

Z-map 모델을 이용한 정밀형상 모델링

박정환*, 정연찬**, 최병규***

Precision Shape Modeling by Z-Map Model

Jung W. Park*, Yun C. Chung**, and Byoung K. Choi***

ABSTRACT

Z-map is a special form of discrete nonparametric representation in which the height values at grid points on the xy-plane are stored as a 2D array $z[i,j]$. While z-map is the simplest form of representing sculptured surfaces and it is the most versatile scheme for modeling nonparametric objects, its practical application in industry (eg. tool-path generation) aroused much controversy over its weaknesses: accuracy, singularity (eg. vertical wall), and some excessive storage needs. Although z-map has such limitations, much research on the application of z-map can be found in various articles. However, research on the systematic analysis of sculptured surface shape representation via z-map model is rather rare. Presented in this paper are the following: shape modeling power of the simple z-map model, exact (within tolerance) z-map representation of sculptured surfaces which have some feature-shapes such as vertical-walls and real sharp-edges by adopting some complementary z-map models, and some application examples.

Key Words : shape modeling(형상모델링), z-map(지-맵), CZ-map(씨지-맵), EZ-map(이지-맵)

1. 서론

일반적으로 CAD/CAM을 위한 곡면 모델은 크게 매개변수형 곡면 (parametric surface)과 비매개변수형 곡면 (nonparametric surface)으로 구분할 수 있다. 또한, 각 곡면 모델의 수학적 표현으로는, 매개변수형 곡면의 경우 NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) 곡면이 대표적인 예라 할 수 있으며, 비매개변수형 곡면의 경우 일반적으로 다면체^(1,2), z-map^(3,4) 또는 dexel^(5,6) 등의 모델을 찾아볼 수 있다. 이러한 곡면 모델은 적용 분

야에 따라 각각 장단점을 가지고 있다⁽⁷⁾. 특히 매개변수형 곡면은 다양한 분야에서 매우 효과적인 도구임에는 틀림이 없으나, 특수한 경우의 기하학적 문제를 다룰 때에는 다소의 어려움이 있다⁽⁸⁾.

비매개변수형 곡면⁽⁹⁾은 곡면의 2차원 정의역이 xy 평면으로 주어지며, 곡면을 직교좌표계 (Cartesian coordinates)로 표현한다면 식 (1)과 같은 양함수식 형태를 가진다.

$$z = f(x, y) \tag{1}$$

* 영남대학교 기계공학부
 ** Chrysler Technology Center
 *** 한국과학기술원 산업공학과

Z-map은 비매개변수형 곡면의 특수한 형태로서, 식 (2)에서 보듯이 xy 평면 (domain)에 정의된 격자점 (grid-point)에서의 높이값을 2차원 배열 Z[i,j] 형식으로 저장하고 있다 (Fig. 1).

$$z(i, j) \text{ with } x = x_o + d_x \cdot i \text{ and } y = y_o + d_y \cdot j. \quad (2)$$

여기서, d_x, d_y 는 x 및 y 방향 격자간격 (grid-interval), x_o, y_o 는 z-map 영역의 원점.

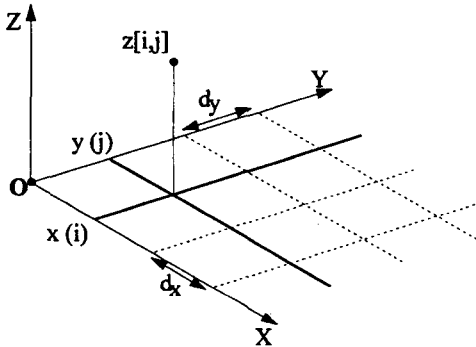


Fig. 1 Z-map model

임의의 점 (x,y)가 격자점일 경우 인덱싱 변수 i,j는 식 (3)으로부터 얻어지고, 해당 높이값은 배열 Z[i,j]로부터 얻어진다. 만약 점 (x,y)가 격자점이 아닐 경우에는, 적절한 보간 (interpolation)에 의해 높이값을 계산하여야 한다.

$$i = (x - x_o) / d_x \text{ and } j = (y - y_o) / d_y \quad (3)$$

현재 z-map 모델은 NC 공구경로 검증^(4,6,9-12), CAPP (computer-aided process planning)^(13,14), 금형가공⁽⁴⁾, 공구경로 생성^(4,15-18) 등의 다양한 분야에 적용되고 있으며, 컴퓨터 그래픽스의 z-buffer⁽¹⁹⁾ 또는 로봇 비전 분야의 거리계 (range finder)⁽²⁰⁾를 이용한 depth map⁽²¹⁾과 유사하다고 할수 있다.

Z-map 모델은 간단한 데이터 구조로 인하여 오프셋팅 (offsetting), 블렌딩 (blending) 등과 같은 곡면 조작⁽²⁾의 편리함, 계산의 강건함 (robust) 등 여러 가지 장점을 가지고 있다. 반면, 정밀도 향상에 따른 과도한 기억용량, 계산시간 증가 등의 단점을 가지고 있는 것이 사실이다. 예를 들어 형상면의 xy 크기가 1000×1000인 금형 형상

곡면을 5/100의 허용오차로 표현하고자 할 때, z-map 격자간격을 5/100로 한다면 대략 1.6GB의 기억용량을 필요로 할 것이다. 따라서, z-map만으로 정밀하게 (즉, 허용오차내에서 근사적으로) 형상을 표현하기에는 현실적인 한계가 있음을 알수 있다.

