

자유곡면의 5축 NC 가공을 위한 CAM 시스템 개발

전 차 수*, 박 세 형**, 전 용 태**

Development of a CAM System for 5-Axis NC Machining of Sculptured Surfaces

Cha-Soo Jun*, Se-Hyung Park**, Yong-Tae Jun**

ABSTRACT

Developed in this reseach is a CAM system for 5-axis NC Machining of sculptured surfaces. We identify problems in generating 5-axis NC data and propose methods of overcoming them. Issues discussed in this paper are: kinematic modelling of NC machines; determination of cutter position(location and orientation); check of machine work-range;linear trajectory planning; calculation of feedrate number. The proposed system has been implemented in FORTRAN77 on the Personal IRIS EWS, and it also constitutes a module of the CAD/CAM system 'CASSET' developed in KIST CAD/CAM lab.

Key Words : CAM System(캠 시스템), 5-Axis NC Machining(5축 NC 가공), CC-data(공구접촉 데이터), CL-data(공구 위치 데이터), Kinematic Modelling(기구학적 모델링), Machine Work-range(기계작동범위), Trajectory Planning(궤적계획)

1. 서 론

근래에 국내에서도 항공기 부품, turbine blade, 박 용 프로펠러 등의 가공에 5축 NC기계가 널리 쓰이고 있으며 자동차 외관 등의 프레스 금형과 플라스틱 사출 금형의 가공에도 도입이 증가되고 있다.

서로 직교하는 3개의 평행이동축으로 구성된 3축 기계에 비하여 5축 기계는 일반적으로 2개의 회전이동축을 더 갖고 있다. 3축 기계에서는 곡면상의 접촉점이 주어지면 공구의 위치가 유일하게 결정되는 반면, 5축 기계에서는 공구가 여러가지 자세(위치 및 축방향)를 취할 수 있다.

일반적으로 3축기계와 비교할 때 2개의 자유도를 더 갖는 5축기계가 가질 수 있는 잇점은 다음과 같다.

① 효율적 공구 자세

△ 공구 원통을 이용한 윤곽가공(Fig. 1a)

△ flat end mill 사용시 공구의 자세를 잘 조정함으로써 cusp양과 uncut양의 최소화(Fig. 1b, c)
(1, 2)

△ Center-cut이 없는 황삭용 평엔드밀의 효율적 활용(Fig. 1d)

② 3축의 경우 접근 불가능한 곡면의 가공(Fig. 1e)
5축 가공은 이와 같은 잇점이 있는 반면, 이 잇점을 충분히 살리기 위해서는 3축 NC가공 문제의에 다음과

* 경상대학교 산업공학과(정회원)

