

< 논문 >

불완전한 2 차원다양체 메시기반 공구경로생성

이동윤[†] · 이성근^{*} · 김수진^{**} · 양민양^{***}

(2004 년 10 월 11 일 접수, 2005 년 1 월 18 일 심사완료)

Incomplete 2-manifold Mesh Based Tool Path Generation

Dong-yoon Lee, Sung-gun Lee, Su-jin Kim and Min-yang Yang

Key Words : Tool Path Generation(공구경로생성), Incomplete 2-Manifold Mesh(불완전한 2 차원다양체 메시), Offset(오프셋), Grid Method(그리드방법)

Abstract

This paper presents a new paradigm for 3-axis tool path generation based on an incomplete 2-manifold mesh model, namely, an inexact polyhedron. When geometric data is transferred from one system to another system and tessellated for tool path generation, the model does not have any topological data between meshes and facets. In contrast to the existing polyhedral machining approach, the proposed method generates tool paths from an incomplete 2-manifold mesh model. In order to generate gouge-free tool paths, CL-meshes are generated by offsetting boundary edges, boundary vertices, and facets. The CL-meshes are sliced by machining planes and the calculated intersections are sorted, trimmed, and linked. The grid method is used to reduce the computing time when range searching problems arise. The method is fully implemented and verified by machining an incomplete 2-manifold mesh model.

1. 서 론

공구경로생성(tool path generation)이란 제품을 구성하고 있는 디자인곡면(design surface)의 기하학적인 데이터와 가공여유, 가공정밀도 등의 가공계획이 주어졌을 때, 연속적인 공구위치점(cutter location point; CL-point)을 계산하는 과정을 의미한다. 공구경로생성은 매우 어려운 작업이며, 1980 년대 이후로 많은 연구자들에 의해서 다루어져 왔다. 공구경로생성 방법은 공구접촉기반방법(CC-based method)과 공구위치기반방법(CL-based method)으로 나뉘어진다.⁽¹⁾ Fig. 1 은 공구반경이 R 인 불엔드밀의 경우 공구접촉점과 공구위치점을 보여주고 있다. 공구접촉기반방법에서는 공구와 곡면이 접촉하는 점을 먼저 계산하여 추출해 낸후 그 점으로부터 공구위치점을 계산하게 되며, 비교적 정확한

결과를 얻을 수 있다. 그러나, 공구와 곡면 사이의 간섭 문제가 발생하며, 이러한 간섭을 찾아내거나 수정하는 것은 어려운 문제이다.^(2,3) 이러한 간섭문제를 해결하고자, Z. Han 등은 공구경로를 생성하기 이전에 공구의 간섭 영역을 찾아서 제거하였다.⁽⁴⁾ 반면, 공구위치기반방법에서는 디자인곡면으로부터 공구위치면(CL-surface)을 생성한 후 계산된 공구위치면으로부터 공구경로를 생성한다. 공구위치면은 공구가 디자인곡면을 미끄러져 지나갈 때 공구위치점의 궤도를 뜻하며 3 차원 밀링가공에 있어서, 공구위치면을 생성한 후 공구경로를 생성할 경우 공구의 간섭을 제거할 수 있다.⁽⁵⁾

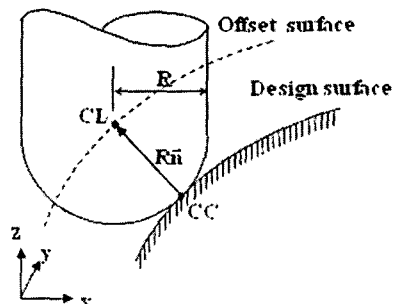


Fig. 1 CC-point and CL-point

[†] 책임저자, 회원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과
E-mail : daniel.lee@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3264 FAX : (042)869-3210

^{*} 한국과학기술원 대학원 기계공학과

^{**} 회원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과

^{***} 회원, 한국과학기술원 기계공학과

최근의 상용 캠(CAM) 소프트웨어 시스템은 디자인곡면과 공구위치면을 표현하고 공구경로를 생성하기 위해서 삼각형등의 다각형으로 이루어진 메시모델을 사용하고 있다. Duncan 과 Mair 의 다면체가공(polyhedral machining)은 공구경로를 생성하기 위해서 메시지를 이용한 최초의 시도였다.⁽⁶⁾ C.S. Jun 등은 다면체모델로부터 공구위치면을 생성하기 위해서, 주어진 다면체모델의 위상학적인 정보와 기하학적인 성질을 이용하여 모델을 오프셋하는 방법을 제안하였다.⁽⁷⁾ J.S.Hwang 등은 이 방법을 평엔드밀(flat endmill)과 필렛엔드밀(filleted endmill)과 같은 구면이 아닌 형태의 공구로 확장하였다.⁽⁸⁾ 공구위치면을 생성하기위해서 M.Inui 는 역공구오프셋(inverse tool offset) 방법 및 다각형 렌더링 하드웨어를 이용하여 숨겨진 면을 제거하는 방법을 사용하였다.⁽⁹⁾ 그러나, 언급된 방법들은 2 차원 다양체 조건을 만족하는 다면체모델에만 적용이 가능하였다. 본 논문은 디자인곡면들 사이의 위상학적인 정보 및 메시지를 구성하고 있는 면(facet)들 사이의 위상학적인 정보를 갖고 있지 않은 불완전한 다면체모델, 즉 불완전한 2 차원 다양체 메시모델로부터 공구경로를 생성하는 방법을 제안하고 있다. 이 방법은 크게 3 단계로 구성되었으며, 가공하고자하는 제품과 가공조건이 선정되면, 디자인곡면을 삼각형 혹은 사각형으로 구성되는 메시로 나누는 단계를 거쳐서 공구위치메시(CL- mesh)를 생성한 후 생성된 공구위치메시를 가공면(machining plane)으로 절단하여 최종적으로 원하는 공구경로를 생성하게 된다. 곡면을 메시로 생성하는 방법에 대해선 많은 연구가 진행되어 왔으므로, 본 논문에서는 다루지 않는다.^(10,11)