전체 형상곡면이 완만하고 부드럽다면 z-map 모델로 곡면을 정밀하게 표현하는 것이 가능하다고 사료되지만 (2절 참조), 금형 형상면 (part-surface)에는 수직벽 따위의 다양한 특징형상 (feature)이 존재하는 바, 형상의 정밀표현에는 현실적인 제약이 따르게 마련이다. 이와같이 식 (2)의 z-map으로 정밀한 형상표현이 불가능하거나, 쉽지 않은 대표적인 특징형상은 다음과 같다 (Fig. 2).

- 언더컷 형상 (undercut-shape)
- 수직벽 (vertical-wall)
- 각진 모서리 (sharp-edge)



Fig. 2 Arduous feature shapes in the z-map model

현재, 위에서 내려다 보아 그림자가 지는 언더컷 (undercut) 형상 (즉, 단일 도메인 점에 대응하는 높이값이 2개 이상인 경우)에 대해서는 'dixel'이라 부르는 별도의 z-map 모델을 이용할수 있으며^(5,6), 본 논문에서는 고려하지 않기로 한다. 그리고, 수직벽의 경우 완전한 수직벽 이외에 가파른 측벽까지를 포함하는 것으로 보았다.

기존의 z-map 관련 연구는, 앞서 언급하였듯이 z-map 기반의 공구경로 생성 및 검증, 또는 CAM 시스템 구축 등 일반적인 z-map 모델의 응용을 주로 다루고 있으며, 이밖에 z-map 응용분야 및 관련 연구에 대한 고찰⁽⁹⁾, 확장된 z-map 모델 (dixel)을 이용한 공구경로 검증^(5,6) 등이 있다. 본 연구내용과 관련된 정밀도 향상에 대해서는, 오프셋 z-map에서 펜슬곡선을 추출함에 있어서 EZ-map의 개념 및 활용방안을 소개한 경우⁽¹⁸⁾를 찾아볼수 있으나, z-map 자체의 표현능력 및 현실적인 정밀도 향

상 방안에 대한 보다 체계적인 연구가 필요하다고 사료된다.

본 논문에서는 일반적인 z-map의 표현능력에 대한 고찰과 함께, 자동차 박판성형 금형 (stamping-die) 및 가진 몰드 금형의 형상곡면 (part-surface)을 대상으로, 수직벽이나 각진 모서리를 포함하는 형상을 정밀하게 표현할 수 있는 보완된 z-map 모델을 제시하고자 한다. 2절에서는 매개변수형 곡면의 z-map 변환, 격자점 이외의 도메인 점에서의 높이값 계산 문제를 다루고, 3절에서는 z-map 구조를 근간으로 하면서 수직벽 및 날카로운 모서리 특징형상들을 정밀하게 표현할 수 있는 보완모델을 살펴본다. 그리고, 4절에서는 본 논문에서 제시한 방식에 의한 형상 표현 예를 보인다.

2. Z-map에 의한 형상 표현

매개변수형 곡면으로 주어진 형상곡면을 z-map으로 변환하는 과정은 격자점 (x_i, y_j) 에서의 곡면 높이값을 계산하는 과정이다. 이 과정이 끝나면 z-map으로부터 형상 정보, 즉 높이값을 얻을 수 있어야 한다. 우선 격자점에 해당하는 (x, y) 에서의 높이값은 2차원 배열 $Z[i, j]$ 로부터 바로 얻을 수 있는 정확한 값이다. 남은 문제는 격자점 이외의 임의의 도메인 점 (x, y) 에서의 높이값을 계산하는 일이며, 일반적으로는 주위 격자점 높이값 정보를 이용한 보간 방법을 사용하고 있다. 만약 전체 형상곡면이 완만하고 부드럽다면, 이러한 보간법에 의해 계산된 높이값과 실제 높이값이 차이가 미세한 것으로 사료된다. 따라서 제한된 경우에 z-map만으로 형상을 정밀하게 표현하는 것이 충분히 가능하다고 본다.

본 절에서는 매개변수형 곡면의 z-map 변환을 살펴보고, 수직벽이나 각진 모서리를 포함하지 아니하는 경우 임의의 도메인 점에서의 높이값을 계산하는 방법에 관하여 살펴보도록 한다.