** KIST CAD/CAM 연구실(정회원)

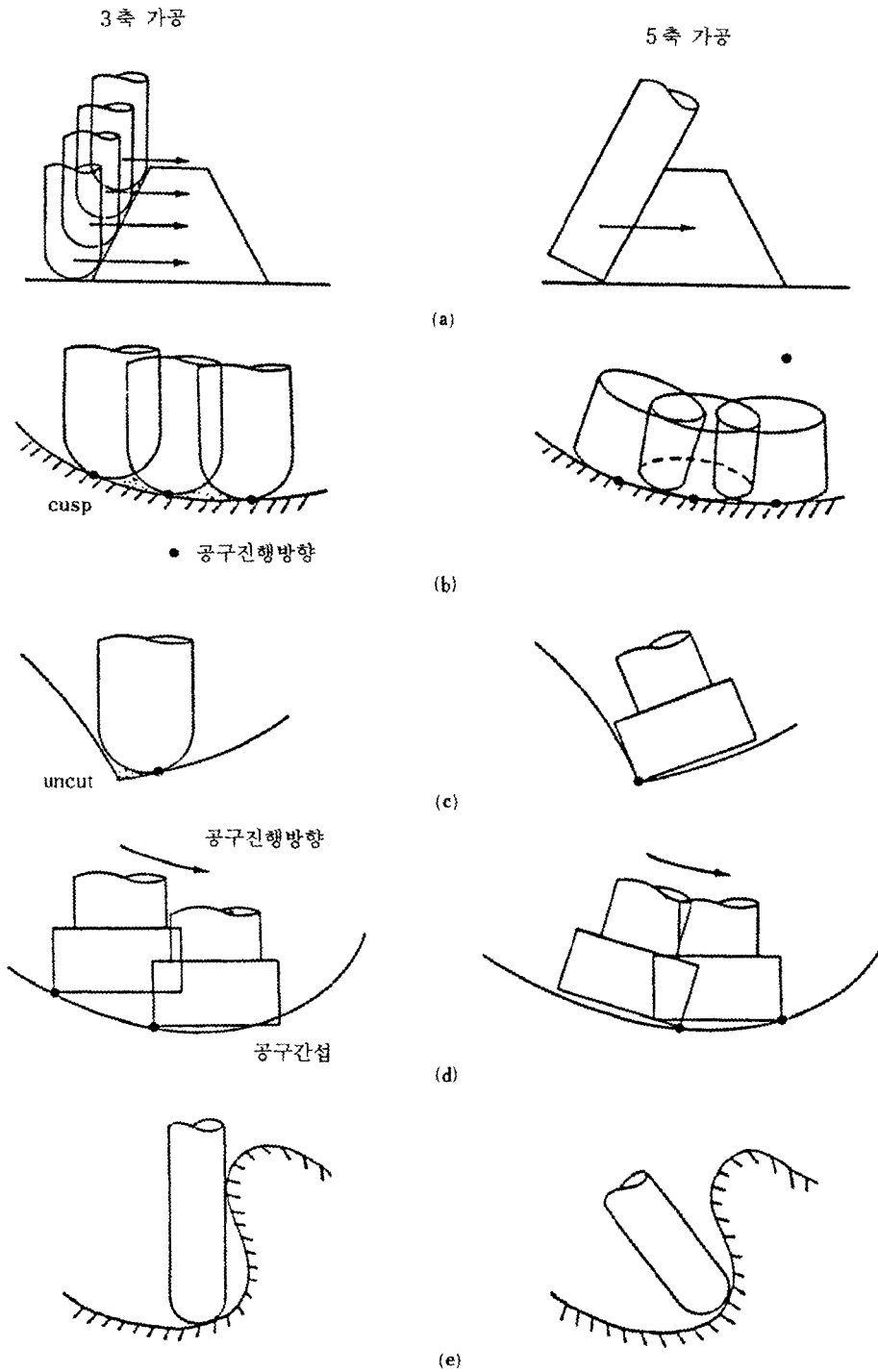


Fig.1 3축 가공과 5축 가공의 비교

같은 추가적인 문제의 해결이 요구된다.

- ① 동작기계의 기구학적 모델링(5, 6)
- ② 효율적인 공구접촉자세의 결정(1, 3, 5)
- ③ 공구간섭 및 충돌 방지
- ④ 동작기계의 작동범위 검사(1, 5)
- ⑤ CC데이터의 선형 계획계획(5)
- ⑥ Feedrate number의 계산

5축 NC 가공의 활용이 증가되고 있고 많은 상업용 CAD/CAM 시스템들이 5축 가공을 지원하는 것으로 선전되고 있으나 5축 NC 가공에 관한 전반적인 문제를 체계적으로 다루고 있는 문헌을 찾기는 쉽지않다. 본 연구에서는 5축 NC 가공 데이터 생성을 위한 전반적인 절차를 수립하고, 위에서 제기된 문제들 중 일부(충돌 문제 및 공구 자세의 효율성은 제외)를 해결하며 사용자의 편의성을 고려한 자유곡면 가공용 5축 NC가공용 CAM시스템을 개발하고자 한다.

2. 5축 NC가공의 주요 문제

2.1 5축 NC가공의 전반적인 절차

곡면 모델로부터 5축 NC data를 구하는 전반적인 절차는 3축 NC가공의 경우와 유사하다. Fig.2에 있는

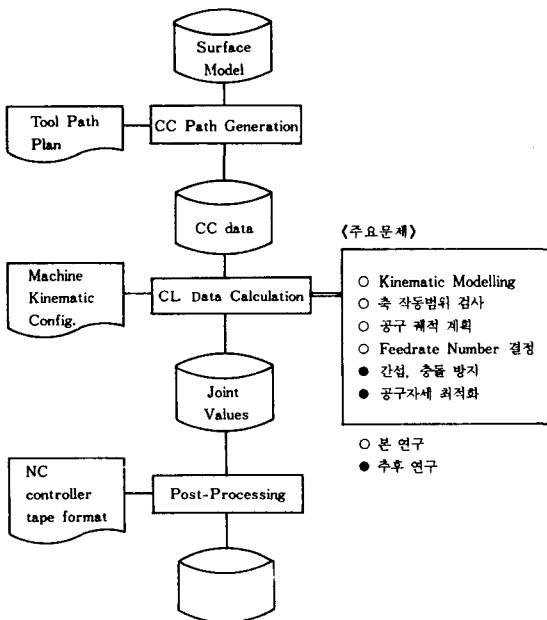


Fig.2 5축 NC 데이터 생성의 전반적 절차

바와 같이 곡면모델로부터 CC data(공구접촉점과 곡면의 법선벡터)를 구한다. 각 CC점에서 공구의 축 벡터를 결정하여 CL data(공구 끝 중심점의 위치 벡터와 공구의 축방향 벡터)로 바꾸어 준다. 이 CL data를 특정한 동작기계의 기구학적 구조에 따라 '기계축값(joint values)'로 변환시키며 이를 NC controller의 format에 맞도록 post-processing하여 최종적으로 NC data를 구하게 된다. CC data로부터 joint values를 얻는 과정에 본 연구에서 다루는 주요 문제의 해결이 필요하게 되며, 이는 로봇트 프로그래밍 과정과 유사하다.

2.2 5축 CL data

공구와 곡면과의 접촉점의 위치벡터와 곡면의 법선벡터(r, n)을 cutter contact(CC) data라 하고, 동작기계에서 공구제어의 기준점이 되는 공구 끝 중심점과 공구의 축방향 벡터(b, u)를 cutter location(CL) data라 한다(4). Fig.3과 같은 펠렛 엔드밀의 경우 두 데이터 간에는 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$|b = \begin{cases} |r + a(n-u) + b(u \times n \times u) / |u \times n|, & |u \times n| \neq 0 \\ |r + a(n-u), & |u \times n| = 0 \end{cases} \quad (1)$$

위 식에서 a는 공구의 모서리반경, b는 공구 모서리 토러스의 중심원의 반경을 나타내는데 a=0이면 평엔드 밀이고, b=0이면 볼엔드밀이 된다.

3축 NC가공의 경우는 공구의 축방향 벡터 u가 일반적으로 (0, 0, 1)의 값으로 고정되어 있으나 5축에서는 이를 임의로 변화시킬 수 있어 2개의 자유도가 증가된다. 5축 가공의 잇점은 공구축벡터 u를 효과적으로 결정함으로써 얻어지는데 u를 곡면상의 국소 좌표계에서 두개의 각도로 나타내면 기하학적 의미가 보다 명확해진다.