2 장에서는 이(異)기종시스템간에 기하학적인 데이터가 전달될 때 야기되는 문제점들을 간략히 설명한 후 불완전한 2 차원 메시에 대해서 설명하였다. 공구위치메시를 생성하는 방법에 대해서 3 장에 소개한 후 효율적인 공구경로생성을 위해서 사용한 그리드방법(grid method)에 대해서 4 장에서 설명했으며, 제안된 공구경로생성방법을 PC 상에서 구현하였고 예제를 통하여 검증하였다.

2. 불완전한 2 차원 다양체메시

2.1 이기종시스템간의 데이터 전달

금속가공산업분야에서 수많은 CAD/CAM 소프트웨어 시스템이 전세계적으로 사용되고 있다. 이러한 시스템은 서로 다른 그래픽커널(graphic kernel)을 기반으로 개발되고 있으며, 그로 인해서 기하학적인 데이터의 전달에 큰 문제를 야기하게 된다. 일반적으로 제품의 기하학적인 정보는 대부분의 경우 NURBS(non-uniform rational B-spline) 곡면으로 표현된다. 이러한 NURBS 곡면의 수학적인

표현은 매우 복잡하며 각각의 그래픽커널들은 서로 다른 방법으로 NURBS 곡면을 정의하고 있다. 이 분야에 대해 많은 연구가 진행되어왔고 데이터 전달 기술에 많은 진보가 있었음에도, 수학적인 표현이 서로 다르다는 원론적인 문제로 말미암아 많은 문제를 내포하게 된다. 기하학적인 데이터가 전달될 때 손실되는 면이 발생하기도 하고, 경계곡선이 꼬이는 경우도 있으며, 곡면들간의 겹침현상(overlapping)이 발생하기도 한다. 또한, 곡면들간에 틈이 생기기도 하며, 잘라내기(trim) 오차 및 접선(tangent) 불연속등의 문제가 발생하는 경우가 많다.⁽¹²⁾ 결국, 다른 시스템으로 전달된 데이터는 인접하고 있는 곡면들이 공유하고 있는 점이나 곡선이 정확히 일치해야한다는 2 차원 다양체 조건을 위배하게된다. 제품이 잘라낸 곡면을 많이 갖고 있거나 모델링내력이 복잡할수록 이러한 오류가 발생할 확률이 높다. 전달된 기하학적인 데이터가 위와 같은 오류를 갖게 되면, 기술자가 직접 이러한 오류를 수정해야하는 경우가 생기며, 종종 이러한 작업은 공구경로를 생성하는데 걸리는 시간보다 많은 시간과 경험을 필요로 한다.

2.2 불완전한 2 차원 다양체메시

메시로부터 공구경로를 생성하기위해서는 가공하고자 하는 모든 디자인곡면이 메시로 변환되어야 하는데, 이러한 변환작업은 일반적으로 주변의 곡면을 고려하지 않은채 각각의 곡면별로 이루어지게 된다. 결과적으로, 메시로 변환된 모델은 하나의 메시 안에서는 2 차원 다양체 조건을 만족하게되지만, 주변의 메시와 접하는 메시의 가장자리 부분에서는 이러한 조건을 만족시키지 못하게 된다. 즉, 변환된 메시모델은 불완전한 2 차원 다양체 메시로 구성되며, 이러한 모델은 다면체로 정의할 수 없다. Fig. 2 에서와 같이 CAD 시스템 A 에서 설계된 4 개의 면으로 구성된 제품이 다른 시스템 B 로 전달된다면, 전달 과정을 통해서 중심에 있는 하나의 점이 4 개의 점으로 나뉘어서 나타나게 된다. 대부분의 전달과정이 면단위로 이루어지기 때문에, 4 개의 면을 각각 전달하게 되면 각각의 면에 대해서 하나씩 총 4 개의 점이 생성되게 된다. 이기간에는 기하학적인 데이터를 다르게

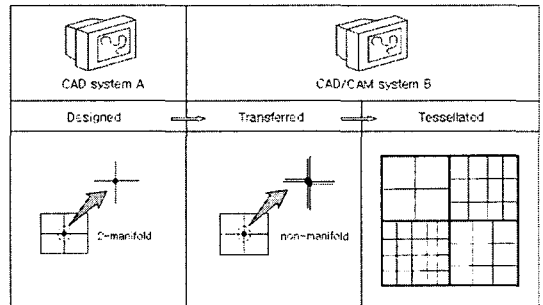
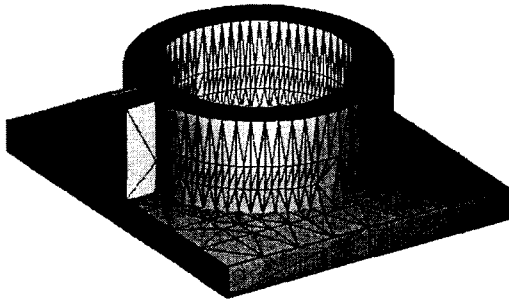