2.1 매개변수형 곡면에 대한 z-map 구축

매개변수형 곡면에 대응하는 z-map $Z[i, j]$ 를 구축하는 과정은, 격자점 (x_i, y_j) 에서의 곡면 높이값 (z 값)을 계산하는 과정으로 크게 두가지 방법이 있다(Fig. 3). 먼저, 2D Jacobian Inversion⁽³⁾ 방법은 각 격자점에 놓인 무한 수직선과 곡면간의 교점을 미분기하를 이용해서 계산한다. 이 방법은 일반적인 부드러운 곡면에 대해서는 계산시간이 빠르지만, 특정 곡면의 경우 그 방법의 특성상

해가 수렴하지 않거나 수렴하기 까지 많은 연산을 필요로 하는 경우가 있다. 다른 하나의 방법은 매개변수형 곡면을 다면체로 근사(tessellation)한 후, 얻어진 다면체에서 z-map의 각 격자점을 계산하는 것이다. 매개변수형 곡면의 다면체 근사는 다양한 방법이 알려져 있으며, 대부분의 경우 2D Jacobian Inversion보다 안정적이다. 그러나, 이방법은 주어진 허용 오차내에서 근사된 다면체에서 z-map의 각 격자점을 계산하기 때문에 얻어진 z-map 곡면이 국부적으로 부드럽지 못하다는 단점이 있다. 본 알고리즘에서는 2D Jacobian Inversion을 먼저 시도하고 실패하는 경우 곡면을 삼각형으로 근사해서 계산하도록 하고 있다.

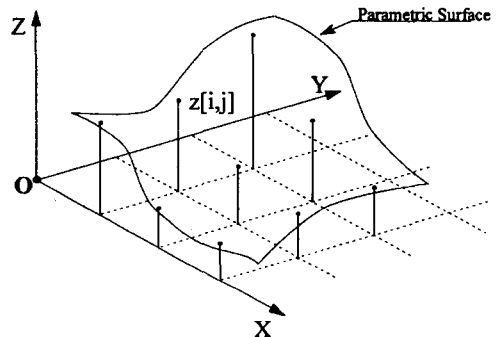


Fig. 3 Z-value computation for pre-defined grid-points

일반적인 자동차 프레스 금형의 형상곡면 (part-surface)은 수백~수천개의 단위곡면 (trimmed parametric surface)로 구성되어 있으며, 각 단위곡면에 상기 알고리즘을 되풀이 적용하여 전체 형상곡면을 z-map으로 변환한다. 본 논문에서는 변환된 z-map을 "Master-Model" z-map이라 칭한다.

2.2 도메인 점에서의 높이값 계산

앞서 언급한 바와 같이, 도메인 점 (x, y) 가 z-map 격자점인 경우에는 식 (2) 및 (3)에 의하여 곡면 높이값 (z 값)을 $Z[i, j]$ 로부터 바로 얻을 수 있다. 또한 격자점 이외의 도메인 점에 대해서는 별도의 보간법 (interpolation)으로 높이값을 계산해야 한다. 간단하게는 (x, y) 를 둘러싸는 4개 격자점의 z 값으로 구성된 쌍일차 (bilinear) 곡면으로부터 z 값을 추정하는 방식이 있으나, 원래의 곡면이 평면이 아닌 경우에는 오류를 가질 수밖에 없다.

본 논문에서는 수직벽이나 각진 모서리를 포함하지 않

으면서, 전체적으로 부드러운 곡면에 대해 격자점 이외의 임의의 도메인 점에서의 z 값을 계산하는 한가지 방법을 제시하고자 한다. 본 방식은 해당 (x,y) 주위의 격자점 정보로부터 구축한 비매개 3차 (nonparametric cubic) Bezier 곡선^(3,22)을 이용하고 있다.

Z-map Z[i,j] (0≤i<m, 0≤j<n)에 대해, 도메인 점 P=(x,y)가 P₀를 원점으로 하는 정사각형 영역 (x_i≤x≤x_{i+1}, y_j≤y≤y_{j+1})내에 놓여 있을 때 (Fig. 4), x 및 y 방향으로의 상대적인 위치 u, v는 식 (4)로부터 얻는다. 이때, x_i(또는 y_j)는 i(또는 j)번째 격자점에 대응하는 x (또는 y) 좌표값이다.

$$u = (x-x_i)/(x_{i+1}-x_i); v = (y-y_j)/(y_{j+1}-y_j); 0 \leq u, v \leq 1 \quad (4)$$

여기서, x_i ≤ x ≤ x_{i+1} and y_j ≤ y ≤ y_{j+1}

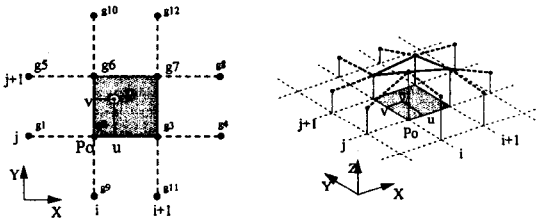


Fig. 4 Z-value interpolation for non-grid point

우선, x 방향 격자점열 (g₁,g₂,g₃,g₄) 및 (g₅,g₆,g₇,g₈)의 높이값 정보를 다음과 같이 각각 W₁, W₂라고 하자. 즉,

$$W_1 = (z_1, z_2, z_3, z_4) \text{ and } W_2 = (z_5, z_6, z_7, z_8).$$

이제, W₁ 및 W₂로부터 비매개 3차 Bezier 곡선 조정점 {V_k = (v₀,v₁,v₂,v₃): k=1,2}을 결정한다. 식 (5)는 k=1 일 때 W₁으로부터 비매개 3차 Bezier 곡선의 조정점을 계산하는 과정을 보이고 있다.

$$\begin{aligned} v_0 &= z_2, v_3 = z_3, \\ v_1 &= v_0 + s \cdot d_x / 3, v_2 = v_3 - t \cdot d_x / 3, \end{aligned} \quad (5)$$

이때, d_x = x 방향 격자간격,
s = 격자점 g₂에서의 원호접선 기울기 (z₁, z₂, z₃로부터 계산),
t = 격자점 g₃에서의 원호접선 기울기 (z₂, z₃, z₄로부터 계산).