엔드밀링 작업은 절삭이 주로 행해지는 공구의 사용 부위에 따라 End cut과 Side cut으로 나눌 수 있는데 먼저 End cut의 경우를 살펴보자.

End-cut은 공구의 바닥부분에서 절삭이 주로 행해지도록 공구의 자세를 취하는 가공 방식이다. Fig.4와 같이 공구가 곡면위의 CC경로를 따라 이동할 때 공구 축벡터 u가 곡면의 법선벡터 n과의 사이각을 heel

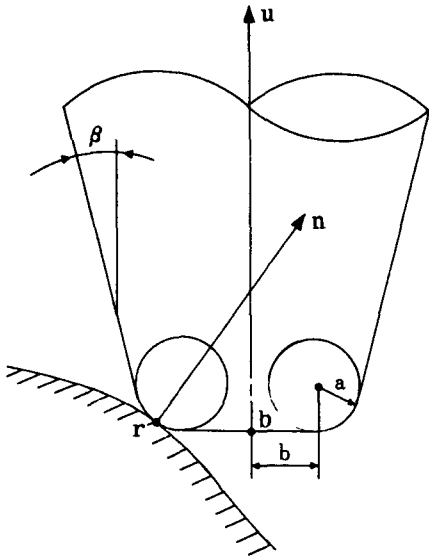


Fig. 3 CC data와 CL data

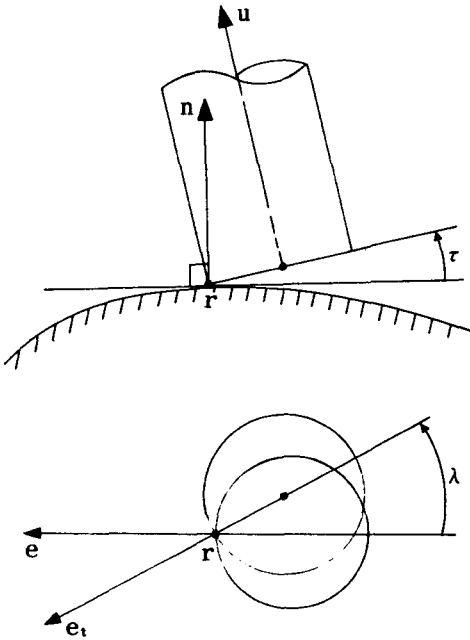


Fig. 4 Heel angle과 Rotate angle

angle τ 라 하고, 공구접촉점과 공구의 CL점을 잇는 벡터 $(b-r)$ 를 접평면에 투영한 벡터와 공구의 진행 방향의 사이각을 rotate angle λ 라 하면, 그림의 $r_t (=r)$ 에서의 공구축벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$u = n \cos \tau + e_t \sin \tau \quad (2)$$

여기서, $e_t = \text{Rot}(n, \lambda, e)$; 벡터 e 을 n 를 중심으로 각도 λ 만큼 회전한 벡터

$e = \text{unit}(n \times r_{12} \times n)$; 공구진행벡터의 normalization

$r_{12} = r_2 - r_1$; 연속된 두 CC점을 잇는 벡터

Heel angle τ 와 rotate angle λ 의 범위는 공구의 형상에 따라 제한을 받는다. 그림 3과 같이 엔드밀의 플랭크가 원추형인 경우는 $\tau \in [0, 90^\circ - \beta]$ 이다. 또 공구 바닥의 중심부에 절삭날(center-cut)이 있는 경우는 $\lambda \in [-180^\circ, 180^\circ]$ 이고, center-cut이 없어 하향 절삭이 곤란한 황삭용 밀링은 $\lambda \in [-90^\circ, 90^\circ]$ 의 범위를 갖는다. 본 연구에서는 바람직한 τ 와 λ 의 값을 사용자가 입력하도록 하고 있다.

Side cut은 공구의 원통 부분에서 절삭이 행해지도록 공구의 자세를 취하는 가공 방식이다. Side cut 방식은 ruled surface를 cusp이 전혀 생기지 않도록 윤곽가공하는 데 많이 쓰이고 있다. Fig. 5와 같이 공구축벡터와 곡면의 접평면이 이루는 각도를 lift angle ϕ 라 하고 공구축벡터를 접평면 투영시킨 벡터와 곡면상의 특정 접선벡터와의 사이각을 lead angle θ 라 하면, 공구축벡터 u 는 다음과 같이 주어진다.

$$u = (r_t \cos \theta + r_n \sin \theta) \cos \phi + n \sin \phi \quad (3)$$

여기서, r_t : 곡면상의 특정방향 접선벡터

(주로 isoparametric direction)

n : 곡면의 normal vector

r_n ; r_t 와 n 에 각각 수직하고 공구진행방향에 가까운 단위방향벡터

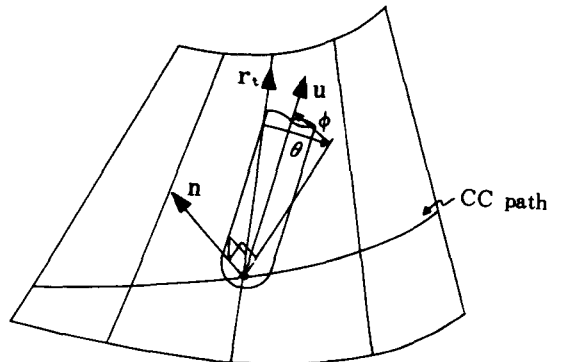


Fig. 5 Lift angle과 Lead angle

2.3 기구학적 모델링

회전이동축을 갖고 있는 5축 NC 기계에서는 Cartesian space 상에서의 공구 끝 중심점(CL점)의 이동에 해당되는 기계 축들의 이동량을 파악하는게 그리 쉽지 않으며 이의 관계를 명확히 밝히기 위해서는 기계 기구의 모델링(kinematic modeling)이 필요하게 된다.