Fig. 2 Geometric data loss by transfer and tessellation

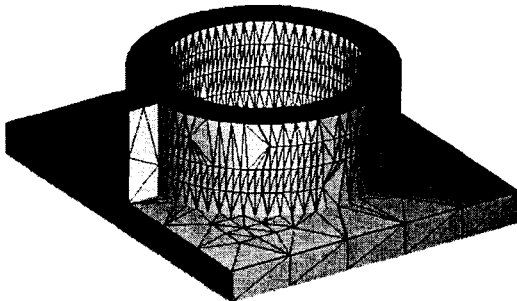
정의하고 있기 때문에 새로 생성된 4 개의 점이 수학적으로 완전히 일치하게 되지 않는 경우가 종종 발생하게 된다. 두 시스템간에 데이터 전달이 완벽하게 이루어 졌다고 가정해도 Fig. 2 에서와 같이 면을 메시로 변환하게 되면 결국 면이 서로 만나고 있는 가장자리부분에서는 메시지를 구성하고 있는 다각형들이 서로 일치하지 못하게 된다. 메시로 변환된 모델의 확대그림에서 보이는 바와 같이 하나의 면 안에서는 2 차원다양체 조건을 만족하는데 반해서, 두겹게 표시된 가장자리 부분에서는 이 조건을 만족하지 못하게 된다. 이러한 불완전한 2 차원다양체 메시들로부터 다면체를 생성하기 위해서는 위상정보구성(topology construction) 및 기하학적 치유(geometric healing) 등의 작업을 필요로 하게 된다. Fig. 3 은 불완전한 2 차원다양체 메시모델과 완전한 2 차원다양체 메시모델간의 차이점을 보여주고 있다. (a)에서는 하나의 메시의 가장자리부분에 위치하고 있는 꼭지점(vertex)과 모서리(edge)들이 인접한 다른 메시의 꼭지점과 모서리와 일치하지 않는데 반하여, (b)에서는 모든 꼭지점과 모서리들이 인접한 꼭지점과 모서리들을 공유하고 있다.

3. 공구위치메시

3.1 오프셋을 이용한 공구위치메시 생성 공구간섭이 제거된 공구경로를 생성하기 위해



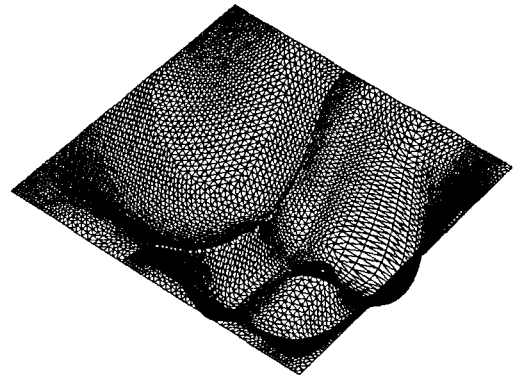
(a) Incomplete 2-manifold mesh model



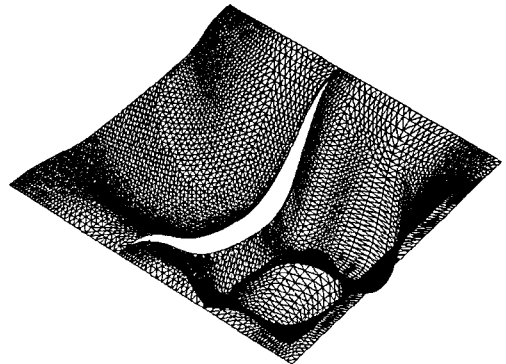
(b) Complete 2-manifold mesh model

Fig. 3 Difference between incomplete and complete 2-manifold mesh model

서 본 논문에서는 공구위치기반방법을 사용하였으며, 메시로부터 공구경로를 생성하였기 때문에 공구위치면 또한 메시로 표현된다. 공구위치메시는 메시로 표현된 공구위치면이며 디자인곡면으로부터 변환된 메시지를 오프셋하여 생성할 수 있다. 오프셋작업은 곡선, 곡면, 메시와 같은 기하학적인 요소들로부터 수직으로 일정한 거리만큼 떨어져 있는 새로운 요소들을 생성해내는 작업을 의미한다.⁽¹³⁾ 2 장에서 언급한바와 같이, 메시모델은 완전한 다면체가 아니므로 오프셋작업을 함에 있어서 메시의 가장자리부분에서 중대한 문제가 발생하게 된다. 특히 메시의 가장자리부분이 불록한 형태를 갖게되었을 경우 오프셋메시간에 틈이 생성된다. Fig. 4(a)에서와 같이 2 개의 불완전한 2 차원다양체 메시가 불록한 형태를 갖으면서 서로 인접해있는 경우 법선벡터만을 고려해서 메시지를 오프셋하면 Fig. 4(b)에서와 같이 오프셋메시간에 틈새가 생기게 된다. 그림에서와 같이 틈이 존재하는 오프셋메시를 이용하여 공구경로를 생성하게 되면 틈이 있는 부분에서 공구가 급격하게 -Z 축으로 이송하면서 공작물과 충돌하게 되는 위험이 있다. 이러한 문제를 야기하는 틈을 없애기 위해서 본 논문에서는 구형메시(spherical mesh)와 원통형메시