그러면, 각각의 조정점 V₁ 및 V₂로부터 식 (6)과 같은 비매개 3차 Bezier 곡선 식을 얻게 되고, 식 (4)로 주어진 u에 대응하는 높이값 ω₁ 및 ω₂를 계산한다.

$$\omega(u) = \sum_{i=0}^3 v_i B_i^3(u), 0 \leq u \leq 1 \quad (6)$$

이때, v_i = Bezier 곡선 조정점,
B_i³(u) = 3차 Bernstein polynomial.

다음으로는, y 방향 격자점열 (g₉,g₂,g₆,g₁₀) 및 (g₁₁,g₃,g₇,g₁₂)의 높이값 정보를 W₃, W₄로 정의한다. 즉,

$$W_3 = (z_9, z_2, z_6, z_{10}) \text{ and } W_4 = (z_{11}, z_3, z_7, z_{12}).$$

다시, 앞서 계산한 ω₁, ω₂ 및 W₃ 으로부터 식 (7)과 같이 비매개 3차 Bezier 곡선 조정점 V₃ = (v₀,v₁,v₂,v₃)을 결정한다. 또한 유사한 방법으로 곡선 조정점 V₄도 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_0 &= \omega_1, v_3 = \omega_2, \\ v_1 &= v_0 + s \cdot d_y / 3, v_2 = v_3 - t \cdot d_y / 3, \end{aligned} \quad (7)$$

이때, d_y = y 방향 격자간격,
s = 격자점 g₂에서의 원호접선 기울기 (z₉,z₂,z₆로부터 계산),
t = 격자점 g₆에서의 원호접선 기울기 (z₂,z₆,z₁₀로부터 계산).

그러면, 각각의 조정점 V₃ 및 V₄로부터 식 (6)과 같은 비매개 3차 Bezier 곡선 식을 얻게 되고, 식 (4)로 주어진 v에 대응하는 높이값 ω₃ 및 ω₄를 계산한다. 최종적으로 도메인 점 P에서의 높이값 Z_p는 다음과 같은 선형보간 식으로부터 결정한다. 즉,

$$Z_p = (1-u) \cdot \omega_3 + u \cdot \omega_4$$

만약 도메인 점이 놓이는 정사각형 영역이 z-map 경계와 접함으로써 12개의 격자점을 모두 정의할 수 없을 경우에는, x 또는 y 방향의 연장선상에 놓이는 가상 격자점 (dummy grid-point)을 추가로 정의한 후 본 알고리즘을 적용하도록 하고 있다. 예를 들어 P₀의 인덱스가 (i=0, 0(j<n))라고 하면, 가상적으로 (i-1,j) 및 (i-1,j+1)에 2개의 추가 격자점을 정의한다. 또한 각 가상

Table 1. Illustrative results of z-value interpolation for a domain-point

Surface equation	grid-interval ($d_x=d_y$)	Max. deviation (z-value)	
		A*	B**
$x^2+y^2+z^2 = 100^2, z > 70$	1	$\pm 3.0 \times 10^{-4}$	-3.7×10^{-3}
$z = 100 \cdot \sin(\pi x/180)$	1	$\pm 1.2 \times 10^{-5}$	$\pm 3.8 \times 10^{-3}$
$z = 1000 \cdot \sin(\pi x/180)$	1	$\pm 2.1 \times 10^{-4}$	$\pm 3.8 \times 10^{-2}$

* Nonparametric Bezier interpolation method

** Bi-linear interpolation

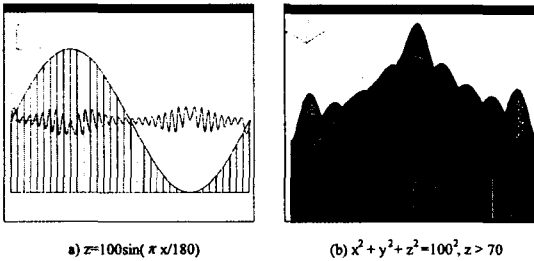


Fig. 5 Magnified error pattern for z-value interpolation

격자점의 높이값은 $Z[i,j]$, $Z[i+1,j]$ 및 $Z[i,j+1]$, $Z[i+1,j+1]$ 으로부터의 선형연장 (linear extrapolation)으로 결정한다.