복잡한 축 구조를 갖는 다축 NC 기계의 경우는 로봇공학에서 널리 사용되는 "Denavit-Hatenberg representation (D-H rep)"을 이용하는 것이 일반적이며, 간단한 구조를 갖는 경우는 기하학적 방법으로 모델링이 가능하다(5, 6, 7).

Fig. 6은 현재 KIST CAD/CAM실에 도입되어 있는 Cincinnati Miracron의 수직형 5축 밀링 머신을 보여주고 있다. 이 기계는 서로 직교하는 3개의 평행이동축 X, Y, Z축과 두개의 회전축 A, B축으로 구성되어 있다. 이 기계는 A축의 회전중심축과 B축의 회전중심축이 공간상의 한 점에서 교차하도록 되어 있는데 이 점을 pivot point라 한다.

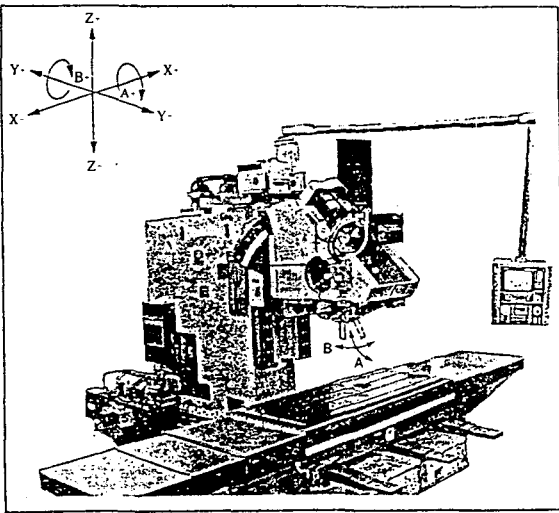


Fig. 6 Cincinnati Milacron의 수직형 5축 밀링 머신

공구의 CL점을 $b = (x, y, z)$, 공구의 축방향벡터를 $u = (u_x, u_y, u_z)$ 라 하고, 공작기계 각 축(joint)의 이동량, 즉 joint values를 X, Y, Z, A, B라 할 때 주어진 (X, Y, Z, A, B)로부터 (x, y, z, u_x, u_y, u_z) 값을 구하는 식을 direct kinematic solution이라 하고 그 역을 inverse kinematic solution이라 한다.

예를들어 Fig. 6 기계의 경우 (A, B)의 값과 u 의 관계는 반지름 1인 구면을 위도(A)와 경도(B)로 표시하는 것과 유사한데(Fig. 7), direct kinematic solution은 다음과 같이 간단하게 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 u_x &= \cos A \sin B \\
 u_y &= -\sin A \\
 u_z &= \cos A \cos B \\
 x &= X - d u_x \\
 y &= Y - d u_y \\
 z &= Z - d u_z
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

여기서, d=CL점에서 pivot point까지의 거리 위의 식으로부터 inverse kinematic solution은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 X &= x + d u_x \\
 Y &= y + d u_y \\
 Z &= z + d u_z \\
 A &= -\sin^{-1}(u_y) \\
 B &= \tan^{-1}(u_x/u_z)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

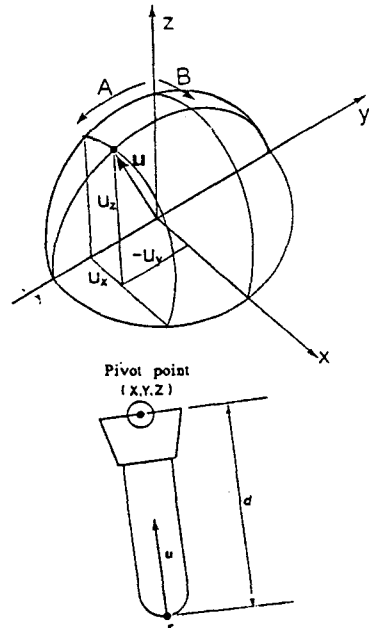


Fig. 7 CL data와 Joint values(Fig. 6의 기계)

2.4 공작기계의 작동범위 검사

식(5)로부터 얻어진 joint value들은 각각 해당축의 작동범위내에 들어야 한다. 특히 회전축의 경우는 축의 작동범위를 벗어나기가 쉬운데 Fig.6에 있는 기계는 A, B축 모두 $\pm 25^\circ$ 의 작동범위를 갖고 있다.

Joint value들이 작동범위를 벗어난 경우는 해당되는 CC점을 가공하지 않거나 공구의 자세를 수정하여야 한다. Fig.8은 공작기계 회전축의 작동범위의 예를 보여 주고 있다. 그림 a는 joint 좌표계에서 회전축 A, B의 작동 범위를, 그림 b는 Cartesian 좌표계에서의 공구의 축방향 범위를, 그림 c의 두 그림은 각각의 곡면 국소 좌표계에서 heel angle τ 와 rotate angle λ 의 범위를 나타낸다. 만약 사용자가 그림 c의 점 R과 같이 (τ, λ) 를 결정한 경우 곡면상의 이 위치에서는 공작기계의 작동범위를 벗어나게 되므로 경계선 위의 점 $R'(\tau', \lambda')$ 로 이동시켜야 한다.

