

< 논문 >

CL 면 변환을 이용한 새로운 5 축 가공경로 생성방법

김수진[†] · 양민양^{*}

(2005년 12월 27일 접수, 2006년 4월 11일 심사완료)

New 5-axis Tool Path Generation Algorithm Using CL Surface Transformation

Su-Jin Kim and Min-Yang Yang

Key Words : 5-axis Tool Path (5 축 가공경로), CL Surface(공구위치면), Triangular Mesh(삼각망), 변환(Transformation)

Abstract

In this paper, the CL surface transformation approach that inversely deforms the 3-axis tool path generated on the deformed CL surface to a 5-axis tool path is introduced. The proposed CL surface transformation approach can be used if the orientation of the cutter is predefined. The CL surface based 3-axis tool path generation algorithms that have been improved well can be applied to the 5-axis tool path generation.

1. 서론

5 축 가공은 3 축 가공에 비해 가공면의 품질이 좋고 터빈과 같이 복잡한 모델도 한번에 가공할 수 있어 선박, 항공, 기계가공에 이용되고 있다. 곡면을 평엔드밀로 5 축 가공할 경우에 3 축 가공하는 것보다 더 빨리 더 깨끗한 표면을 얻을 수 있다.⁽¹⁻³⁾ 또한 소재를 수회 회전해 고정해야 가공이 가능한 터빈과 임펠러 등도 한번만 물려 모든 면을 가공해낼 수 있다.⁽⁴⁻⁶⁾

이렇게 많은 장점을 가지고 있는 반면에 NC 데이터를 생성하기 위한 과정은 아주 복잡하다. 기존 논문들에서 5 축 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 모델간에 간섭이 발생하지 않는 자세를 결정하는 단계가 가장 중요해서

지금까지 Bounding Volume 방법,^(7,8) C-Space 방법^(9,10) 그리고 Visibility 체크방법⁽¹¹⁻¹³⁾ 등이 연구되어 왔다.

3 축 가공에서는 쾌속조형에 많이 이용되고 있는 STL 모델을 공구반경만큼 읍셋하고, 읍셋 다면체망과 연속된 평면들의 교선을 계산해 NC 데이터를 생성하는 방법이 많이 연구되었다.⁽¹⁴⁻¹⁷⁾ 또한 STL 모델을 읍셋하는 다양한 방법이 연구되었으며,^(15,17-20) 상용 CAM 시스템에도 다면체모델을 이용한 NC 데이터의 생성방법이 이용되고 있다.

상용 CAM 시스템의 5 축 가공경로 생성방법으로는 공구축이 점이나 곡선을 지나도록 공구의 자세를 먼저 결정하고 공구접촉점을 계산하는 방법이 많이 이용되고 있다. 이 방법은 역경사벽이 있는 오목한 모양이나 타이어 같은 도넛모양의 형상 가공에 적합하다. 공구자세가 미리 지정되면 자유도가 3 으로 바뀌므로 3 축 가공경로 생성방법을 적용할 수 있도록 알고리즘을 고안한다면 쉽게 5 축 가공경로 생성이 가능할 것이다.

본 연구에서는 축의 자세 결정방법이 미리 정의된 경우에 CL(Cutter Location, 공구위치)면을 현재 좌표공간에서 축의 자세가 Z 축과 일치하는 새로운 좌표공간으로 바꾸어 3 축 가공경로를 생성하

[†] 책임저자, 회원, 경상대학교 기계항공공학부, 공학연구원
E-mail : sujinkim@gnu.ac.kr
TEL : +82-55-751-6075 FAX : +82-55-762-0227

^{*} 회원, 한국과학기술원 기계공학과

고 이것을 역변환해 5 축 가공경로를 얻는 새로운 알고리즘을 제안하고 구현하고자 한다. 다음 장에서는 이것을 읍셋, CL 면 변환, 3 축 경로 생성 그리고 3 축 경로의 역변환으로 5 축 가공경로가 생성되는 CL 면 변환방법이 소개되고, 제안된 방법으로 생성된 5 축 NC 데이터로 타이어 금형을 가공해 검증한다.

