

# 자유곡면 5축 NC 가공에 있어서의 최적 CL data 산출

최병규\* · 박정환\* · 김화영\*\*

\* 한국과학기술원 산업공학과

\*\* 현대중공업(주) 엔진사업부 전산실장

## Abstract

5-axis NC machining of sculptured surface using non-ballendmill cutters (eg. facemilling cutters) is widely used in the machining of turbine blades and marine propellers. Since there are more degrees of freedom in 5-axis machining than in 3-axis machining, generating "optimum" cutter paths and finding desirable cutter positions become very important in order for an efficient use of 5-axis NC machines. Also critical in 5-axis NC machining are collision avoidance, gouging checking, and efficient kinematic solutions.

In this paper we discuss the above issues in generating 5-axis CL data. They are : kinematics modeling of NC machine; inverse kinematics solution; interference between machine component and surface; cutter gouging.

A unique search method for obtaining optimal CL data is proposed. The proposed method has been successfully implemented in the machining of marine propellers on a dual 5-axis (ie, 9-axis) NC machine.

## 1. Introduction

5축 NC 가공은 항공기, 선박등에 이용되는 각종 blade, propeller등의 가공에 많이 이용되고 있으며, 일반적인 Ball-End Milling보다는 Face-Milling이 절삭성에 도움을 준다.

자유곡면의 5축 NC 가공에 있어서 일반적인 3축 가공과 구별되는 점이 있다면 주어진 공구 접촉점 (CC:cutter contact)에 대하여 다양한 공구위치 (CL:cutter location) 점이 가능하다는 것이다. 이는 5축 가공의 경우 더 많은 자유도가 존재하기 때문이며, 따라서 기계축값 limit, 기계구조물및 작업물간의 충돌등의 constraint를 만족하면서 cusp를 최소로 남기는 CL data를 계산해 주는것은 대단히 중요한 문제이다.

본 연구에서는 Face-Mill을 이용한 자유곡면의 5축 NC 가공에 있어서의 최적 CL data를 구하는 과정및 적용사례에 관하여 살펴보고자 한다.

## II. 전반적인 과정

일반적인 3축가공과는 달리 5축가공에서는 적용하려는 NC 기계의 kinematics modeling및 inverse kinematics solution을 구하는 과정이 필요하고, 공구위치점을 변화시킬수 있도록 tilt및 rotate각도를 고려하는 과정이 필요하다. 물론 기계의 limit 이나 각종 간섭의 확인은 필수적인 과정이다.

### ● Kinematics Modeling & Inverse Kinematics Solution 계산

하나의 CL data에 대하여 각 축의 축값을 결정하기 위해서는 주어진 NC 기계의 linkage system을 파악, 적당한 방법 - 본 연구에서는 Denavit-Hatenberg convention [Craig 86] 을 이용 - 으로 이를 모델링한 후, manipulator transform graph로부터 역기구학 해를 계산해 주어야 한다. 5축 NC 가공의 경우 입력으로 들어오는 CL data의 자유도가 5개이므로 (공구 법선벡터와 위치벡터) unique한 해가 존재한다.

대개의 경우는 수식적으로 해가 얻어지지만 본 연구의 적용기계는 기계구조의 특성으로 인하여 최초의 한 축값을 수치해석적인 방법으로 구한 후 나머지 축값을 계산해 주어야 했다.

### ● Tilt & Rotate각도 설정

Tilt 각은 곡면의 법선벡터와 위치벡터로 이루어 지는 접평면과 Face-Mill 공구밀면간의 각도를 의미하고, rotate각도는 공구진행방향에 대해서 공구를 틀어주는 각도이다 (그림 1). 이는 3축 가공에서는 볼수 없는 특성이며 tilt와 rotate각을 변화시

킴으로써 하나의 CC data에 대하여 많은 CL data를 계산해 내는것이 가능하고, 다양한 CL data로부터 모든 constraint를 만족하는 최적해를 선택하는것이 가능해진다.