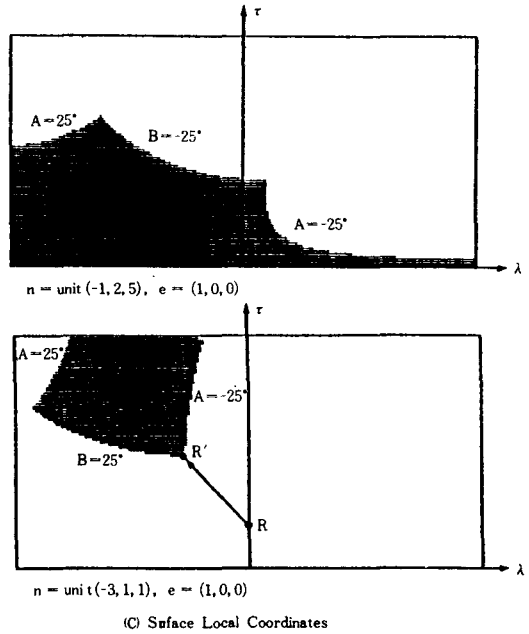
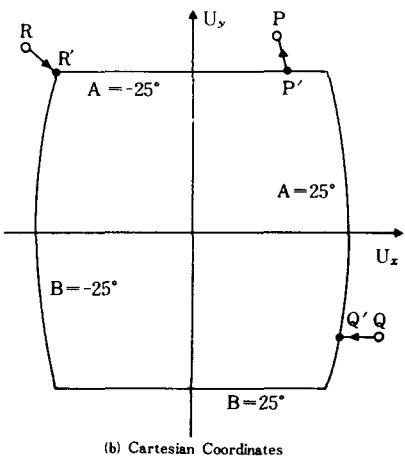
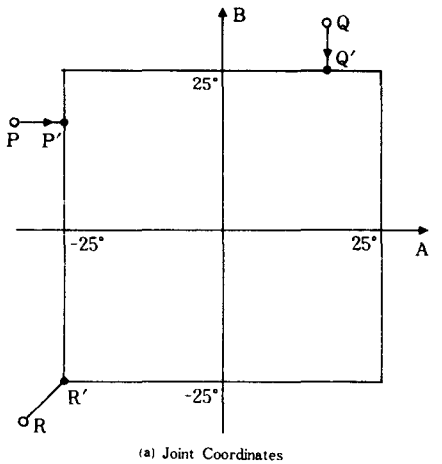
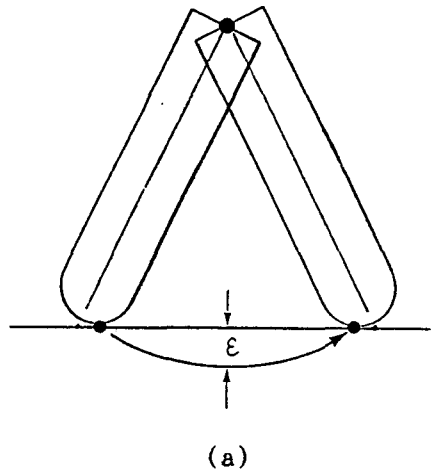


Fig. 8 공작기계 회전축의 작동범위

2.5 CC data의 선형 궤적 계획

대부분의 5축 NC기계에서는 joint space 상에서의 선형보간 기능은 갖고 있으나 Cartesian space 상에서의 공구 끝 중심의 선형보간 기능을 제공하지 않는다. 따라서 주어진 2개의 CC데이터를 직선으로 이동하고자 하는 경우에는 공구 끝 중심점의 궤적이 직선에 가깝도록 여러개의 NC데이터를 별도로 구해서 NC controller에 입력하여야 한다(그림 9).



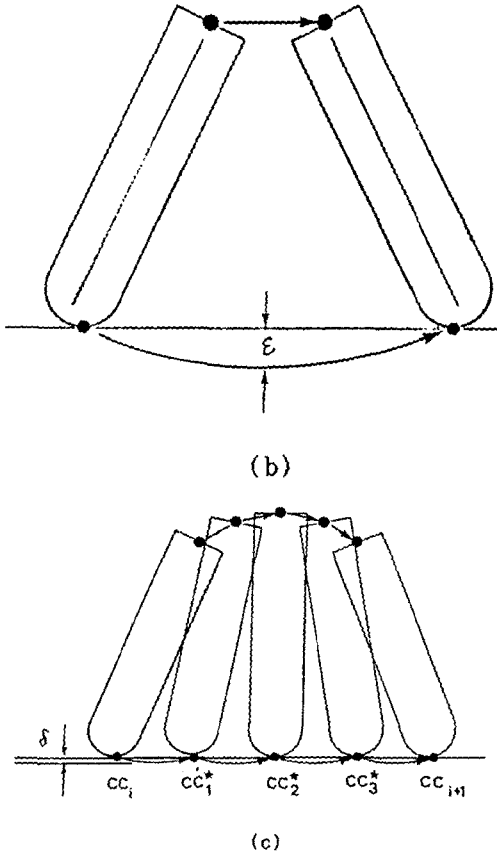


Fig.9 CC점의 이동 오차 및 직선 궤적 계획

선형보간공차 δ 가 주어졌을 때 두 CC data 사이에 삽입할 CC데이터의 갯수는 근사적으로 다음과 같이 들 수 있다(8).