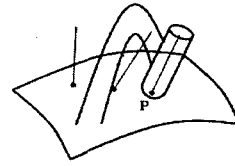
2. CL 면 변환 방법

2.1 5 축 공구자세

5 축 가공에서는 공구의 자세선정방법이 다양한데 대부분의 논문들에서는 Fig. 1(a)와 같이 CC(Cutter Contact, 공구접촉)점을 먼저 정하고 간섭이 없는 자세를 다양한 방법으로 계산하고 있다. 반면에 많은 CAM 프로그램과 일부 논문에서는 공구의 자세를 점, 곡선 또는 곡면을 이용해 지정하고 있다. 오목하거나 볼록한 모델의 경우에 Fig. 1(b)와 같이 공구축이 항상 한점을 지나도록 자세선정방법을 결정하는 것이 편리하다. 실린더 모양에 가까운 모델의 경우에 Fig. 1(c)와 같이 공구축이 항상 직선과 직교하도록 하며, 튜브모양에 가까운 모델인 경우에 Fig. 1(d)와 같이 축은 항상 원호에 직교하도록 공구자세를 결정하는 것이 편리하다. 또한 가공면의 품질을 높이기 위하여 공구축이 곡면과 최적의 각으로 만나도록 하기도 한다.

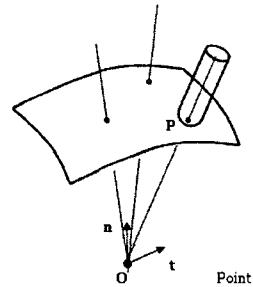
2.2 CL 면 변환 방법

본 논문에서는 Fig. 1(b)~(d)와 같이 공구의 자세가 미리 정의되어, 5 축 가공이지만 2 축이 종속되어 독립적인 자유도가 3 으로 감소한 경우에 일반적인 3 축 가공경로 생성방법을 5 축 가공에 이용할 수 있다는 생각에서 CL 면 변환방법을 새롭게 제안하였다. 이 방법에서는 Fig. 2 와 같이 5 축 가공이 필요한 모델의 CL 면을 3 축 가공이 가능한 좌표공간으로 바꾸고 여기서 생성된 경로를 다시 원래의 좌표공간으로 옮긴다. 이 방법은 구체적으로 다음과 같이 4 가지 단계로 이루어진다. 1 단계로 CAD 에서 디자인된 모델(STL 파일)을 공구 반경만큼 읍셋하여 CL 면을 만든다. 2 단계로 미리 정의된 공구의 자세를 바탕으로 공구축이 Z 축 방향과 일치하는 새로운 좌표공간으로 CL 면을 변환한다. 3 단계로 새로운 좌표공간에서 일반적인 3 축 가공경로 생성과 간섭제거방법을 이용해 3 축 가공경로를 생성한다. 4 단계로 생성된 가공경로를 최초좌표공간으로 역변환하여 5 축 가공경로를 생성한다.

