

평면곡선과 오프셋곡선의 점열화

주상윤*, 추 한**

A Tessellation of a Planar Polynomial Curve and Its Offset

Ju, S.Y.* and Chu, H.**

ABSTRACT

Curve tessellation, which generates a sequence of points from a curve, is very important for curve rendering on a computer screen and for NC machining. For the most case the sequence of discrete points is used rather than a continuous curve. This paper deals with a method of tessellation by calculating the maximal deviation of a curve. The maximal deviation condition is introduced to find the point with the maximal deviation. Our approach has two merits. One is that it guarantees satisfaction of a given tolerance, and the other is that it can be applied in not only a polynomial curve but its offset. Especially the point sequence generated from an original curve can cause over-cutting in NC machining. This problem can be solved by using the point sequence generated from the offset curve. The proposed method can be applied for high-accuracy curve tessellation and NC tool-path generation.

Key words : tessellation, polynomial curve, offset, deviation

1. 서 론

최근 고속 및 고정밀 NC기계에 의하여 제품가공이 이루어지고 있으며 제품의 정밀도에 대한 관심이 매우 높아졌다. 일반적으로 NC가공은 공구가 따라가야 할 곡선으로부터 주어진 허용오차 범위에서 얻어진 점열을 보간한 직선선분들을 따라 이루어진다. CAD/CAM분야에서 주어진 곡선을 점열화하는 방법으로는 크게 2가지 접근법이 이용되고 있다. 첫번째 방법은 곡선 상에서 적절히 점열을 취하여 이웃한 두 점들을 양끝점으로 갖는 구간곡선 상의 중간점으로부터 현재까지의 최대오차를 구하여 그 크기가 허용오차를 벗어나면 점열을 추가하여 구간을 보다 작게 분할하는 방법이다. 이러한 방법은 매우 단순하므로 적용하기 쉬운 잇점이 있으나 계산된 최대오차의 크기가 허용오차를 벗어날 수 있다는 문제점을 가진다. 상용되는 일부 CAM시스템에서는 보다 정밀도를 높이기 위하여 곡선으로부터 점열을 매우 조밀하게 취하여 최대오차

를 구하는 방법이 시도되기도 하였다¹⁾. 그러나 이 같은 점열 생성의 방법은 많은 계산시간을 필요로 할 뿐만 아니라 그로부터 구해진 최대오차라 할지라도 완벽하게 허용오차를 만족한다고 보장할 수는 없다는 한계를 지니고 있다. 그외에 사용되는 다른 CAM시스템들은 곡선을 점열화하는 방법을 구체적으로 공개하지 않고 있다.

또 다른 방법으로는 B-스플라인곡선이나 Bezier곡선의 convex hull 성질을 이용하는 것으로 현과 곡선 사이의 최대오차를 곡선의 조정점을 이용하여 구하는 방법이다. 곡선의 조정점과 현과의 최대거리는 실제 곡선의 최대오차값보다 항상 크게 되므로 이 방법을 사용하여 생성된 점열은 허용오차를 항상 만족시키게 된다. Piegl²⁾은 이 방법을 이용하여 허용오차를 만족할 때까지 3차 비지어곡선을 분할하는 방법을 제시하였다. 그러나 곡선의 조정점을 이용한 분할방법은 생성되는 점열이 필요 이상으로 많아질 뿐만 아니라 오프셋곡선에서는 적용이 불가능하다는 문제점이 있다.

그외에 근사이론³⁾에 근거하여 곡선을 다수의 직선선분들로 근사시키는 방법이 연구되었다⁴⁾. 그러나 이러한 방법은 허용오차의 만족은 보장하지만 지나치

*종신회원, 울산대학교 공과대학 산업정보경영공학부

**학생회원, 울산대학교 공과대학 산업정보경영공학부

- 논문투고일: 2003. 09. 04

- 심사완료일: 2004. 01. 12

게 많은 점들을 생성하는 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 평면다항식곡선에 대하여 허용오차를 만족하는 적은 수의 점들을 생성할 뿐 아니라 오프셋곡선에 대해서도 적용할 수 있는 점열생성방법을 제안하고자 한다.

본 논문의 2장에서는 곡선으로부터 최대오차를 갖는 점을 찾기 위한 최대오차조건식을 유도한다. 3장에서는 최대오차조건식을 이용하여 평면다항식곡선으로부터 허용오차를 만족하는 점열을 생성하는 방법을 제시한다. 4장에서는 오프셋곡선에 대한 최대오차조건식을 유도하고, 5장에서는 NC기공에서 과절삭이 발생하는 분쇄점과 그 해결방안을 함께 제시한다. 6장에서는 오프셋곡선의 점열화를 포켓가공과 3차원 윤곽가공에 적용할 수 있음을 보여주고 마지막 7장에서 결론을 맺는다.