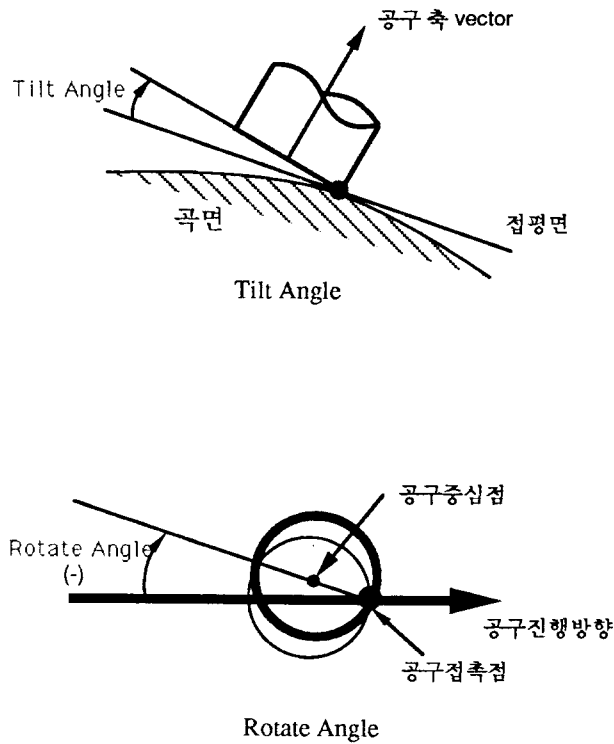


그림 1 Tilt & rotate 각도

Tilt와 rotate각을 고려하지 않는 CL data계산은 간단하다 [JCS 89]. 식 (1)은 tilt및 rotate를 고려한 CL data 계산식이다.

$$N_{cl} = ( N + Et' \tan \alpha ) / | N + Et' \tan \alpha | \quad (1)$$

$$P_{cl} = P_{cc} + R \{ N_{cl} \times N \times N_{cl} \} / | N_{cl} \times N | \quad (2)$$

where  $N_{cl}$  : 공구법선벡터,

$P_{cl}$  : 공구중심점 위치벡터,

$N$  : 곡면 법선 벡터,

$\alpha$  : tilt angle,

$R$  : 공구반경,

$Et'$  = 공구진행방향단위벡터  $Et$ 를  $N$  을 중심으로 rotate각도 회전.

## ● Feasibility Test

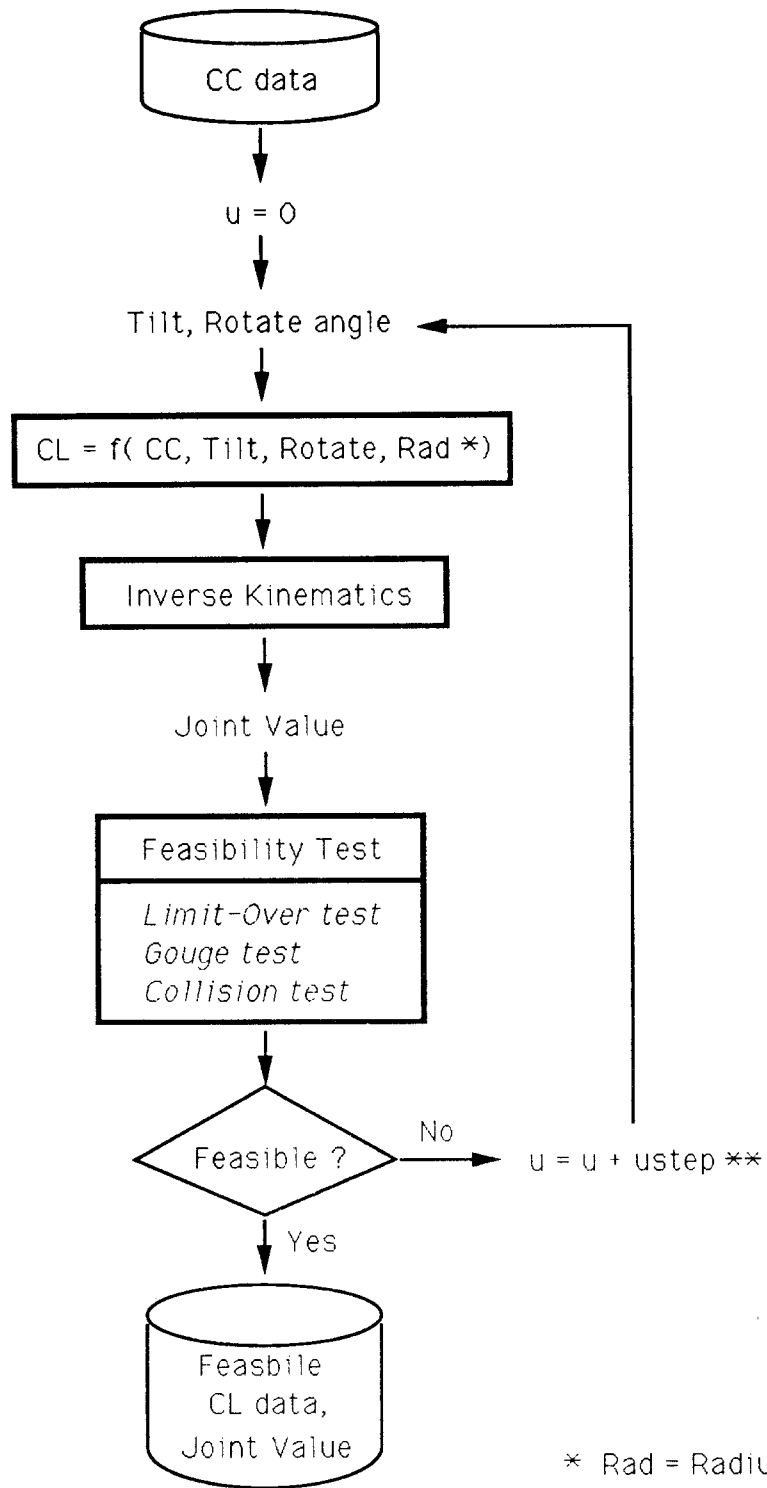
하나의 Tilt, Rotate 각 쌍으로부터 계산된 CL data 및 축값이 과연 각종 constraint 를 만족하는지를 확인하기 위하여 다음과 같은 test 를 거쳐야 한다.