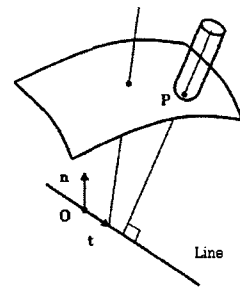


Free

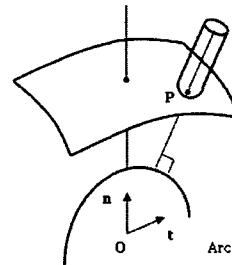
(a) Free orientation



(b) Axis pass one point



(c) Axis meet perpendicular to a line



(d) Axis meet perpendicular to an arc

Fig. 1 Cutter orientation definition methods

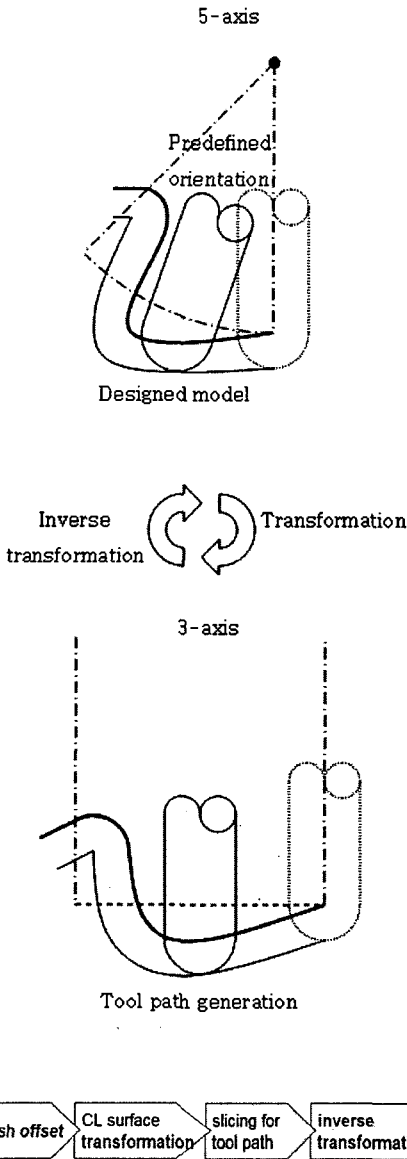


Fig. 2 CL Surface transformation approach for 5-axis tool path generation

2.3 메시 읍셋

제안된 5축 가공경로 생성방법의 1 단계는 일반적인 CL 면을 이용한 3축 가공경로 생성방법과 마찬가지로 CAD 모델의 읍셋을 통한 CL 면의 계산이다. STL 파일을 공구반경만큼 읍셋하기 위하여 꼭지점의 다중법선벡터를 이용한 읍셋방법을 이용했다.⁽²⁰⁾

2.4 CL 면의 변환

공구의 자세가 정의되어 있는 경우에 3축 가공경로 생성방법을 적용하기 위하여 CL 면을 변환한다. 변환함수는 공구축이 여러 방향을 향하는 5축 가공 좌표공간을 공구축의 자세가 Z 축과 일치하는 3축 가공 좌표공간으로 변환하는 역할을 한다. 공구축이 한 점을 지나도록 공구자세가 정의된다면 변환함수는 구형좌표를 직교좌표로 바꾸는 변환에 해당한다. 공구축이 한 직선과 수직으로 만나도록 정의된다면 변환함수는 실린더좌표를 직교좌표로 바꾸는 변환에 해당한다. 식 (1)과 같이 최초좌표 공간에서 CL 면 위의 한 점 P는 변화함수 T에 의해서 변환된 공간상에서 CL 면 위의 한 점 P'로 변환된다.

$$P' = T(P) \tag{1}$$

공구자세를 정의하는 방법이 다양한 만큼 여러 변환함수가 존재한다. 만약 Fig. 1(b)처럼 공구축이 항상 한 점을 지나도록 정의했다면 최초좌표공간의 CL 점들은 식 (2)에 의하여 새로운 좌표공간 위의 CL 점들로 변환된다. 이중 반경 R은 공구축이 지나는 점 O로부터 CL 점들까지 평균거리이며 p는 점 O에서 한 CL 점까지의 벡터이다.

$$P' = \begin{pmatrix} R\phi \\ R\theta \\ |p| \end{pmatrix} \tag{2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\mathbf{p} \cdot (\mathbf{t} \times \mathbf{n})}{\sqrt{(\mathbf{p} \cdot \mathbf{t})^2 + (\mathbf{p} \cdot \mathbf{n})^2}} \right), \quad \theta = \tan^{-1} \left(\frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{t}}{\mathbf{p} \cdot \mathbf{n}} \right)$$

Fig. 1(c)와 같이 공구축이 항상 직선과 수직으로 만나도록 정의되어 있다면 CL 점들은 식 (3)에 의하여 변환된다.

$$P' = \begin{pmatrix} \mathbf{p} \cdot \mathbf{t} \\ R\theta \\ |\mathbf{p} - (\mathbf{p} \cdot \mathbf{t})\mathbf{t}| \end{pmatrix} \tag{3}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\mathbf{p} \cdot (\mathbf{t} \times \mathbf{n})}{\mathbf{p} \cdot \mathbf{n}} \right)$$

Fig. 1(d)와 같이 공구축이 항상 반경 R_i인 원호와 직교하도록 정의된다면 CL 점들은 식 (4)에 의하여 변환된다. 여기서 R_o는 기준원호로부터 CL 점들까지 평균거리이다.