2. 곡선의 최대오차조건

Fig. 1에서 보는 바와 같이 곡선 $r(t)$ 의 구간 $[t_i, t_{i+1}]$ 에서 오차벡터 $h(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$h(t) = r(t) - Q(t) = [r(t) - P_i] - \{[r(t) - P_i] \cdot E\}E \quad (1)$$

여기서 $E = \frac{P_{i+1} - P_i}{|P_{i+1} - P_i|}$.

오차벡터 $h(t)$ 의 최대크기를 결정하기 위하여 일차함수식 $F(t)$ 를 $h(t)$ 의 제곱으로 정의하자. 즉

$$F(t) = |h(t)|^2 = h(t) \cdot h(t) \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)를 각각 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{h}(t) = \frac{dh(t)}{dt} = \dot{r}(t) - \{\dot{r}(t) \cdot E\}E \quad (3)$$

$$\frac{dF(t)}{dt} = 2h(t) \cdot \dot{h}(t) \quad (4)$$

식 (3)을 식 (4)에 대입하면 다음의 결과를 얻게

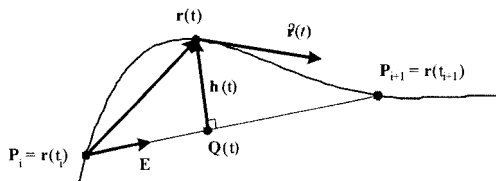


Fig. 1. An error vector between a curve and a chord.

된다.

$$\begin{aligned} \frac{dF(t)}{dt} &= 2\{h(t) \cdot \dot{r}(t) - [\dot{r}(t) \cdot E]\{E \cdot h(t)\}\} \\ &= 2h(t) \cdot \dot{r}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

함수식 $F(t)$ 가 최대값을 갖는 파라미터 t 값에서 오차벡터의 크기 $h(t)$ 는 최대값을 가지므로 구간곡선의 최대오차는 식 (5)의 값이 0을 만족하는 곡선상의 점들 가운데 존재한다. 즉

$$h(t) \cdot \dot{r}(t) = 0 \quad (6)$$

편의상 본 논문에서는 식 (6)을 곡선 $r(t)$ 에 대한 최대오차조건이라고 부르기로 한다.

$t = t^*$ 에서 식 (6)의 최대오차조건이 만족되는 경우 오차의 크기 $h(t^*)$ 는 식 (1)로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$|h(t^*)| = \sqrt{|r(t^*) - P_i|^2 - \{[r(t^*) - P_i] \cdot E\}^2} \quad (7)$$

만약 구간 $[t_i, t_{i+1}]$ 내에서 최대오차조건을 만족하는 점이 두개 이상 존재하는 경우에는 이들 오차의 크기들을 서로 비교하여 가장 큰 값을 최대오차로 정한다.

3. 평면 다항식곡선에서 최대오차의 결정

평면곡선에서 오차벡터 $h(t)$ 는 항상 일정한 방향을 향하므로 다음과 같이 바꾸어 표현할 수 있다.

$$h(t) = d(t)H \quad (8)$$

여기서 $d(t) = |h(t)|$
 $H = h(t)/|h(t)|$

$h(t)$ 의 단위벡터 H 는 항상 동일하며 다음과 같이 정의된다.

$$H = N \times E \quad (9)$$

여기서 N : 곡선이 놓인 평면의 단위법선벡터

$$E = (P_{i+1} - P_i) / |P_{i+1} - P_i|$$

식 (8)을 식 (6)의 최대오차조건에 대입하면 다음을 얻게 된다.

$$d(t)H \cdot \dot{r}(t) = 0 \quad (t_i \leq t \leq t_{i+1}) \quad (10)$$

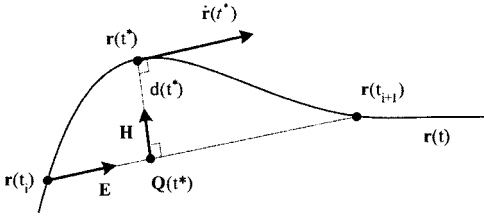


Fig. 2. A point of the maximum deviation on a curve.

$t = t_i$ 와 $t = t_{i+1}$ 에서는 오차벡터의 크기 $d(t) = 0$ 이므로 최대오차는 존재하지 않는다. 따라서 식 (10)의 최대 오차조건은 다음과 같이 바꿀 수 있다.

$$\mathbf{H} \cdot \dot{\mathbf{r}}(t) = 0 \quad (t_i < t < t_{i+1}) \quad (11)$$

즉 Fig. 2와 같이 최대오차를 만족하는 점에서는 단위오차벡터 \mathbf{H} 와 곡선의 접선벡터 $\dot{\mathbf{r}}(t)$ 가 수직으로 만난다.