Table 1은 3가지 곡면을 z-map으로 변환한 후, 격자점 내부의 도메인 점들에 대해 본 논문에서 제시한 방법과 쌍일차 보간 (bilinear interpolation) 방식에 의해 높이값을 계산한 후 실제 곡면 높이값과의 오차를 보이고 있다.

실제 가공에 있어서 일반적인 정삭 가공공차 (machining tolerance)가 10^{-3} to 10^{-2} mm 범위에 있고, z-map 격자간격이 1mm 이하 (일반적으로 0.7mm)임을 고려할 때, 전체 곡면이 수직벽 또는 각진 모서리를 가지지 아니하며 G1-연속을 만족하는 부드러운 형상이라면 z-map 모델 (Fig. 1)로 형상을 충실하게 표현하는 것이 가능한 것으로 사료된다. Fig. 5는 상기 곡면에 대한 높이값 오차의 패턴을 확대하여 보인 결과이다 (격자간격은 $d_x=d_y=10$ mm 및 $d_x=d_y=20$ mm).

3. 보완된 z-map에 의한 형상 표현

현재 프레스 및 몰드금형의 형상곡면은 각진 모서리 (sharp-edge:SE)나 수직벽 (vertical-wall:VW) 특징 형상을 가지고 있으며, 앞서 언급하였듯이 z-map으로 이러한 형상들을 정밀하게 표현하기에는 현실적인 한계가

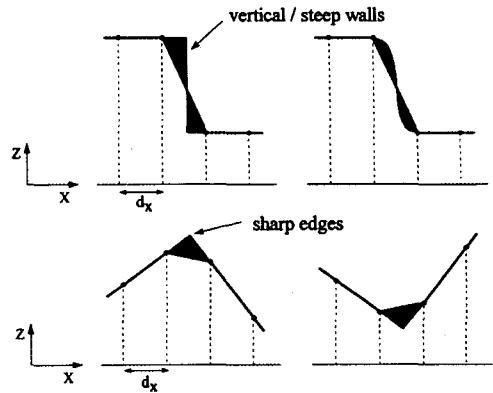


Fig. 6 Wrongly-defined feature shapes in the z-map model

있다 (Fig. 6). 이러한 z-map의 한계를 극복하기 위하여, 허용오차 범위내에서 SE 및 VW 특징형상을 정확하게 표현할수 있는 보완모델로서 CZ-map (Core Z-map) 및 EZ-map (Extended Z-map) 모델을 살펴보고자 한다.

3.1 CZ-map 모델

CZ-map (Core Z-map)은 실물 금형 제작에 사용되는 '코어(core)' 금형과 유사한 개념이다. 즉, 전체적인 형상은 z-map으로 표현하고, 수직벽이나 각진 모서리가 존재하는 국소적인 부위에 대해서는 z-map 격자간격보다 촘촘한 격자간격 (δ_x 및 δ_y)을 가지는 'core' z-map들로 형상을 더 정확하게 표현토록 하는 방식이다 (Fig. 7). 또한 각각의 CZ-map은 z-map처럼 2차원 배열에 저장할수 있고, z-map과 동일한 자료구조를 가지게 됨으로써 z-map의 장점을 살릴수 있는 편리한 점이 있다.

각 CZ-map의 2차원 도메인은 xy 평면상에서 추출한 수직벽 및 각진 모서리를 나타내는 2차원 특징곡선 (feature-curve)으로부터 정의한다 (Fig. 7-a). 또한 사각형 도메인은 좌표축과 임의의 각도를 가지도록 함으로써 필요한 CZ-map 개수를 최소로 하고자 하였다 (Fig. 7-b). 이때 수직벽 특징선은 z-map으로부터, 각진 모서리 특징선은 매개변수형 곡면의 경계에지곡선으로부터 추출한다. 그리고, CZ-map 격자점에서의 높이값은 2.1절에서 언급한 방식으로 계산하여 2차원 배열 CZ[i,j]에 저장한다.

일반적인 z-map의 경우 격자간격 d_x 및 d_y 는 대개 동일한 값으로 주는 반면, CZ-map의 경우에는 특징선과 직교하는 방향 (즉, CZ-map 도메인의 y 방향)으로 더

촘촘한 격자간격을 정의 하였으며, 다음과 같은 규칙을 적용한다.

$\delta_y = \text{given tolerancevalue,}$

$\delta_x = k \cdot \delta_y (k > 0), \text{where } \delta_x < d_x \text{ and } \delta_x < d_y$

저자의 경우 $k = 3$ 으로 두었는데, 임의의 CZ-map 도메인 내부를 지나는 특징선의 x 변화량이 δ_x 일때 y 방향 최대 변위가 δ_y 이하가 되도록 하고자 하였다. 도메인의 x축과 특징선간의 최대 각도 θ_x 를 설정하면 $\theta_x = \delta_y / \delta_x = 1/k$ 로부터 k 를 결정할수 있다. 저자의 경우 $\theta_x = \pm 20^\circ$ 로 설정하였으며, 이 경우 $k = 1 / \tan 20^\circ \approx 3$ 이 된다. 이와 같이 δ_x 및 δ_y 의 크기를 달리 정의함으로써, 추가되는 기억용량을 최소화 하고자 하였다.