$$P' = \begin{pmatrix} (R_i + R_o)\theta \\ R_o\phi \\ |\mathbf{p} - \mathbf{c}| \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{t}}{\mathbf{p} \cdot \mathbf{n}} \right)$$

$$\mathbf{c} = R_i (\sin \alpha \mathbf{t} + \cos \alpha \mathbf{n})$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{(\mathbf{p} - \mathbf{c}) \cdot (\mathbf{t} \times \mathbf{n})}{\sqrt{((\mathbf{p} - \mathbf{c}) \cdot \mathbf{t})^2 + ((\mathbf{p} - \mathbf{c}) \cdot \mathbf{n})^2}} \right)$$

2.5 3 축 경로생성

변환된 좌표공간에서 공구자세가 Z 축과 일치하므로 일반적인 CL 면 기반의 3 축 가공경로 생성 방법으로 가공경로를 생성할 수 있다. 본 연구에서는 CL 면이 삼각망이므로 연속된 수직평면과의 교선을 계산하고 교선이 접치는 경우는 가장 좋은 직선을 선택해 간섭이 없는 3 축 가공경로를 생성한다.⁽¹⁴⁻¹⁷⁾ 앞의 3 축 가공경로 생성방법은 일반적인 5 축 가공경로 생성방법에 비해 간단하고 연산 시간 역시 아주 빠르다.

2.6 경로의 역변환

앞에서 생성된 3 축 가공경로는 변환된 공간에 존재하므로 최초좌표공간으로 역변환해 5 축 가공경로를 얻을 수 있다. 역변환에 이용되는 좌표변환함수는 다음과 같다.

$$\mathbf{P} = \mathbf{T}^{-1}(\mathbf{P}') \quad (5)$$

Fig. 1(b)와 같이 공구자세가 항상 축이 지나는 한점으로 정의된다면 변환된 공간의 CL 점은 최초 좌표공간 위의 CL 점으로 식 (6)에 의해 역변환된다.

$$\mathbf{P} = \mathbf{O} + P_z' ((\cos \phi \cos \theta) \mathbf{n} + (\cos \phi \sin \theta) \mathbf{t} + \sin \phi (\mathbf{t} \times \mathbf{n})) \quad (6)$$

$$\phi = \frac{P_y'}{R}, \quad \theta = \frac{P_x'}{R}$$

Fig. 1(c)와 같이 공구축이 기준직선과 수직으로 만나도록 공구자세가 정의된 경우 변환된 공간의 가공경로는 식 (7)에 의해서 역변환된다.

$$\mathbf{P} = \mathbf{O} + P_x' \mathbf{t} + P_z' (\cos \theta \mathbf{n} + \sin \theta (\mathbf{t} \times \mathbf{n})) \quad (7)$$

$$\theta = \frac{P_y'}{R}$$

Fig. 1(d)와 같이 공구축이 기준원호와 수직으로 만나도록 공구자세가 정의된 경우, 변환된 공간의 가공경로는 식 (8)에 의해 역변환된다.

$$\mathbf{P} = \mathbf{O} + (R_i + P_z' \cos \theta) (\cos \alpha \mathbf{t} + \sin \alpha \mathbf{n}) + P_z' \sin \theta (\mathbf{t} \times \mathbf{n}) \quad (8)$$

$$\theta = \frac{P_x'}{R_i + R_o}$$

$$\phi = \frac{P_y'}{R_o}$$

2.7 변환 오차

본 연구에서 이용된 CAD 모델은 삼각형평면들로 이루어진 STL 파일이며 가공경로 역시 작은 직선들의 연속이기 때문에 변환할 때 오차가 발생한다. 삼각형평면을 위 변환식들에 의해 변환하면 삼각곡면이 되며 직선경로를 역변환하면 곡선이 되지만 각각 삼각평면과 직선으로 표시하고 있다. 따라서, 변환과 역변환에 의한 평균오차를 δ 로 하고 삼각면의 모서리길이 d 를 변환기준점, 직선, 곡선에서 CL 면까지 평균거리 R 과 허용오차로 이루어진 식 (9)에 의해서 제한하였다.

$$d \leq 2\sqrt{2R\delta} \quad (9)$$

공구경로 한블록의 길이 역시 같은 식으로 제한하였는데, 삼각망의 최대 모서리길이는 CAD 에서 모델을 생성할 때 제한하며 직선 가공경로의 블록 길이는 변환된 공간에서 3 축 가공경로를 생성할 때 제한한다. 실제오차는 변환기준점에 가까울수록 커지고 멀수록 작아지는데 STL 파일을 상용 CAD 시스템에서 생성하므로 삼각형의 모서리 길이를 위치에 따라 다르게 지정할 수 없어 오차가 정확하게 제어되지는 못했다.