- i) 모든 축값이 기계 축 Limit 내에 들어 오는가 ?
- ii) 공구와 곡면간의 간섭은 없는가 ? (Gouge test)
- iii) 기계 구조물과 곡면간의 충돌은 없는가 ?

위의 test i) ~ iii) 가운데서 ii), iii) 은 자유곡면 modeling 단계에서 생성하는 Z-map data를 이용하면 쉽게 확인이 가능하다. 즉 확인하고자 하는 각 point의 (x,y) 에 대응하는 곡면의 Z 값과 확인점의 Z 값을 비교하면 간섭의 존재 유무를 판별할 수 있다 [Choi 91]. 공구간섭의 유무는 Face-Mill 밀면의 점들에 대해 Z-map test를 이용하였으며, 기계구조물 (예 : Spindle motor)과 곡면간의 간섭은 기계구조물의 majorizing box 의 각 vertex 에 대한 Z-map test를 이용하였다.

만약 초기 tilt, rotate 각도 (예 : tilt 2° ; rotate 0° ) 에서 구한 CL data 및 축 값이 infeasible로 판명된다면 그 이후에는 tilt, rotate 각도를 변화시키면서 위의 test를 반복하게 된다. 따라서 기 지정한 tilt, rotate 범위내에서 i) ~ iii) 의 constraint를 만족하면서 최소의 tilt, rotate 각을 가지는 CL data를 구하는 것이 곧 현 CC 점에 대한 최적 CL data를 구하는 것이 될 것이다 (공구의 tilt, rotate 각도의 증가는 cusp의 증가를 가져온다).

그림 2 에 CC → CL 의 전체 Flow를 보였으며, u는 2차 Bezier curve 의 parameter 값인데 이에 대해서는 3장에서 보충설명을 하였다.



\* Rad = Radius of Face-Mill

\*\*  $0 \leq u < 1$

그림 2 Overall Flow

### III. Feasible Solution Space 와 Search

그림 3 에 보인 것은 기 지정한 tilt,rotate 각 범위 ( 0~15° , 0~-85° ) 에서 하나의 CC data에 대한 feasible solution space의 예이다.

그림에서 알 수 있듯이 tilt,rotate 각 쌍에 대해 많은 feasible solution 이 존재하기 때문에 적절한 search 가 필수적이다. 그림과 같은 예에 있어서 여러가지 search 방법이 가능하겠지만 본 연구에서는  $V_1(2,0)$ ,  $V_2(15,0)$ ,  $V_3(15,-85)$  혹은  $V_1(2,0)$ ,  $V_2'(2,-85)$ ,  $V_3(15,-85)$  점을 control point (vertex) 로 가지는 2차 Rational Bezier curve [Choi 91] 를 따라가는 방식을 사용하였다.

( $V_1, V_2, V_3$ ) 를 control point 로 가지는 2차 Bezier의 경우에는 초기 tilt 각 변화가 rotate 각 보다는 상대적으로 심할 것이며, ( $V_1, V_2', V_3$ ) 의 경우는 반대의 경우가 된다. 또한 2차 Rational Bezier curve 의 weight를 변화시킴으로써 tilt,rotate 각도의 변화율을 조정하는 것이 가능하다.

초기의 u step size 를 크게 주고 진행하다가 최초로 feasible solution 이 얻어지면, 직전의 parameter u 값과 현재의 parameter u 값을 각각 하한 및 상한으로 지정하고 Binary search 를 수행하는 것이 본 연구에서 이용한 방식이다.