$$N = \text{trunc} \{ e_A \alpha / 2 \cos^{-1} (1 - \frac{\delta}{d_A}) + e_B \beta / 2 \cos^{-1} (1 - \frac{\delta}{d_B}) \} \quad (6)$$

여기서, $\text{trunc} \equiv$ 실수의 정수화 (cut-off)
 $d_A =$ CC점에서 A축 회전중심축까지의 거리
 $d_B =$ CC점에서 B축 회전중심축까지의 거리
 $e_A =$ CC점에서 A축 회전중심축 방향벡터
 $e_B =$ CC점에서 B축 회전중심축 방향벡터
 $\alpha =$ A축의 이동량
 $\beta =$ B축의 이동량

CC_i와 CC_{i+1} 사이에 삽입할 CC_j* (j=1, ..., N)는

$$r_j^* = r_i + (r_{i+1} - r_i) * j / (N+1)$$

$$n_j^* = \text{unit} (n_i + (n_{i+1} - n_i) * j / (N+1)) \quad (7)$$

여기서, $\text{unit} \equiv$ vector normalization 이 된다.

2.6 Feedrate number의 계산

Feedrate는 절삭가공의 관점에서 보면 공구회전속도와 함께 절삭 chip의 두께를 결정하는 인자로서 공구점 축점의 이동속도를 나타내며, 공작기계에 입력하는 feedrate number는 기계축의 운동속도에 관련된 값으로서 5축기계의 경우에는 회전축이 있으므로 그 관계가 3축의 경우보다 복잡하다.

공구점축점의 이동속도인 feedrate가 주어졌을 때 이에 해당하는 feedrate number를 계산하는 방법은 NC controller에 따라 몇가지 종류로 구분된다.

1) 시간역수 코드 (inverse time code)

Fig.6의 Cincinnati Miracron에 장착된 NC controller인 Acramatic CNC Model 950-MC는 feedrate number로 inverse time code를 쓸 수 있도록 되어 있다(9). 두 인접한 CC데이터간의 이동시간 T와 feedrate number FRN은 다음과 같다.

$$T = \frac{60L}{F} \quad (\text{sec}) \quad (8)$$

$$FRN = \frac{1}{T} = \frac{F}{60L} \quad (\text{sec}^{-1}) \quad (9)$$

여기서, F=CC point간의 이동속도(mm/min)
 $L = |CC_{j+1}^* - CC_j^*|$; 두 CC점 간의 거리(mm)

2) Euclidean Norm 코드

FANUC, Toshiba 등과 같은 NC controller는 평행 이동 축들을 동시제어하는 방식을 회전축에도 똑같이 적용하고 있다(10, 11). 이 경우의 feedrate number는 다음과 같이 결정된다.

$$FRN = \frac{L_2}{T} \quad (10)$$

여기서, T=CC데이터간의 이동시간(식(8))

$$L_2 = \Delta X^2 + Y^2 + \Delta Z^2 + \Delta A^2 + \Delta B^2$$

; 축값이동량의 Euclidean Norm

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$; 평행이동축의 이동량(mm)
 $\Delta A, \Delta B$; 회전이동축의 이동량(degree)

3) Techebycheff Norm 코드

Tosnuc 500SP controller의 경우는 식(12)의 Euclidean norm 대신 Techebycheff norm을 쓰고 있다 [12]. 즉,

$$FRN = \frac{L_{\infty}}{T} \quad (11)$$

여기서,

$$L_{\infty} = \max\{|\Delta X|, |\Delta Y|, |\Delta Z|, |\Delta A|, |\Delta B|\}$$

:축값 이동량의 Tchebycheff norm

3. 5축 가공 CAM 시스템의 구성

3.1 시스템의 개요

본 연구에서 개발한 자유곡면의 5축 NC가공용 CAM 시스템은 다음과 같은 기능을 갖고 있다.

- ① 메뉴방식에 의한 편리한 사용방식 채택[13]
- ② 위상학적 관계가 없는 곡면들의 집합인 복합곡면의 연속적 가공[13]
- ③ 다양한 공구경로(parametric & Cartesian)계획 및 공구 접근방법[13]
- ④ 다양한 5축 가공방법(fixed axis, variable axis, side cut mode)[8]
- ⑤ 다양한 공구의 사용(ball, flat, filleted endmill)[13]
- ⑥ ball endmill에 대한 공구간섭방지[4, 13]
- ⑦ 일반성있는 동작기계 지향 후처리[8, 13]

이 시스템은 FORTRAN 77로 프로그램 되었으며, KIST CAD/CMA실에서 개발하고 있는 금형가공용 CAD/CAM 시스템인 "CASSET"의 한 모듈로 이용되고 있다[8, 13].

3.2 Menu System

본 모듈은 CASSET System에서 'NC5'라는 하나의 Function으로 되어 있으며 Function NC5는 6개의 menu로 구성되어 있는데 각각의 menu들은 각자 sub-item들을 갖고 있다(Fig. 10) [8].