(a) Two Incomplete 2-manifold meshes



(b) Calculated offset meshes

Fig. 4 Offsetting of two incomplete 2-manifold meshes

(cylindrical mesh)로 틈을 채워주는 방법을 사용하였다. 본 논문에서 제안한 오프셋 방법은 3 단계로 구성된다. 원시메시(original mesh)로부터 모든 외곽 모서리를 검색하여 검색된 모서리들은 원통형메시를 이용하여 오프셋하였다. 검색된 모서리들로부터 모든 꼭지점을 수집하여 구형메시를 이용하여 오프셋한 후, 마지막으로 메시를 구성하고 있는 삼각형 및 사각형 등의 면은 면의 꼭지점을 꼭지점에서의 법선벡터와 오프셋반경에 의해서 계산되는 새로운 꼭지점으로 이동하여 오프셋한다.

3.2 외곽모서리 오프셋

외곽모서리는 메시의 가장자리에 위치한다. 일반적인 모서리와는 다르게 외곽모서리는 단 하나의 면 정보를 갖고 있으므로, 이러한 특성을 이용하여 하나의 메시에 존재하는 모든 외곽모서리들을 검색할 수 있다. 외곽모서리들을 검색한 후, 각각의 모서리를 감싸는 원통형메시를 계산하여 구하고자하는 공구위치메시에 추가한다. 가공정밀도와 공구반경이 주어지게되면, 사각형으로 이루어진 원통형메시는 다음과 같이 계산할 수 있다. Fig. 5 에서와 같이 외곽 모서리를 구성하고 있는 두 개의 꼭지점 정보 (\vec{v}_0, \vec{v}_1)와 외곽모서리가 포함되는 면의 법선벡터 (\vec{n})로부터 기준벡터(\vec{m})를 식 (1)과 같이 구하고, 가공정밀도(ϵ)와 공구반경과 가공여유에의해 결정되는 오프셋반경(r)으로부터 원통형메시를 계산하는 증분각($\delta\theta$)를 식 (2)와 같이 구하였다.

$$\vec{e} = \vec{v}_1 - \vec{v}_0 \tag{1}$$

$$\vec{m} = \vec{e} \times \vec{n} \tag{2}$$

$$\delta\theta = 2\cos^{-1}\left(1 - \frac{\epsilon}{r}\right) \tag{2}$$

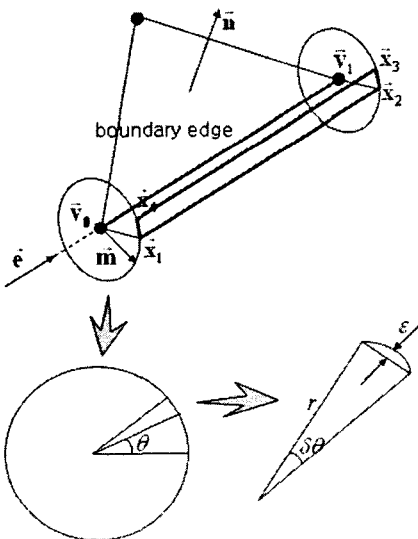


Fig. 5 Offsetting of boundary edge

원통형메시의 사각형을 구성하고 있는 4 개의 꼭지점들은 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{x}_1 &= \vec{v}_0 + r(\vec{m} \cos \theta + \vec{n} \sin \theta) \\ \vec{x}_2 &= \vec{v}_1 + r(\vec{m} \cos \theta + \vec{n} \sin \theta) \\ \vec{x}_3 &= \vec{v}_1 + r(\vec{m} \cos(\theta + \delta\theta) + \vec{n} \sin(\theta + \delta\theta)) \\ \vec{x}_4 &= \vec{v}_0 + r(\vec{m} \cos(\theta + \delta\theta) + \vec{n} \sin(\theta + \delta\theta)) \end{aligned} \tag{3}$$

3.3 외곽꼭지점 오프셋

외곽꼭지점은 3.2 절을 통해서 검색된 외곽모서리를 구성하고 있으며, 모든 외곽꼭지점을 감싸는 구형메시를 계산하여 앞서 구한 공구위치메시에 추가한다. Fig. 6 은 외곽모서리 오프셋에서와 같은 r 과 $\delta\theta$ 로부터 생성된 구형메시를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 구형메시는 양극부분을 제외하고는 사각형으로 구성된다. 하나의 메시를 원점 (0,0,0)에서 생성한 후, 모든 외곽꼭지점으로 복사해서 계산시간을 줄일 수 있도록 구현하였다.

3.4 면 오프셋

외곽모서리와 외곽꼭지점을 오프셋한 후, 메시를 구성하는 면은 Fig. 7에서와 같이 그 면의 꼭지점을 그 꼭지점에서의 법선방향의 새로운 꼭지점으로 이동하는 방법을 이용하여 오프셋하였다. 새로운 꼭지점은 식 (4)를 이용하여 계산하였다.