'Master-Model' z-map $Z(i,j)$ 에 대한 CZ-map 구축 과정을 정리하면 다음과 같다.

Procedure Construct_CZmap (S, Z[i,j], $\epsilon_r \Rightarrow$ CZ-map);

1. Input: Trimmed parametric surfaces S, Z-map Z[i,j];
2. Trace 2-D VW feature-curves from Z-map $\rightarrow \{L_i; i=1, \dots, m\}$;
3. Trace 2-D SE feature-curves from S $\rightarrow \{L_j; j=1, \dots, m\}$;
4. For $i = 1$ to m , do following:
 - 1) Define a series of CZ-map domains for $L_i \rightarrow \{D_{ij}; j=1, \dots, p\}$;
 - 2) For $j = 1$ to p , compute z-values for the grid-points in each domain $D_{ij} \rightarrow CZ_k$;
5. Return a set of CZ-map $\{CZ_k\}$;

CZ-map을 포함하는 z-map의 높이값 계산은, CZ-map을 우선하도록 하며, 2결과 동일한 방식을 사용한다. 즉, 주어진 도메인 점 (x,y) 가 어떤 CZ-map CZ_k 의 도메인 내부에 놓이면 CZ_k 를 일반적인 z-map으로 보고 2

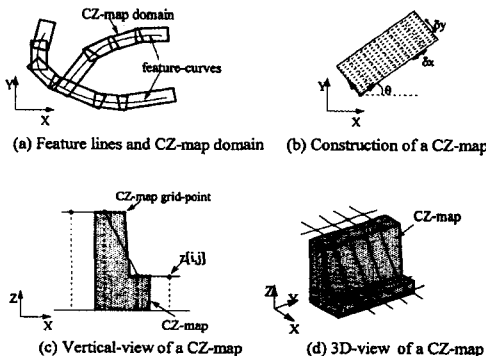


Fig. 7 CZ-map (Core Z-map) model

절의 높이값 계산방식을 적용하면 된다.

3.2 EZ-map 모델

EZ-map (Extended Z-map)은 지정된 영역 (즉, 정밀도 향상을 요하는 영역)에 속하는 격자모서리 (grid-edge)에서의 추가적인 점 데이터 샘플링을 통하여 정밀도를 향상시킬수 있는 모델이다. 따라서, CZ-map과 마찬가지로 국소적인 정밀도 향상이 가능하다.

본 방법의 개념을 Fig. 8에서 볼수 있다. 두 격자점을 연결하는 선분을 격자모서리라 할 때, 이 격자 모서리상에서 지정된 개수만큼 균일한 간격의 2차원 점 데이터를 추출하고 (Fig. 8-a,b), 각 점에서 곡면 높이값을 계산하여 추가적인 z 값 정보를 저장하도록 한다 (Fig. 8-c). 이렇게 추가적으로 추출한 z 값을 e-map 점 (point)이라고 하며, 격자모서리상의 e-map 점을 가지는 z-map을 EZ-map으로 칭한다.

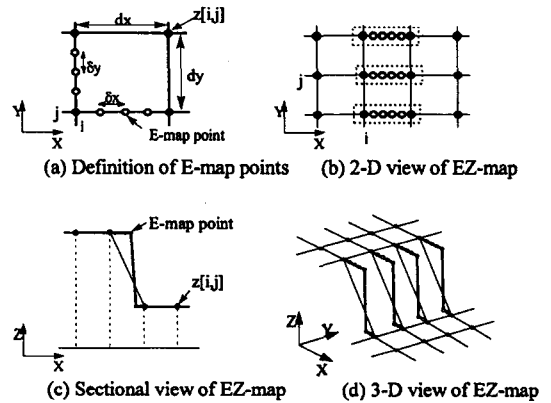


Fig. 8 EZ-map (Extended Z-map) model

지정된 격자모서리에 추가되는 e-map 점의 간격 (δ_x 및 δ_y)은 가공공차 (machining tolerance)와 관련지어 결정할 수 있으며, 대부분의 프레스 금형가공에 있어서는 0.01~0.05mm 범위가 적당한 것으로 사료된다. EZ-map 구축과정을 정리하면 다음과 같다.

Procedure Construct_EZmap (S, Z[i,j], $\epsilon_r \Rightarrow$ EZ-map);

1. Input: Trimmed parametric surfaces S, Z-map Z[i,j];
2. Trace 2-D SE feature-curves from S $\rightarrow \{L_p\}$;
3. For all ij-th horizontal & vertical grid-edges (E_x & E_y), do following:

- 1) If (slope of $E_x \geq \epsilon_x$) or (E_x crosses any L_p),
define e-map points on $E_x \rightarrow \{EZ_x[i,j][k]; k=0,\dots,n\}$;
- 2) If (slope of $E_y \geq \epsilon_y$) or (E_y crosses any L_p),
define e-map points on $E_y \rightarrow \{EZ_y[i,j][k]; k=0,\dots,n\}$;
4. Compute all z-values of e-map points from S;
5. Return EZ-map;

결국, EZ-map은 기존의 z-map 격자점에서 x 및 y 방향 격자모서리에 정의되는 e-map 점 (즉, 높이값) 정보를 추가로 가지게 되며, 지정된 영역내의 격자모서리만을 대상으로 함으로써 CZ-map에 비해 기억용량의 증가를 줄일수 있다.