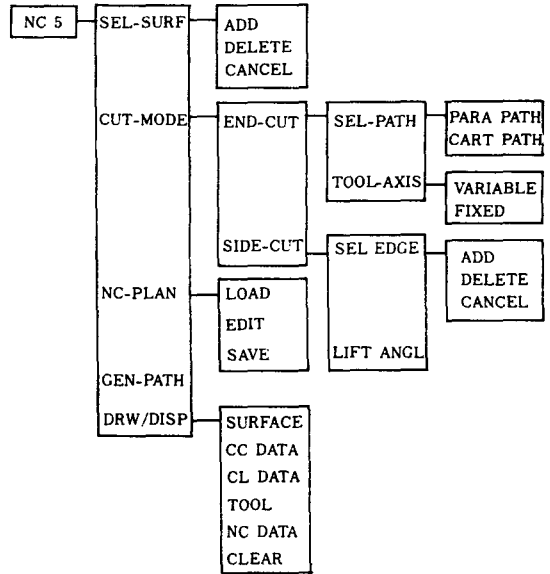


Fig. 10 Menu 구조

3.3 적용 사례

Fig. 11는 박용 프로펠라의 날개면을 Flat endmill(또는 Face mill)로 가공하는 모습을 보여주고 있다.

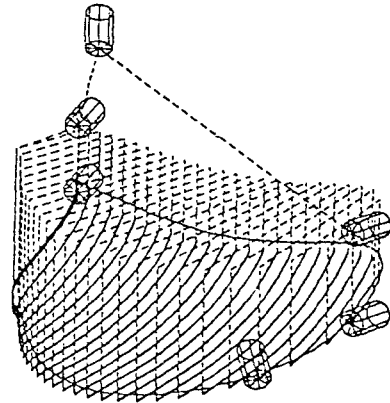


Fig. 11 프로펠라 날개면의 파라메트릭 가공

Fig. 12는 3개의 곡면을 한꺼번에 parametric과 Cartesian path로 연결하여 가공하고 있는데 공구간섭을 제거한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 13은 ruled surface인 원뿔면을 Side cutting한 결과를 보여주고 있다.

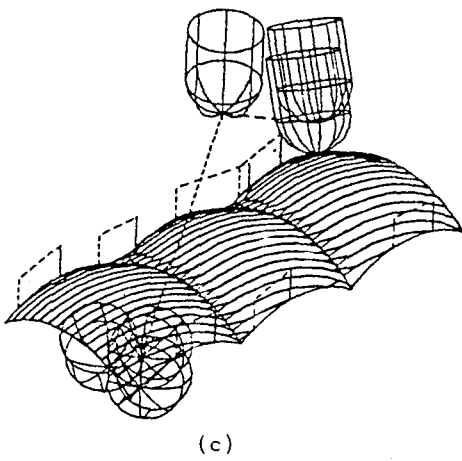
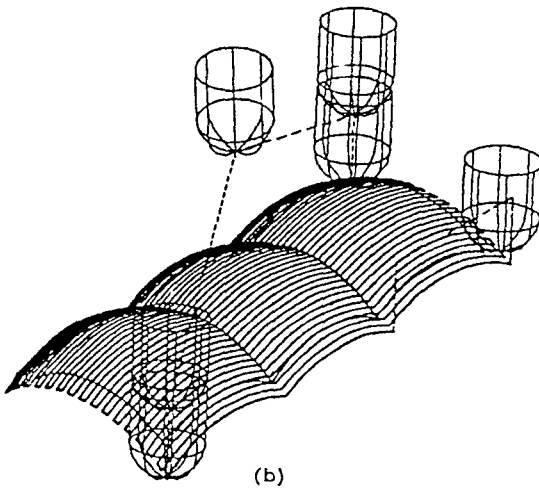
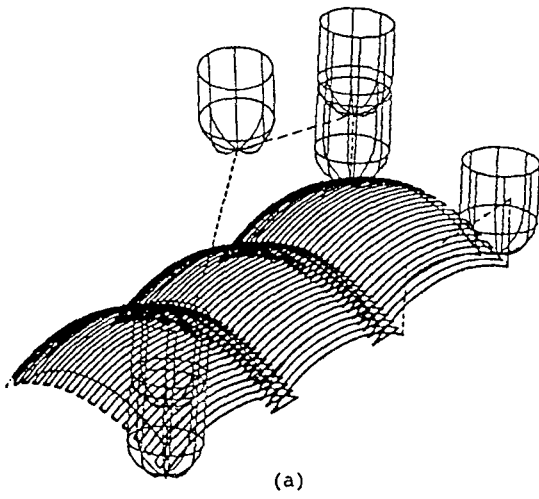


Fig. 12 복합곡면의 가공 및 공구간섭 제거

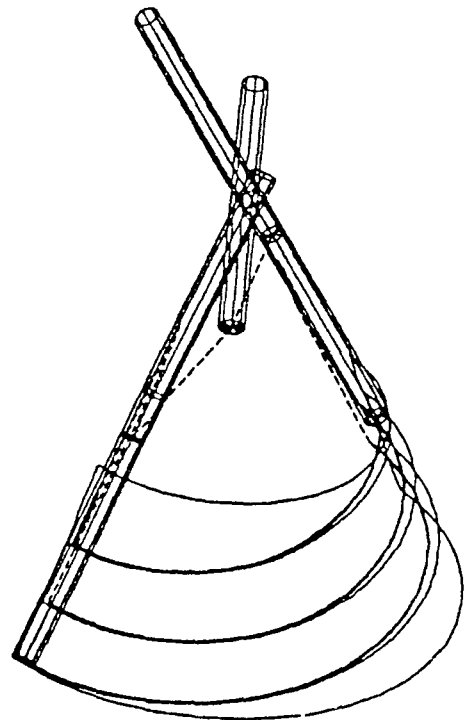
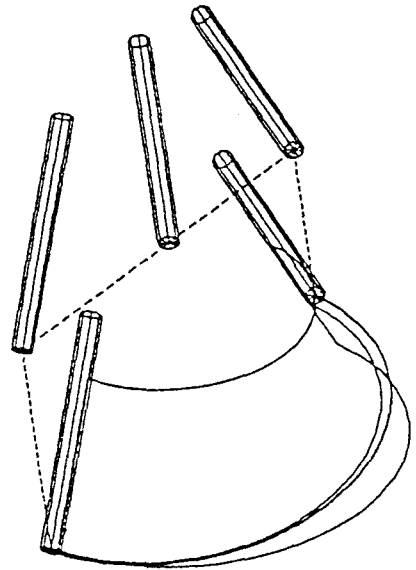