$$\vec{q} = \vec{p} + r\vec{n} \tag{4}$$

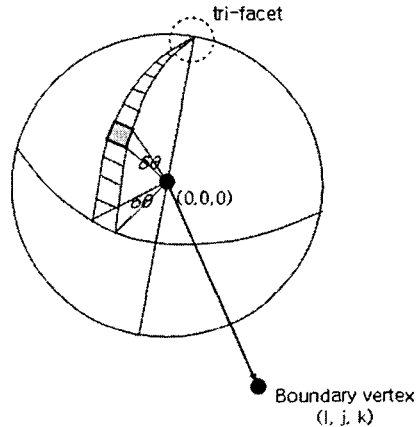


Fig. 6 Offsetting of boundary vertex

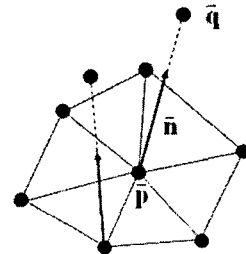


Fig. 7 Offsetting of facet

곡률이 작은 부드러운 곡면에 대해서는 이 방법을 이용한 면 오프셋방법에 문제가 없으나, 곡면에 곡률이 큰 뾰족한 부위가 존재하면, 과삭이 일어날 가능성이 있기 때문에, 이러한 문제점을 해결하기 위해서 Xiuzhi Qu 는 면의 법선벡터의 가중합을 이용하는 방법으로 오프셋벡터를 계산하는 방법을 제안하였다.⁽¹⁴⁾

Fig. 4 (b)에서 볼 수 있었던 오프셋메시간의 틈새가 구형메시 및 원통형메시로 Fig. 8 에서와 같이 채워져있다. Fig. 9 과 Fig. 10 은 조금더 복잡한 예제로서 제안된 오프셋방법을 이용하여 132.5×227.5×31.28mm 크기의 전화기금형과 50×92×13.5mm 크기의 스피커금형을 오프셋한 결과이다.

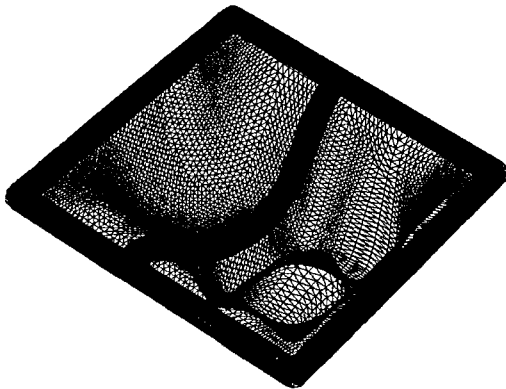
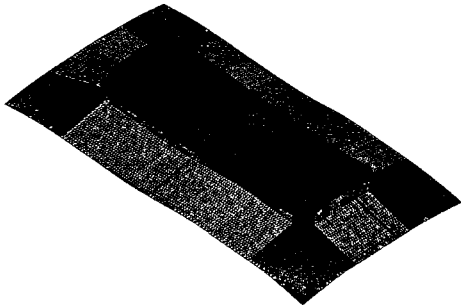
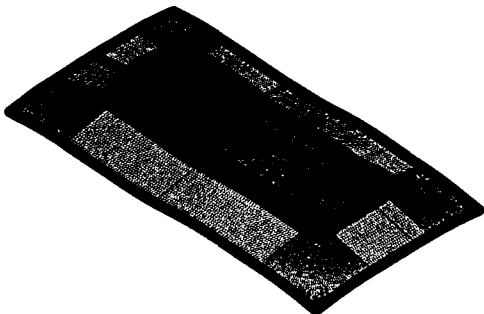


Fig. 8 Generated CL-meshes of Fig. 3 (a)



(a) Tessellated model

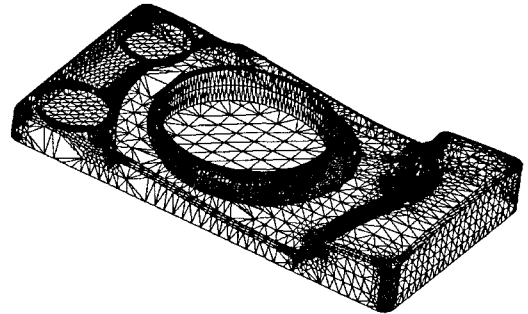


(b) Generated CL-meshes

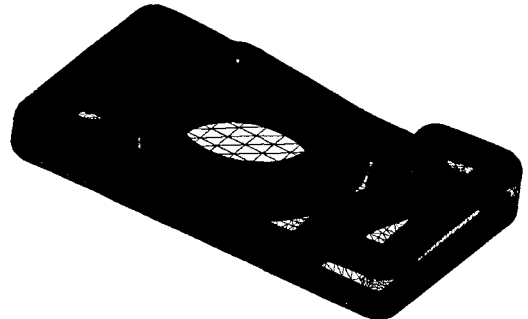
Fig. 9 Examples of generating CL-meshes for the phone mould

4. 공구경로생성

공구위치메시를 생성한 후, 공구경로는 Fig. 11 에서와 같이 생성된 공구위치메시와 가공면 (machining plane)과의 교선으로 구하게된다. 교선을 효과적으로 구하기위해서, 가공면과 교차할 가능성이 있는 공구위치메시의 면들을 가능한 빨리 찾는 것이 중요하다. 2 장에서 언급된 바와같이 불



