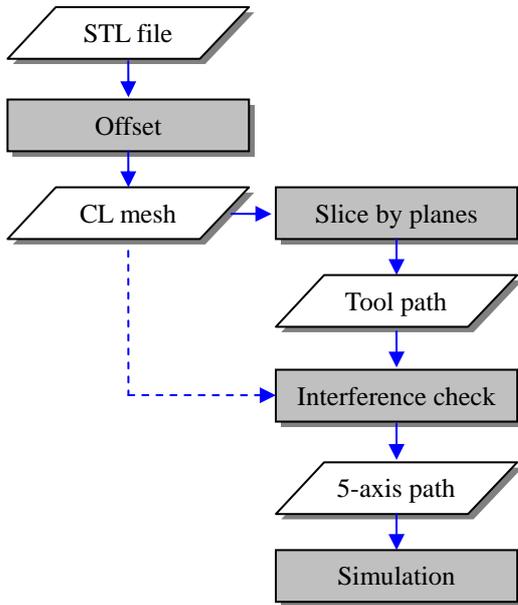


Fig. 2 Flow chart of the offset mesh based 5-axis tool path generation algorithm

### 3. 적용 결과

구현된 시스템을 검증하기 위해서 세 구멍을 가진 속이 빈 구와 손잡이 모양의 모델에 대해 각각 가공경로를 생성하고 검증 시물레이션하였다. 또한, 논문에서 제안된 오프셋다면체 망을 이용한 5축 가공경로 생성 방법을 삼각형 망에서 직접 5축 경로를 생성하는 기존방법과 비교하였다.

#### 3.1 속이 빈 구

Fig. 3(a)와 같이 세 개의 구멍을 가지는 속이 빈 구를 가공하기 위해서는 5축 가공이 필수적이다. 이때 가공 가능한 자세는 수동으로 결정하기 어려우므로 간섭 체크를 통해서 자동으로 결정되어야 한다. 이 모델은 상용 CAD 시스템에서 디자인되고 4,445 개의 삼각형으로 구성된 STL 파일로 출력되었다. 이 삼각망은 Fig. 3(b)와 같이 공구반경 10mm 만큼 오프셋 되었다. 연속된 수평면으로 오프셋 망을 잘라 직선 가공경로들을 얻고 제안된 바와 같이 공구 축 직선과 오프셋면 사이의 간섭을 검사해서 진입이 가능한 공구 자세를 결정하였다. 결과적인 공구 경로와 자세를 Fig. 3(c)에서 볼 수 있다. 연산시간은 CPU 속도 2.4 GHz 이고 메모리 512MB 인 펜티엄 4 PC 에서 약 2분 26초가 소요되었다. Fig. 3(d)의 시물레이션 결과는 위 방법으로 생성된 5축 경로에 간섭이 없음을 보여준다.

Table 1 Comparison of computation time

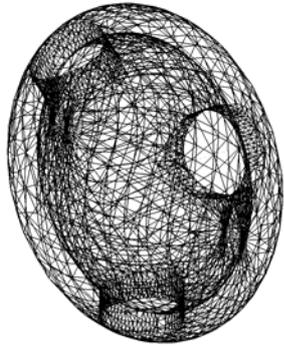
Model	Sphere	Handle
Number of faces	4,445	23,779
Offset mesh (5-axis)	146 s	25 s
STL direct (5-axis)	213 s	117 s
Offset mesh (3-axis)	0.6 s	1.4 s

#### 3.2 손잡이

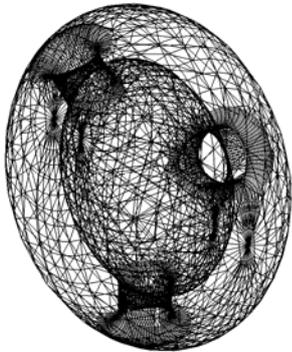
손잡이 모델에서 간섭이 없는 자세를 소개된 방법으로 결정한 5축 가공경로가 Fig. 4와 같이 생성되었다. 상용 CAD 시스템에서 디자인된 곡면 모델을 허용오차 0.01mm 이내에서 223,779 개의 면을 가지는 STL 모델로 바꾸었다. Fig. 4(a)는 STL 모델과 직경 6mm 인 볼엔드밀을 보여주고 있는데, 두 3 차원 모델의 간섭은 Fig. 4(b)와 같이 오프셋망과 공구 축 직선과의 간섭과 같다. 오프셋망과 연속된 수직면의 교선을 얻고 간섭이 없는 공구의 자세를 결정해 25 초의 연산시간으로 Fig. 4(c)와 같은 5축 가공경로를 얻었다. Fig. 4(d)의 가공시물레이션 결과는 제안된 방법을 이용해 생성된 5축 가공경로에 간섭이 없음을 보여준다.