단위벡터 \mathbf{H} 는 t 의 함수가 아니므로 곡선 $\mathbf{r}(t)$ 가 n 차 다항식인 경우 식 (11)은 t 에 관한 $n-1$ 차 다항식이 된다.

4차 이하의 방정식은 대수적인 방법으로 해를 구할 수 있으므로¹⁶⁾, 곡선 $\mathbf{r}(t)$ 가 5차 이하인 경우에는 주어진 구간에서 곡선에 대한 최대오차를 반복없이 한번에 구할 수 있다. 만일 얻어진 최대오차가 지정된 허용오차를 벗어나게 되면 허용오차를 만족할 때까지 곡선을 두 구간으로 나눔으로써 허용오차를 만족시키는 점열을 구할 수 있다.

그러나 6차 이상의 곡선에서는 대수적 방법으로는 최대오차조건식을 만족하는 해를 구할 수 없으므로 주어진 곡선을 다수의 구간곡선으로 분할한 다음 각각의 구간곡선에 대하여 반복적인 방법으로 최대오차를 계산한다. 얻어진 최대오차가 허용오차를 벗어나면 허용오차를 만족할 때까지 곡선을 나눔으로써 점열을 구할 수 있다.

6차 이상의 곡선에 대하여 반복적으로 최대오차를 구하는 방법을 좀더 살펴보기로 하자. 먼저 곡선을 다수의 구간곡선으로 분할하여 각각의 구간곡선이 한 개 이하의 변곡점을 가지는 단순한 모양의 곡선이 되도록 한다. 일반적으로 차수가 증가하면 곡선이 요동할 가능성은 더욱 커지므로 곡선을 더 많이 분할해야 한다.

n 차곡선 $\mathbf{r}^{[n]}(t)$ 으로부터 구간 $[t_i, t_{i+1}]$ 에 대한 구간곡선의 양끝점을 $\mathbf{P}_i = \mathbf{r}^{[n]}(t_i)$, $\mathbf{P}_{i+1} = \mathbf{r}^{[n]}(t_{i+1})$, 양끝점에서의 접선벡터를 $\mathbf{t}_i = \dot{\mathbf{r}}^{[n]}(t_i)$, $\mathbf{t}_{i+1} = \dot{\mathbf{r}}^{[n]}(t_{i+1})$ 이라고 할

때, 양끝점과 두 접선벡터를 이용하여 n 차 구간곡선을 3차곡선으로 근사시켜보자. 3차곡선식을 $\mathbf{r}^{[3]}(t) = \mathbf{a} + \mathbf{b}t + \mathbf{c}t^2 + \mathbf{d}t^3$ 라고 할 때 입력데이터 $(\mathbf{P}_i, \mathbf{P}_{i+1}, \mathbf{t}_i, \mathbf{t}_{i+1})$ 로부터 4개의 연립방정식을 다음과 같이 얻게 된다.

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{a} + \mathbf{b}t_i + \mathbf{c}t_i^2 + \mathbf{d}t_i^3$$

$$\mathbf{p}_{i+1} = \mathbf{a} + \mathbf{b}t_{i+1} + \mathbf{c}t_{i+1}^2 + \mathbf{d}t_{i+1}^3$$

$$\mathbf{t}_i = \mathbf{b}t_i + 2\mathbf{c}t_i + 3\mathbf{d}t_i^2$$

$$\mathbf{t}_{i+1} = \mathbf{b}t_{i+1} + 2\mathbf{c}t_{i+1} + 3\mathbf{d}t_{i+1}^2$$

위의 연립방정식을 풀면 3차곡선 $\mathbf{r}^{[3]}(t)$ 의 계수벡터 $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d}$ 를 구할 수 있다. Fig. 3에서 점선으로 표시된 3차곡선 $\mathbf{r}^{[3]}(t)$ 에 대하여 식 (11)의 최대오차조건을 적용하면 최대오차에 해당하는 파라미터값 $t = \hat{t}$ 를 결정할 수 있다.