(a) Tessellated model



(b) Generated CL-meshes

Fig. 10 Examples of generating CL-meshes for the speaker mould

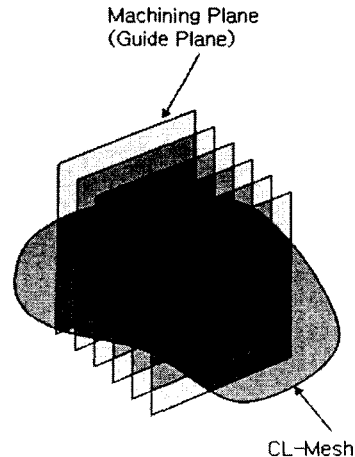


Fig. 11 Intersection between CL-mesh and machining planes

완전한 2 차원다양체 메시모델은 위상학적인 정보를 갖고 있지 않기 때문에, 특정한 위치에 존재하고 있는 면을 찾아내는 것은 쉽지 않다. 원하는 것을 찾기위해서 종종 모든 면들을 검색해야할 경우도 있으며 결과적으로 효율성이 떨어지게 된다. 이러한 문제는 자연적으로 영역검색문제(range searching problem)를 야기하게된다. 질의(query)과정 및 응답성을 빠르게하기 위한 목적으로 충돌감지 알고리즘을 위한 많은 종류의 데이터구조가 사용되고 있다. (15) 이러한 데이터구조중에서, 본 논문에서는 면을 저장하고 효율적인 검색요청작업을 위해서 그리드방법을 사용하였다. 그리드방법은 n 개의 요소를 저장하기 위해 $O(n)$ 의 시간이 소요되며, 요소들이 일정하게 분포되어 있을 경우 r 개의 요소를 응답하는데 $O(r)$ 의 시간이 소요된다.

4.1 그리드방법

공간세분화는 주어진 공간영역을 작은 조각으로 분해하는 것을 의미하며 영역과 관련된 문제나 그 영역에 존재하는 기하학적인 객체와 관련된 문

제 등을 좀더 단순하게, 혹은 좀더 작은 문제들로 축소할 수 있게 해준다. (16) 사각형의 영역을 작은 셀(cell)의 그리드로 세분하고, 각각의 셀에 그 셀에 존재하고 있는 모든 요소들의 정보를 리스트(list)형태로 구성하며, 본 연구에서는 면의 정보를 리스트에 저장하였다.

Fig. 12 는 그리드방법을 이용해서 요소들을 저장하는 과정을 표현하고 있는 순서도이다. Fig. 13 은 그리드방법의 이용에 관한 예제로써별모양의 요소와 삼각형모양의 요소 2 개를 적용한 것을 보여주고 있다. 별모양의 요소는 (4,3), (4,4), (5,3), (5,4)의 셀에 저장되어 있으며, 삼각형모양의 요소는 (3,4), (3,5), (4,4), (4,5)의 셀에 저장되어있다. 모든 요소가 저장이 된 후, 영역검색과정은 Fig. 14 (a)의 순서도의 과정을 통해서 이루어진다. 임의의 요소가 주어졌을 때, 그 요소를 감싸는 경계상자(bounding box)를 계산하고, 그 경계상자와 겹치는 모든셀을 찾게 되면, 주어진 요소와 교차할 수 있는 후보요소들은 검색된 셀에 저장되어있는 리스트로부터 얻을 수 있게된다. Fig. 14(b)에서와 같이

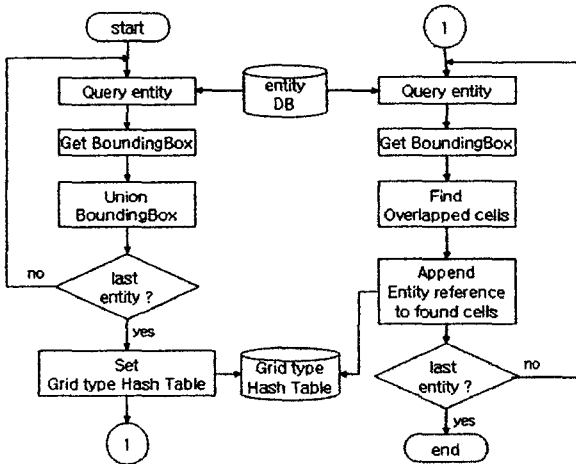
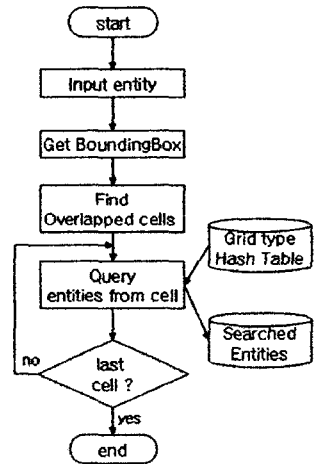


Fig. 12 Flow chart for the procedure of storing entities by using the grid method



(a) Flow chart

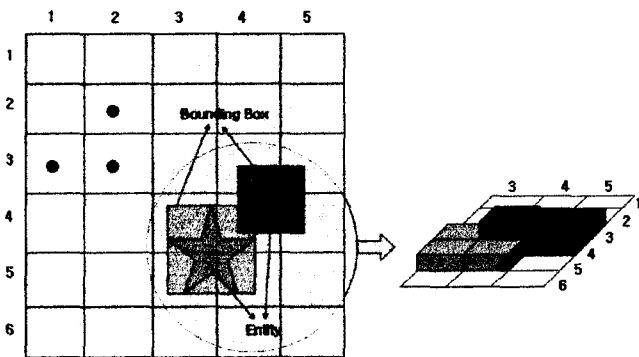
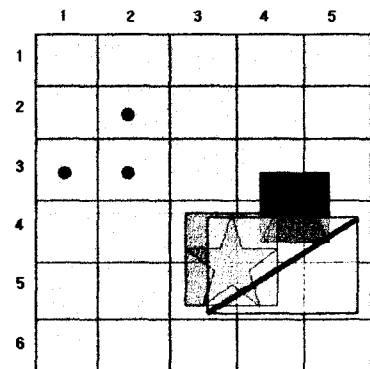