#### 3.3 결과

적용 실험에서 속이 빈 구와 손잡이 모델의 5축 가공경로가 빠르게 생성되었다. Table 1은 제안된 오프셋망을 이용한 5축 가공경로 생성 방법과 기존의 직접적인 5축 가공경로 생성 방법 그리고 오프셋망을 이용한 3축 가공경로 생성 방법의 연산시간을 각각 비교하였다. 5축 가공에서는 오프셋망을 이용해 가공경로를 생성하고 간섭을 제거하는 것이 STL 모델에서 직접 가공경로를 생성하고 공구와의 간섭을 제거하는 것보다 구 모델에서는 31% 손잡이 모델에서는 78% 빠름을 알 수 있다. 모델에 따라 차이가 나는 것은 오프셋으로 증가하는 삼각형의 숫자가 다르고 간섭 계산의 횟수가 형상에 따라 달라지기 때문이다. 공구의 자세가 고정된 3축 가공경로 생성에 비해서는 연산 시간이 아주 오래 걸림을 알 수 있는데, 이것은 간섭 검사를 통해서 공구의 자세를 결정하는 단계에서 긴 연산 시간이 소요되기 때문이다.



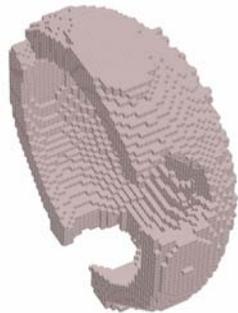
(a) STL model (4,445 faces)



(b) Offset mesh (offset 5 mm)

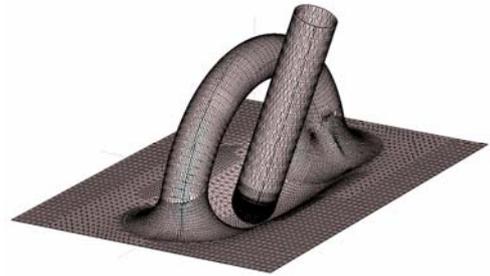


(c) 5-axis tool path with orientation (146s)



(d) Simulation result (voxel)

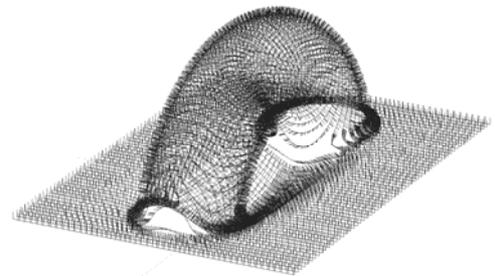
**Fig. 3** Offset polyhedral mesh based 5-axis tool path of hollow sphere



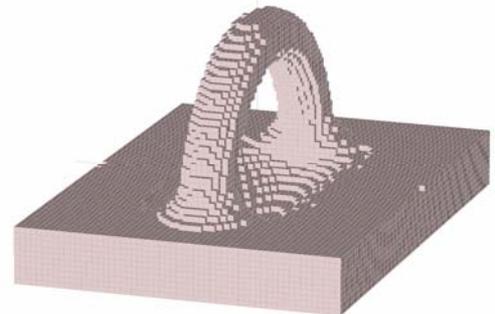
(a) STL model(23,779 faces) and endmill



(b) Offset mesh(offset 3 mm) and axis line



(c) 5-axis tool path with orientation(25 s)



(d) Simulation result(voxel)

**Fig. 4** Offset polyhedral mesh based 5-axis tool path of handle

#### 4. 결 론

본 논문에서는 공구 형상이 불엔드밀인 경우에 5축에서도 3축과 마찬가지로 모델을 공구 반경만큼 읍셋한 후 가공경로 생성할 수 있음을 보이고 삼각형 망 모델에 대해 구현되었다. 실험에서 읍셋을 통한 5축 가공경로 생성 방법으로 간섭이 없는 공구경로를 생성하고 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 모델과 공구의 간섭을 직접 검사하는 것보다 읍셋망과 축 직선의 간섭을 검사하는 것이 더 효율적임을 보였다.

하지만, 제안된 읍셋망 기반의 5축 가공경로 생성 방법은 공구 끝 형상이 구인 경우에만 적용가능하다는 단점이 있으며 아직 3축 가공경로에 비해서는 연산 시간이 아주 오래 걸린다.