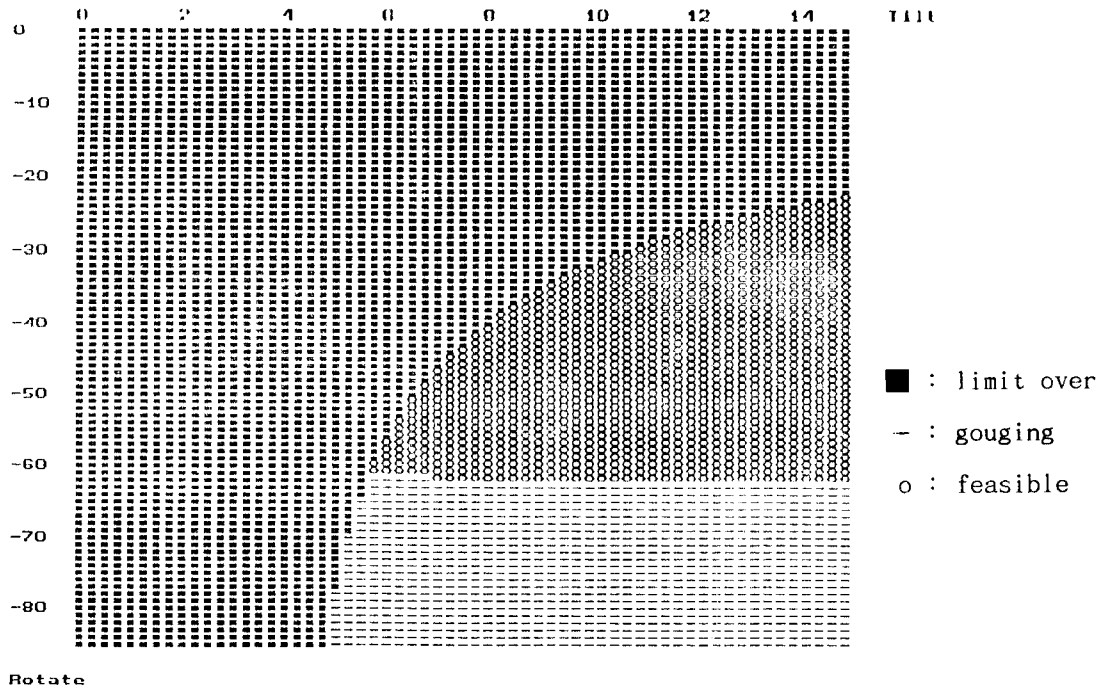


그림 3 Solution space의 예

#### IV. 결론 및 적용 사례

본 연구는 선박용 프로펠라 가공을 위한 9축 (C축을 공유하는 dual 5축) NC 기계를 대상으로 하였다 (그림 4). 곡면 모델링으로부터 나온 가공 path 상의 각 CC point에 대해, tilt, rotate 각 쌍을 변화시켜 cusp 을 최소화 하면서 전반적으로 smooth 하게 축값이 변화되도록 최적 CL data 를 얻어내는 과정과, solution space 내에서의 search 에 관하여 살펴보았다.

자유도가 큰 5축 가공에 있어서는 tilt, rotate 각도라는 변수를 최대한 활용하여 가능한 한 모든 constraint (기계축 Limit, 간섭등) 를 만족하도록 하면서 최적의 공구 위치를 잡아주는 것이 대단히 중요한 일이다.

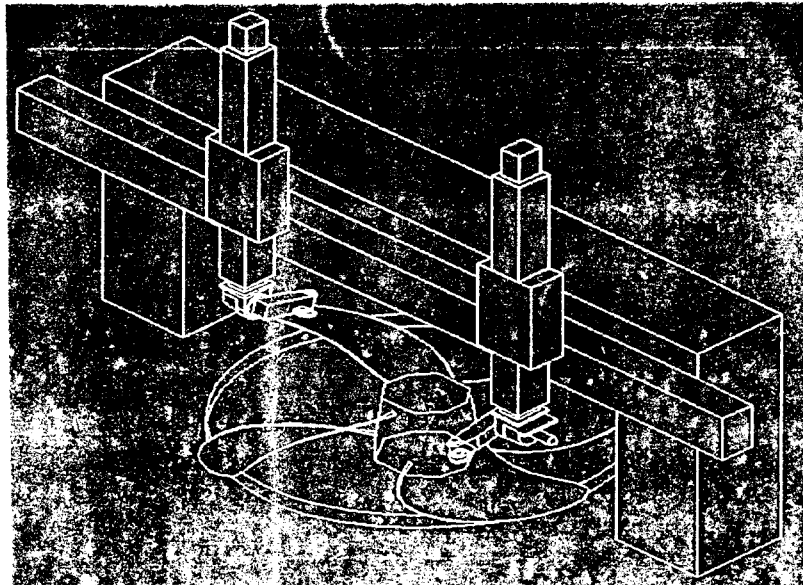


그림 4 적용 NC 기계의 모형도

#### V. 참고 문헌

- [Choi 91 ] B.K. Choi, "Surface Modeling for CAD/CAM", Elsevier, 1991
- [Craig 86] J.J. Craig, "Introduction to Robotics, mechanics & control", Addison Wesley, 1986
- [JCS 89 ] 전 차수, "자유곡면 NC 가공에서의 공구 간섭 방지", KAIST 박사학위논문, 1989