Fig. 13 Example of storing entities



(b) Example

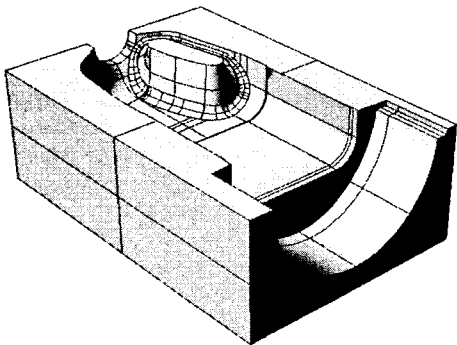
Fig. 14 Querying of desired entities from grid

하나의 선분이 주어진 경우, 그 선분의 경계상자를 계산하면 그 경계상자와 겹치는 셀들은 (4,3), (4,4), (4,5), (5,3), (5,4), (5,5)가 되며, 이 셀들에 저장되어 있는 요소들이 주어진 선분과 교차할 가능성이 있는 후보 요소로써 검색된다. 예제에서는 별모양의 요소와 삼각형모양의 요소가 검색되게 된다. 이방법은 단순하면서도 위상학적인 정보가 없는 경우의 공구경로생성을 위한 영역검색에서 좋은 성과를 보여준다.

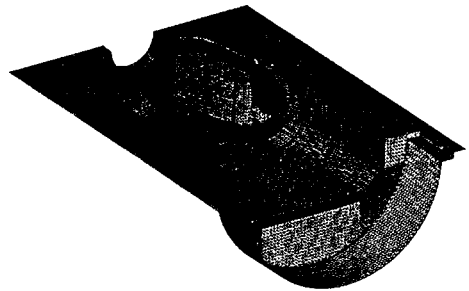
4.2 공구경로생성

가공계획에 의해서 가공면이 결정되면, 가공면

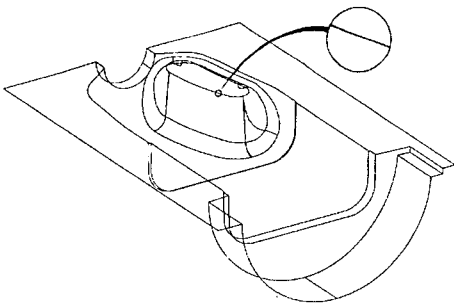
을 작은 평면들로 나눈 후 나뉘어진 평면들과 공구위치메시와의 교선을 4.1장에서 언급한 그리드 방법을 이용하여 계산하였다. 공구위치메시는 삼각형 및 사각형으로 구성되어 있으므로, 평면과의 교선은 모두 직선의 형태를 갖게된다. Fig. 8에서와같이 공구위치메시의 면들은 원시메시의 가장자리부분에서 서로 겹치는 현상이 나타나므로, 계산된 선분 또한 이 부분에서 겹쳐지게 된다. 3차원 가공을 위한 간섭이 제거된 공구경로를 생성하기 위해서 본 논문에서는 최고높이선분방법(highest segment method)를 적용하였다.⁽⁷⁾ 즉, 계산된 선분



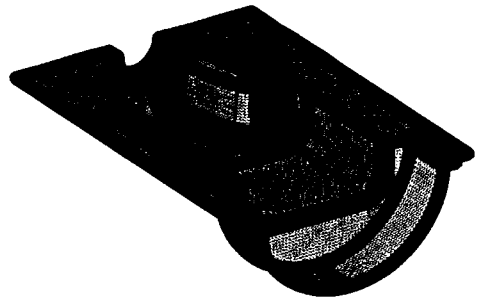
(a) Original model (IGES format, 16 surfaces)



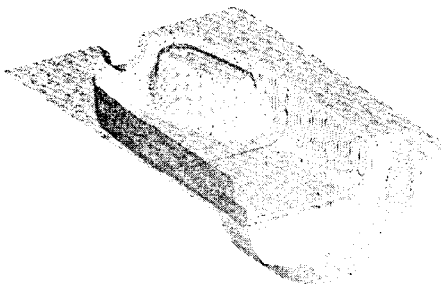
(b) Tessellated model



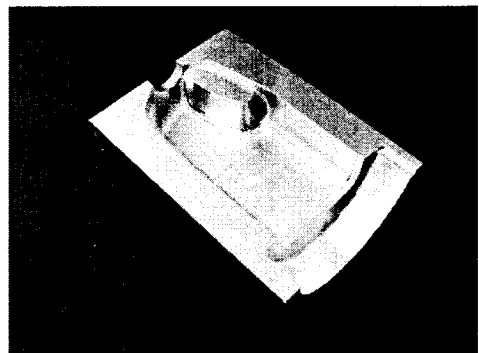
(c) Searched boundary edges



(d) Generated CL-meshes



(e) Calculated tool paths



(f) Machined part

Fig. 15 Examples of machining the cavity of a bottle

들 중에서 가장 높은 위치에 있는 선분들만을 공구경로로서 선택하였으며, 2 개 이상의 선분들이 겹치는 경우에는 낮은 위치에 있는 선분들은 잘라서 제거하여 간섭이 없는 공구경로를 생성하였다.