#### 후 기

“이 논문은 2005년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.” (KRF-2005-214-D00013)

#### 참고문헌

(1) Marciniak, K., 1987, “Influence of Surface Shape on Admissible Tool Positions in 5-Axis Face Milling,” *Computer Aided Design*, 19(5), pp. 233~236.

(2) Baptista, R. and Simoes, J.F.A., 2000, “Three and Five Axes Milling of Sculptured Surfaces,” *Journal of Materials Processing Technology*, 103(3), pp. 398~403.

(3) Gray, P., Bedi, S., Ismail, F., Rao, N. and Morphy, G., 2001, “Comparison of 5-Axis and 3-Axis Finish Machining of Hydroforming Die Inserts,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17(8), pp. 562~569.

(4) Cho, H. Y., Jang, D. K., Lee, H. K. and Yang, G. E., 2003, “A Study on Efficient Roughing of Impeller with 5-Axis NC Machine,” *Transactions of the KSME A*, 27(11), pp. 1917~1924.

(5) Piao, C. D., Lee, C. S., Cho, K. Z. and Park, G. R., 2004, “Automatic NC-Data Generation Method for 5-axis Cutting of Turbine-Blades by Finding Safe Heel-Angles and Adaptive Pathe-Intervals,” *KSME International Journal*, 18(5), pp. 753~761.

(6) Young, H.T. and Chuang, L.C., 2003, “An Integrated Machining Approach for a Centrifugal Impeller,” *The International Journal of Advanced Manufacturing*

*Technology*, 21(8), pp. 556~563.

(7) Sing, S., Mannan, M. A. and Poo, A.N., 2004, “Oriented Bounding Box and Octree Based Global Interference Detection in 5-Axis Machining of Freeform Surfaces,” *Computer Aided Design*, 36(13), pp.1281~1294.

(8) Ho, S., Sarma, S. and Adachi, Y., 2001, “Real-Time Interference Analysis Between a Tool and an Environment,” *Computer Aided Design*, 33(13), pp. 935~947.

(9) Morishige, K., Takeuch, Y. and Kase, K., 1999, “Tool Path Generation Using C-Space for 5-Axis Control Machining,” *ASME*, 121, pp. 144~149.

(10) Jun, C. S., Cha, K. D. and Lee, Y. S., 2003, “Optimizing Tool Orientations for 5-Axis Machining by Configuration-Space Search Method,” *Computer Aided Design*, 35, pp. 549~566.

(11) Yang, W., Ding, H. and Xiong, Y., 1999, “Manufacturability Analysis for a Sculptured Surface Using Visibility Cone Computation,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15(5), pp. 317~321.

(12) Balasubramanian, M., Laxmiprasad, P., Sarma, S. and Shaikh, Z., 1999, “Generating 5-Axis NC Roughing Paths Directly from a Tessellated Representation,” *Computer Aided Design*, 32, pp. 261~277.

(13) Balasubramanian, M. and Sarma, S. E., 2003, “Collision-Free Finishing Toolpaths from Visibility Data,” *Computer Aided Design*, 35, pp. 359~374.

(14) Kim, S. J. and Yang, M. Y., 2005, “Triangular Mesh Offset for Generalized Cutter,” *Computer Aided Design*, 37, pp. 999~1014.

(15) Jun, C. S., Kim, D. S. and Park, S. H., 2003, “A New Curve-Based Approach to Triangle Machining,” *Computer Aided Design*, 34(5), pp. 379~389.

(16) Park, S. C., 2004, “Sculptured Surface Machining Using Triangular Mesh Slicing,” *Computer Aided Design*, 36(3), pp. 279~288.

(17) Kim, S. J. and Yang, M. Y., 2005, “Uniform Scallop Height Tool Path Generation Using CL Surface Deformation,” *Transactions of the KSME A*, 29(6), pp. 895~903.

(18) B. K. and Lee, Y. S., 2002, “Non-Uniform Offsetting and Hollowing Objects by Using Biarcs Fitting for Rapid Prototyping Process,” *Computers in Industry*, 47, pp. 1~23.

(19) Qu, X. and Stucker, B., 2003, “A 3D Surface Offset Method for STL-Format Models,” *Rapid Prototyping Journal*, 9(3), pp. 133~141.

(20) Kim, S. J., Lee, D. Y. and Yang, M. Y., 2004, “Offset Triangular Mesh Using the Multiple Normal Vectors of a Vertex,” *Computer-Aided Design and Applications*, 1(1-4), pp.285~292.