3. 적용 및 결과

제안된 CL 면 변환을 통한 빠른 5 축 가공경로 생성방법을 C++언어로 구현하고 실제 NC 데이터 생성과 가공을 통해 검증하였다.

3.1 냉각핀

냉각핀은 컴퓨터에서 발생하는 열을 대기중으로 방출하기 위해서 알루미늄으로 만들어진 제품이다 핀의 날개들이 실린더모양의 파이프에 Fig. 3(a)와

같이 붙어 있다면 5축 가공이 필요하다.

Fig. 3(b)는 냉각핀을 가공하기 위한 공구자세 정의 방법으로 공구축이 항상 실린더의 중심축에 수직으로 만나고 있다. X 축은 실린더의 중심축이고 Y 축은 수평방향, Z 축은 수직방향이다. 회전각 θ 는 Z 축과 공구축 사이의 각이고 r 은 X 축에서 CL 점까지 거리이다.

변환된 좌표공간에서 x 점은 최초좌표공간에서의 x 점과 일치하며 y 점은 기준반경 r 과 회전각 θ 의 곱에 해당되고 z 점은 X 축과 공구 CL 점의 거리에 해당된다. 식 (10)은 냉각핀 모델의 CL 면을 변환하는데 이용된 좌표변환함수를 나타낸다.

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ R\theta \\ r \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$r = \sqrt{Y'^2 + Z'^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{Y'}{Z'}\right)$$

식 (11)은 변환된 좌표공간에서 생성된 3축 가공경로를 최초좌표공간으로 역변환하기 위해서 이용된 역변환함수이다.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X' \\ r\sin\theta \\ r\cos\theta \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$r = Z'$$

$$\theta = \frac{Y'}{R}$$

Fig. 3(a)의 솔리드모델을 허용오차 0.01mm, 모서리최대길이 2.0mm 조건에서 다면체모델로 바꾸고 55,818 개의 삼각형으로 이루어진 STL 파일로 출력하였다. 반경 1mm 만큼 읍셋하여 Fig. 3(c)의 CL 면을 만들었으며, 식 (10)으로 변환해 Fig. 3(d)를 얻었다. 변환된 CL 면에서 일반적인 3축 가공경로 생성방법으로 Fig. 3(e)와 같이 등고선가공경로와 한방향가공경로를 얻었다. 변환된 좌표공간의 3축 가공경로를 식 (11)로 역변환하여 Fig. 3(f)의 5축 가공경로를 얻었다. 이 방법으로 간섭이 없는 5축 가공경로를 4.1 초에 생성하였다.

3.2 타이어 금형

타이어 금형은 도넛모양으로 한번에 가공할 수 없어 여러 개로 나누어 5축 가공한 후 조립한다.^(21,22) Fig. 4(a)와 같이 공구축이 항상 도넛의 중심축인 원호에 수직으로 만나도록 공구자세를 정의할 수 있다.

변환된 좌표공간에서 x 점은 타이어의 외경 $(R_i + R_o)$ 과 회전각 θ 의 곱이고 y 점은 기준반경 R_o 와 회전각 ϕ 의 곱이고 z 점은 원호에서 공구의 CL 점까지 거리이다.

CL 면을 최초좌표공간에서 3축 가공경로 생성을 위한 좌표공간으로 변환하기 위해서 식 (12)가 이용된다.

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (R_i + R_o)\theta \\ R_o\phi \\ R_o - r \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X'}{-Z'}\right)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{Y'}{Z' \cos\theta - X' \sin\theta}\right)$$

$$r = \sqrt{(Z' \cos\theta - X' \sin\theta + R_i)^2 + Y'^2}$$

3축 가공경로를 다시 최초좌표공간으로 역변환하기 위하여 식 (13)이 이용된다.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (R_i + r\cos\phi)\sin\theta \\ r\sin\phi \\ -(R_i + r\cos\phi)\cos\theta \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\theta = \frac{X'}{R_i + R_o}$$

$$\phi = \frac{Y'}{R_o}$$

$$r = R_o - Z'$$

타이어 금형의 CAD 모델을 허용오차 0.01mm, 모서리최대길이 2.0mm 조건에서 다면체망으로 만들고, Fig. 4(b)와 같이 236,748 개의 삼각형으로 이루어진 STL 파일로 출력하였다. 직경 2mm 의 볼 엔드밀로 5축 가공하기 위해서 다면체모델을 반경 1mm 만큼 읍셋하여 Fig. 4(c)와 같은 CL 면을