다음으로, 주어진 도메인 점 $P=(x,y)$ 에 대한 EZ-map의 높이값 계산에 관하여 살펴본다. EZ-map의 높이값 계산에서는 격자모서리상의 e-map 점들을 추가적으로 고려하는 일이 필요하다. 일반적인 접근 방법은 점 P를 포함하는 네 개의 격자모서리를 경계 곡선으로 하는 간단한 곡면을 정의하는 것이다. 그러나, 격자모서리 곡선이 꺾여 있거나 곡률 변화가 심한 경우에는 하나의 곡면으로는 정확한 해석이 곤란하며, 전체적인 형상의 추이를 파악해서 몇 개의 부분 곡면으로 나눠야만 좀더 정확한 해석이 가능하다.

4. 적용 사례

Fig. 9 및 10는 커넥팅 로드 및 자동차 연료탱크 금형의 형상부 곡면을 3절에서 설명한 EZ-map 모델에 의해 모델링한 예를 보이고 있으며, Table 2는 결과를 요약한 표이다. 그리고, 본 예에서는 '각진 모서리' 특징형상은 존재하지 아니한다.

여기에서, z-map 격자간격 ($d_x=d_y$)은 두 모델에 대해 각각 0.4 및 0.8을 적용하고, e-map 격자간격 ($\delta_x=\delta_y$)

은 각각 0.02 및 0.04를 적용하였다 (격자모서리상의 e-map 점의 개수는 각각 19개이다). 연료탱크의 예를 보면, EZ-map의 기억용량은 z-map에 비해 약 2.2배 증가하였음을 알수 있다. 만약 z-map 격자간격을 0.04로 적용한다면, 대략 400배의 기억용량 (약 2.6GB)을 필요로 할 것이다.

Table 2에서 e-map ratio는, z-map의 모든 x 및 y방향 격자모서리 중 e-map 점을 가지는 격자모서리의 비율이다. 전자 (connecting-rod)가 후자 (fuel-tank)에 비해 더 높은 비율을 가지는 것은, 전체적으로 수직벽 특징 영역 비율이 더 크기 때문이다.

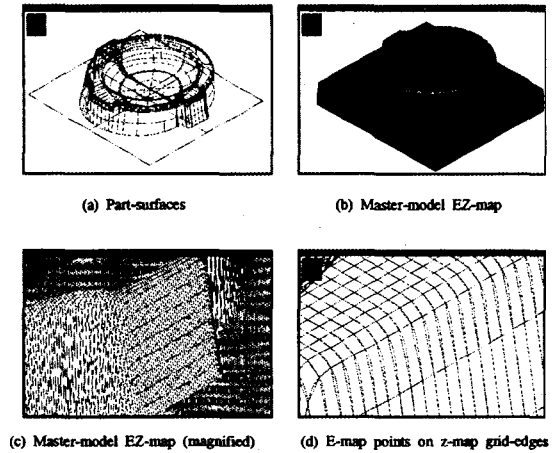


Fig. 9 Application example: Connecting-rod (partial)

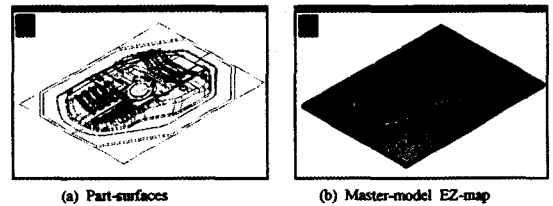


Fig. 10 Application example: Passenger-car fuel tank

Table 2. Summary of EZ-map construction for two example models

Model		Connecting-rod	Fuel-tank
XY-dimension (mm)		110×120	1190×890
Grid-interval (mm)	Z-map	0.4	0.8
	E-map	0.02	0.04
Memory (KB)	Z-map	330	6,620
	E-map	1,120	8,000
	EZ-map	1,450	14,620
E-map ratio (%)		17.8	6.3

5. 결론 및 고찰

본 논문에서는 일반적인 z-map 모델의 표현 능력을 분석하고, 수직벽이나 각진 모서리 등 일반 z-map으로 표현하기에 현실적인 한계가 있는 특징형상 (feature)을 정밀하게 표현하기 위한 두가지 보완 z-map 모델인 CZ-map 및 EZ-map 모델의 개념 및 표현방법을 고찰 하고,

적용 예를 보였다.

본 논문에서 살펴본 보완 z-map 모델은 기억용량 및 정밀도 측면에서 충분히 현실적인 적용이 가능한 것으로 사료되며, 현재 EZ-map의 경우 기존의 상업용 CAM 시스템인 Z-MASTER⁽²²⁾에서 채용하고 있다.

Z-map 모델은 그 장점으로 인하여 다양한 분야에서 응용이 되고 있는데, 본 연구 주제와 관련되는 대표적인 예로 다음과 같은 분야를 들 수 있다⁽⁶⁾.