Fig. 13 원뿔면의 side cutting

```

x
G70
G17G40G93
S500M3
G92X.OY.OZ120.OA.OB.O
GOX100.5726Z119.1616B-23.629
Z21.1657
G1Z1.1657F.042
X100.4752Y3.0744Z1.2711A.7B-23.619F.422
X100.2755Y6.1227Z1.3798A1.394B-23.587F.425
X99.9753Y9.1428Z1.4919A2.083B-23.535F.428
X99.577Y12.1327Z1.6076A2.766B-23.462F.43
X99.0825Y15.0904Z1.7272A3.443B-23.369F.433
X98.4944Y18.0142Z1.8508A4.113B-23.256F.435
X97.8147Y20.9021Z1.9787A4.778B-23.125F.437
...
...
X-82.7185Y27.7417Z30.7739A7.266B22.446F.369
X-83.7038Y24.3945Z31.0927A6.394B22.718
X-84.552Y21.0033Z31.406A5.508B22.956F.368
X-85.2594Y17.5725Z31.7137A4.612B23.16F.367
X-85.8224Y14.1072Z32.0158A3.706B23.327F.366
X-86.2378Y10.6122Z32.3121A2.791B23.458
X-86.5028Y7.0926Z32.5026A1.867B23.553F.365
X-86.6151Y3.5534Z32.8872A.937B23.61F.363
X-86.5726Y.0233.1657A.0B23.629F.362
G0Z119.1616
X.OZ120.OB.O
M2
    
```

Fig. 14 5축 NC data의 예

그림 14은 그림 12(a)의 경우에 해당되는 NC code의 일부를 보여주고 있다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 자유곡면을 5축 NC가공하는 전반적 절차를 수립하고 각 과정에서 주요문제를 도출하였으며 이의 해결방안들을 제시하였다. 또한 기존의 곡면 모델러와 연결하여 사용가능한 5축 CAM module을 개발하였다.

5축 NC 가공의 CC 경로를 얻는 절차는 3축 NC 가공의 경우와 동일하다[4]. CC 데이터로부터 5축 CL 데이터로 변환하는 과정에서는 공구축벡터의 결정이 필요하다. 본 연구에서는 End-cut의 경우는 heel angle과 rotate angle, Side-Cut의 경우는 lift angle과 lead angle을 사용자가 입력하도록 하였다. CL 데이터로부터 공작기계의 축값을 얻는 과정은 robot 공학에서 많이 다루고 있는 기구학적 모델링, 축값범위 검토, 선형 궤적 계획과 이송속도의 결정등이 필요하며, 본 연구에서는 NC 가공의 경우에 적합한 해결 방안을 제시하였다.

끝으로 5축 NC 기계의 잇점을 보다 충분히 살리기 위해서는 다음 문제의 해결을 위한 추후연구가 필요하다: 1) 공구간섭, 충돌방지, 2) 최적의 공구자세 결정문제.

후 기

본 연구는 과학기술처 특정연구개발사업 "CIM 기술 개발"의 일환으로 수행된 "사출성형 금형의 생산 자동화 CIM 모델 플랫폼"과제 연구 결과의 일부이며, 이를 지원한 과학기술처에 감사드린다.

참고문헌

1. Choi, B.K., Park, J.W. and Jun, C.S., "CL-data optimization in 5-axis surface machining", to appear in Computer-Aided Design, 1993.
2. Marciniak, K., "Influence of surface shape on admissible tool positions in 5-axis face milling", Computer-Aided Design, Vol. 19, No. 5, pp. 233~236, 1987.
3. Mason, J., "5x5 for High-productive airfoil milling", American Machinist, Nov. 1991, pp. 37~39.
4. 전차수, 자유곡면 NC가공에서의 공구간섭방지, 박사학위논문, 한국과학기술원, 1989.
5. 박정환, 자유곡면 5축 NC 가공에 있어서의 최적 CL data 계산에 관한 연구, 석사학위논문, 한국과학기술원, 1991.
6. 김광수, 최영환, "자유곡면 가공을 위한 CAD/CAM 시스템", 대한산업공학회지, 제17권 1호, 1991.
7. Fu, K.S. et. al, Robotics, the MIT press, 1987.
8. 전차수, "5축 NC 가공을 위한 프로그래밍 시스템 개발", 컴퓨터를 이용한 통합생산 자동화기술개발, 제3차년도 연차보고서, 과학기술처, 1991.
9. Cincinnati Milacron, Programming Manual for Cincinnati Milacron 20v&30v Series Vertical Axis Machines, 1989.
10. FANUC, FANUC system 9-model A: Operator's Manual, 1981.
11. Toshiba, TOSNUC 600M Instruction Manual, 1985.
12. Toshiba, TOSNUC 500SP Programming Manual, 1985.
13. 최병규, 전차수, 조준훈, 곡면모델러용 CAM 모듈의 개발, 1차년도 GMP보고서, 한국과학기술원 CAD/CAM실, 1989.