생성하였다. 이 CL 면을 식 (12)를 이용해 공구의 자세가 Z 축과 일치하는 새로운 좌표공간으로 변환하면 Fig. 4(e)와 같은 3 축 가공경로 생성을 위한 CL 면을 얻게 된다. 이 CL 면을 등간격의 수직면으로 잘라 Fig. 4(f)와 같이 3 축 가공경로를 생성하였다. 변환된 좌표공간에서 생성된 3 축 가공경로를 식 (13)을 이용해 최초좌표공간으로 역변환하여 Fig. 4(g)와 같은 5 축 가공경로를 얻었다. 위 방법으로 간섭이 없는 5 축 가공경로를 생성하는데 16.6초가 소요되었다.

가공경로는 검증을 위해 테이블과 주축을 회전하는 5 축 공작기계에 맞는 NC 코드로 출력하였다.⁽²³⁾ 황삭가공을 위해서는 3 축 가공이 이용되었으며 중삭과 정삭가공에는 제안된 방법으로 생성된 5 축 가공경로가 이용되었다. Fig. 4(g)는 제안된 방법으로 생성된 5 축 NC 데이터를 이용해 알루미늄소재를 가공하고 있는 5 축 NC 공작기계와 최종가공된 결과를 보여준다. 정삭가공에 사용된 공구는 직경 2mm 의 볼엔드밀이고 공구경로 간격은 0.2mm 이다. 정삭가공 시간은 80 분이었고 가공된 면에 과삭은 없었다.