- NC 데이터의 모의가공 및 검증 (NC cutting simulation & verification),
- 묘사 (rendering),
- 가상원형제작 (virtual prototyping) 및 스타일링,
- NC 가공데이터 생성,
- CAPP, 컴퓨터 비전.

본 연구 내용은 상기 분야에서 z-map을 활용함에 있어서, 정밀도 향상의 현실적인 한계를 극복하기 위한 노력의 일환이다. 예를 들어 모의가공 및 검증의 경우, 형상부의 수직벽이나 각진 모서리 등에 대한 정밀한 모델링이 우선되어야만 이러한 특징형상의 과/미절삭 여부를 판단할 수 있을 것이다. 일반적인 z-map을 이용한다면 과도한 기억장소 및 계산시간을 필요로 하거나, 국소적으로 미소한 격자간격을 가지는 z-map을 사용자가 별도로 정의하는 등의 어려움이 있게 된다. 또한 z-map의 장점을 살리고자 하는 여타 응용분야에서도 유사한 어려움이 있을 것으로 사료된다.

결국 본 논문에서 살펴본 보완 z-map 모델은, 일반 z-map의 장점을 살리면서 국소적 특징형상의 정밀도를 향상시킬 수 있는 현실적 방법론의 하나로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Hwang, J. S., "Interference-free tool-path generation in the NC machining of parametric compound surfaces," *Computer-Aided Design*, Vol. 24, No. 12, pp. 667-676, 1992.
2. Lee, S. X. and Jerard, R. B., "5-axis machining of sculptured surfaces with a flat-end cutter," *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 3, pp. 165-178, 1994.
3. Choi, B. K., *Surface modeling for CAD/CAM*. Elsevier, New York, 1991.

4. Choi, B. K., Chung, Y. C., Park, J. W. and Kim, D. H., "Unified CAM-system architecture for die and mould machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 26 No. 3, pp. 235-243, 1994.
5. Hook, T. V., "Real time shaded NC milling display," *Computer Graphics*, Vol. 20 No. 4, pp. 15-20, 1986.
6. Kim, C. B. and Yang, M. Y., "A study on the verification of 5-axis CNC machining," *Journal of KSME*, Vol. 18 No. 1, pp. 93-100, 1994.
7. 박정환, "금형의 5축 NC 가공을 위한 CAM 시스템 개발에 관한 연구," 박사학위논문, 한국과학기술원, 1995.
8. Choi, B. K., Chung, Y. C. and Park, J. W., "Application and extension of z-map model," *Proc. of the Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, Seoul, Aug. pp. 221-234, 1995.
9. Andersen, R. O., "Detecting and eliminating collisions in NC machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 10 No. 4, pp. 231-237, 1978.
10. Hsu, P. L. and Yang, W. T., "Realtime 3D simulation of 3-axis milling using isometric projection," *Computer-Aided Design*, Vol. 25 No. 4, pp. 215-224, 1993.
11. Takata, S. Tsai, M. D. and Inui, M., "A cutting simulation system for machinability evaluation using a workpiece model," *Annals of the CIRP*, Vol. 38, pp. 417-420, 1989.
12. 정연찬, "금형가공용 통합 CAM 시스템을 위한 가공데이터의 모의가공과 검증에 관한 연구," 박사학위논문, 한국과학기술원, 1996.
13. Yoo, W. S. and Choi, B. K., "CAPP for Die Cavity Machining," *Proceedings of the IFIP TC5/WG5.3 Eighth Int'l PROLAMAT Conference, Tokyo, Japan*, pp.437-447, 1992.
14. 김대현, "사출금형제작 CIM 구축을 위한 부하관리 체계 및 CAPP 개발에 관한 연구," 박사학위논문,

- 한국과학기술원, 1997.
15. Takeuchi, Y. Sakamoto, M. Abe, Y. and Orita, R., "Development of a personal CAD/CAM system for mold manufacture based on solid modeling techniques," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, pp. 455-458, 1989.
 16. Saito, T. and Takahashi, T., "NC machining with G-buffer method," *Computer Graphics*, Vol. 25 No. 4, pp. 207-216, 1991.
 17. Choi, B. K., Park, J. W. and Jun, C. S., "Cutter-location data optimization in 5-axis surface machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 25 No. 6, pp. 377-386, 1993.
 18. 박정환, 김보현, 최병규, "가상측정을 통한 펜슬곡선 추출," 한국 CAD/CAM 학회 논문집, Vol. 2, No. 4, pp. 253-266, 1997.
 19. Foley, J. et al, *Computer graphics: principles and practice*, 2nd ed., Addison-Wesley, 1990.
 20. Faugeras, O., *Three-dimensional computer vision: a geometric viewpoint*, The MIT Press, 1993
 21. Horn, B. K. P., *Robot vision*, The MIT Press, 1986.
 22. Farin, G., *CAGD: a practical guide*. Academic Press, New York, 1997.
 23. *Z-Master Reference Manual*, Cubic Tech, Korea, 1992.