5. 구현 및 결과

본 논문에서 제안한 불완전한 2 차원다양체 메시를 기반으로한 공구경로생성 알고리즘은 PC 상에서 구현되었다. Fig. 15(a)와 (b)는 플라스틱병을 위한 금형(mould)의 캐비티(cavity) 부분의 모델과 메시를 보여주고 있다. 25 개의 메시로 구성되어 있으며, 총 42,247 개의 다각형으로 구성되어 있고 크기는 140×100×50mm 이다. 메시모델로부터 2 차원다양체 조건을 만족시키지 못하는 외곽모서리들을 검색하였으며, 검색된 외곽모서리들이 Fig. 15(c)에 보여지고 있다. 그림의 오른쪽 상단에 위치하고 있는 원안의 것은 서로 일치하지 않고 있는 2 개의 인접한 모서리들을 보여주고 있다. Fig. 15(d)에서와 같이, 본 논문에서 제안된 방법을 이용하여 예제모델에 대한 공구위치메시가 계산되었다. 계산된 공구위치메시로부터 생성된 공구경로가 Fig. 15(e)와 같으며, 생성된 공구경로를 이용하여 실제 가공한 결과는 Fig. 15(f)와 같다.

6. 결론

본 연구를 통해서 불완전한 2 차원다양체 메시 모델로부터 효과적으로 공구경로를 생성하는 알고리즘을 개발하였다. 기존의 다면체가공과는 다르게, 제안된 방법은 설계된 제품이 다른 시스템으로 전달된후, 공구경로를 생성하기 위해서 메시로 변환되었을 경우 일반적으로 얻게되는 불완전한 2 차원다양체 메시모델로부터 공구경로를 생성할 수 있다. 간섭이 없는 공구경로 생성을 위해서 공구위치메시가 생성되었으며, 일방향(one way) 공구경로를 생성하기 위해서 수직의 가공면을 이용하여 공구위치메시를 절단하였다. 공구위치메시와 가공면과의 교선을 최고높이선분방법을 이용하여 정렬, 잘라내기, 연결 등의 작업을 통해서 최종적인 공구경로로 계산하였다. 계산시간을 줄이기 위한 방편으로 기하학적인 요소들을 효율적으로 저장하고 검색하기위해서 그리드방법을 사용하였다. 제안된 알고리즘은 PC 상에 구현되었으며, 실가공을 통해서 검증하였다.

참고문헌

(1) Choi, B.K. and Jerard, R.B., 1998, "Sculptured Surface Machining," Kluwer Academic Publishers, AA

Dordrecht, The Netherlands.

- (2) Choi, B.K. and Jun, C.S., 1989, "Ball-end cutter Interference Avoidance in NC Machining of Sculptured Surfaces," *Computer Aided Design*, Vol. 21, No. 6, pp. 371~378.
- (3) Zhou, L. and Lin, Y.J., 2001, "An Effective Global Gouge Detection in Tool-Path Planning for Freedom Surface Machining," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 17, No. 7, pp. 461~473.
- (4) Han, Z. and Yang, D., 1998, "Optimal Tool Selection for Interference-free Sculptured Surface Machining," *Machining Impossible Shapes - International Conference on Sculptured Surface Machining*, pp. 247~262.
- (5) Choi, B.K., Kim, D.H. and Jerard, R.B., 1997, "C-Space Approach to Tool-Path Generation for Die and Mould Machining," *Computer Aided Design*, Vol. 29, No. 9, pp. 657~669.
- (6) Duncan, J.P. and Mair, S.G., 1983, "Sculptured Surfaces in Engineering and Medicine," Cambridge University Press, USA.
- (7) Jun, C.S., Kim, D.S. and Park, S.H., 2002, "A New Curve-Based Approach to Polyhedral Machining," *Computer Aided Design*, Vol. 34, No. 5, pp. 379~389.
- (8) Hwang, J.S. and Chang, T.C., 1998, "Three-Axis Machining of Compound Surfaces Using Flat and Filleted Endmills," *Computer Aided Design*, Vol. 30, No. 8, pp. 641~647.
- (9) Inui, M., 2003, "Fast Inverse Offset Computation Using Polygon Rendering Hardware," *Computer Aided Design*, Vol. 35, No. 2, pp. 181~201.
- (10) Piegł, L.A. and Richard, A.M., 1995, "Tessellating Trimmed NURBS Surfaces," *Computer Aided Design*, Vol. 27, No. 1, pp. 6~26.
- (11) Hamann, B. and Tsai, P.Y., 1996, "A Tessellation Algorithm for the Representation of Trimmed NURBS Surfaces with Arbitrary Trimming Curves," *Computer Aided Design*, Vol. 28, No. 6, pp. 461~472.
- (12) Goult, R.J. and Shearar, P.A., 1990, "Improving the Performance of Neutral File Data Transfers," Springer-Verlang, New York.
- (13) Maekawa, T., 1999, "An Overview of Offset Curves and Surfaces," *Computer Aided Design*, Vol. 31, No. 3, pp. 165~173.
- (14) Qu, X. and Stucker, B., 2003, "A 3D Surface Offset Method for STL-Format Models," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9, No. 3, pp. 133~141.
- (15) Ar, S., Chazelle, B. and Tal, A., 2000, "Self-Customized BSP Trees for Collision Detection," *Computational Geometry*, Vol. 15, No. 1-3, pp. 91~102.
- (16) Laszlo, M.J., 1996, "Computational Geometry and Computer Graphics in C++," Prentice Hall, USA.