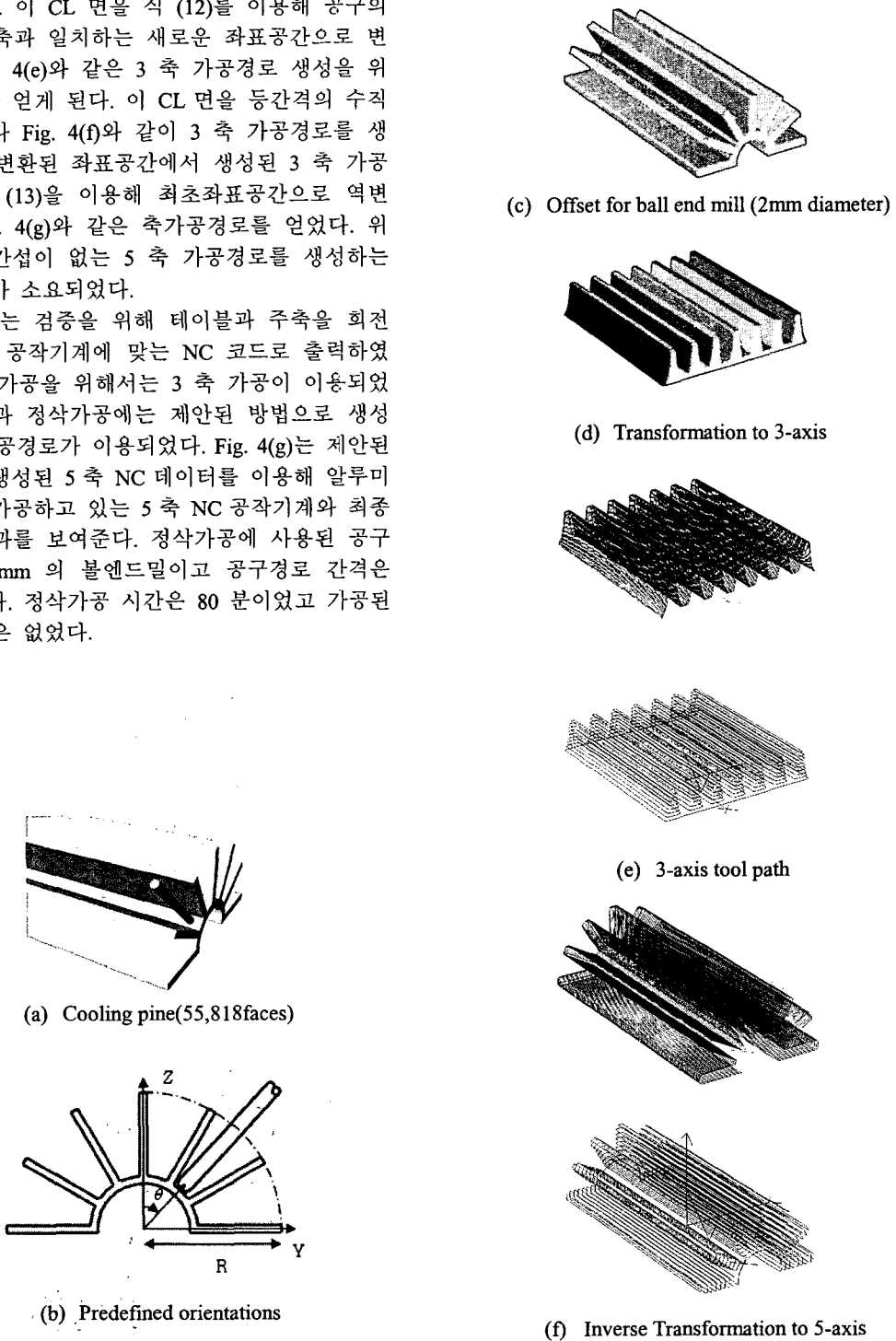


Fig. 3 5-axis tool path for cooling pine

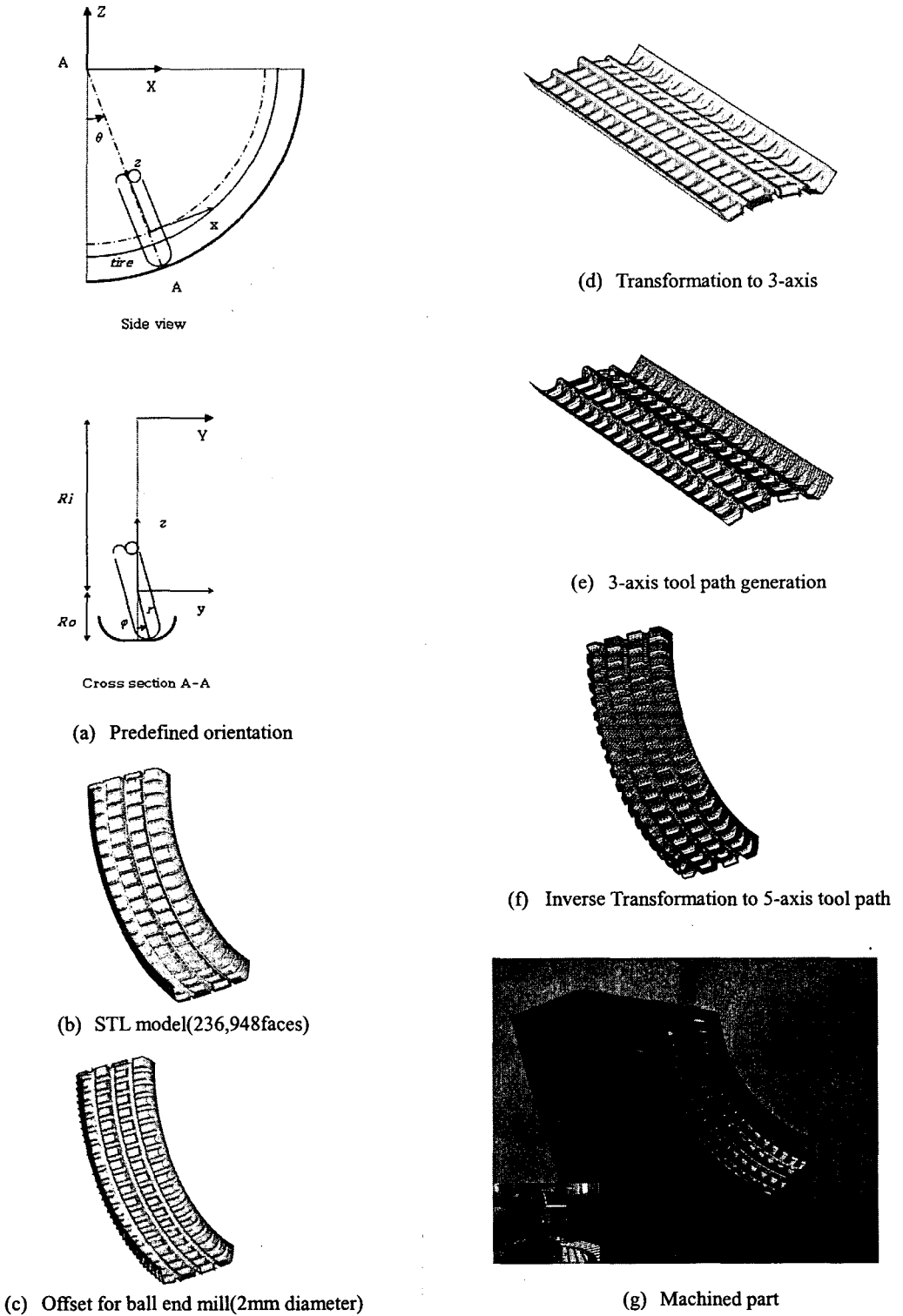


Fig. 4 5-axis tool path of tire mold

3.3 결과 및 토의

5 축 가공에서 공구자세가 사용자에게 의해 정의되면 새로 제안된 CL 면 변환방법을 이용해 가공경로를 생성할 수 있다.

제안된 방법의 특징은 CL 면의 변환과 가공경로의 역변환단계를 추가해서 이미 많은 연구가 이루어졌고 안정성이 확보된 3 축 가공경로 생성 알고리즘을 5 축 가공에 그대로 적용할 수 있다는 것이다. 또한 변환 및 역변환에 소요되는 시간이 아주 짧아 5 축 가공경로 생성시간이 3 축 가공경로 생성시간과 가까워질 수 있었다. 변환의 복잡도는 $O(n)$ 으로 삼각망모델의 꼭지점수에 비례하며 역변환의 복잡도 역시 $O(m)$ 으로 가공경로의 블록개수에 비례한다. 하지만 공구의 자세가 미리 정의되어야 하므로 공구자세의 유연성은 다른 5 축 가공경로 생성방법에 비해 떨어진다.

실제 5 축 가공을 요하는 곡면의 경우, 여러 개의 공구자세를 필요로 할 수 있는데 그 때마다 각 부분을 분할하여 제시된 방법을 적용하면 각 가공경로 사이의 연결문제가 발생할 수 있으며, 이에 기인한 오차발생의 가능성이 있을 수 있다. 따라서 공구 자세를 한가지 방법으로 결정할 수 있는 경우만 선택적으로 제안된 알고리즘을 적용하는 것이 바람직하다고 사료된다.

4. 결론

본 논문에서는 CL 면을 변환하고 변환된 좌표공간에서 3 축 가공경로를 생성하며 이것을 최초좌표공간으로 역변환하여 5 축 가공경로를 생성하는 새로운 방법을 제안하였다. 이 생성방법을 C++로 구현하고 타이어 금형의 5 축 NC 가공에 적용하였다.

제안된 방법의 특징은 CL 면의 변환과 가공경로의 역변환 단계를 추가해서 이미 많은 연구가 이루어졌고 안정성이 확보된 3 축 가공경로 생성방법을 5 축 가공에 쉽게 적용할 수 있다는 것이다.

하지만 공구의 자세를 점, 직선 또는 원호를 이용해 미리 정의해야 하므로 적용가능한 모델의 형상에 한계가 있어 선택적으로 가능하다.

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 Transformation," *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.
- (21) Lee, C. S., 1996, "Surface Modeling and 5-Axis NC Machining of Automobile Tire Model," *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 9(2), pp. 129~141.
- (22) Cho, J. G., Kim, N. J., Woo, H. J., Park, H. P. and Lee, K. H., 1999, "Construction of 3D Tire Models from Pattern Drawings," '99 *CAD/CAM conference in Korea*.
- (23) Jung, Y. H., Lee, D. W., Kim, J. S. and Mok, H. H., 2002, "NC Post-Processor for 5-Axis Milling Machine of Table-Rotating/Tilting Type," *Journal of materials Processing Technology*, 130-131, pp. 641~646.