$t = \hat{t}$ 를 시작점으로 사용하여 n 차곡선 $\mathbf{r}^{[n]}(t)$ 의 최대 오차에 해당하는 파라미터 $t = \hat{t}$ 를 구하는 과정은 다음과 같다. 먼저 $t = \hat{t}$ 에서 오차벡터 $\mathbf{h}(\hat{t})$ 와 접선벡터 $\dot{\mathbf{r}}^{[n]}(\hat{t})$ 를 구한다. 이들 두 벡터의 내적이 양의 값

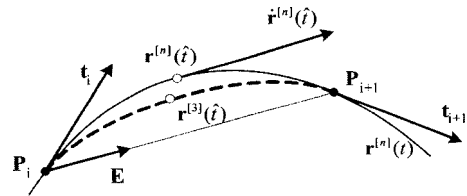


Fig. 3. Two points $\mathbf{r}^{[3]}(\hat{t})$, $\mathbf{r}^{[n]}(\hat{t})$ at $t = \hat{t}$.

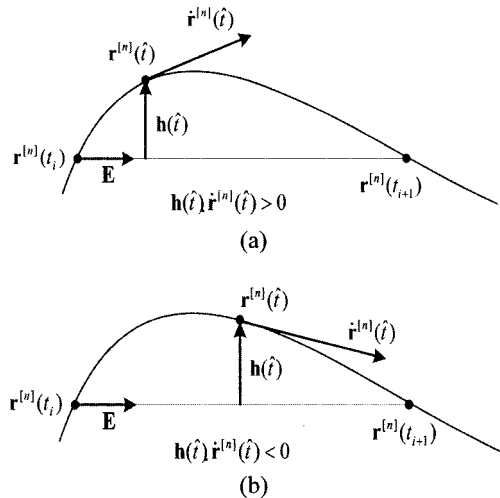


Fig. 4. Determination of a new search interval.

이때 Fig. 4(a)와 같이 최대오차가 구간 (\hat{t}, t_{i+1}) 상에 존재하게 되므로 $t_i = \hat{t}$ 로 대체하여 새로운 탐색구간을 정한다. 반면에 내적의 값이 음수인 경우 Fig. 4(b)와 같이 최대오차가 구간 (t_i, \hat{t}) 상에 존재하므로 $t_{i+1} = \hat{t}$ 로 대체하여 새로운 탐색구간을 정한다.

이제 보다 줄어든 새로운 탐색구간 (t_i, t_{i+1}) 에 대하여 앞에서 기술한 과정을 반복하면 탐색구간을 지속적으로 줄여나갈 수 있다. 이러한 과정은 종료조건 $|\mathbf{h}(\hat{t}) \cdot \mathbf{r}^{(n)}(\hat{t})| < \varepsilon$ 을 만족될 때까지 반복되며 분할된 모든 구간곡선에서 종료조건에 도달하면 최대오차를 만족하는 점열을 결정된다.

6차 이상의 곡선에 대하여 최대오차를 계산하는 과정을 정리하면 다음과 같다.

- 단계1. n 차곡선 $\mathbf{r}^{(n)}(t)$ 을 3차곡선 $\mathbf{r}^{(3)}(t)$ 으로 근사시킨다.
- 단계2. $\mathbf{r}^{(3)}(t)$ 에 대하여 식 (11)을 만족시키는 파라미터 $t = \hat{t}$ 를 구한다.
- 단계3. 만약 $|\mathbf{h}(\hat{t}) \cdot \mathbf{r}^{(n)}(\hat{t})| < \varepsilon$ 이면 식 (7)로부터 최대오차의 크기를 구하고 종료한다.
- 단계4. 만약 $\mathbf{h}(\hat{t}) \cdot \mathbf{r}^{(n)}(\hat{t}) > 0$ 이면 $t_i = \hat{t}$ 로 대체하고 단계 1로 간다.
만약 $\mathbf{h}(\hat{t}) \cdot \mathbf{r}^{(n)}(\hat{t}) < 0$ 이면 $t_{i+1} = \hat{t}$ 로 대체하고 단계 1로 간다.

4. 평면오프셋곡선의 최대오차조건

평면 상에 놓인 곡선 $\mathbf{r}(t)$ 로부터 오프셋거리 d 인 오프셋곡선 $\mathbf{r}^o(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{r}^o(t) = \mathbf{r}(t) + d\mathbf{n}(t) \tag{12}$$

여기서 d : 오프셋거리

$\mathbf{n}(t)$: 곡선 $\mathbf{r}(t)$ 에 대한 단위법선벡터

오프셋곡선 $\mathbf{r}^o(t)$ 의 최대오차는 오프셋오차벡터 $\mathbf{h}^o(t)$ 와 접선벡터 $\mathbf{r}'^o(t)$ 가 수직으로 만나는 곳에 존재하므로 오프셋곡선에 대한 최대오차조건은 다음과 같이 결정된다.

$$\mathbf{h}^o(t) \cdot \mathbf{r}'^o(t) = 0 \tag{13}$$

모든 t 값에 대하여 곡선 $\mathbf{r}(t)$ 와 오프셋곡선 $\mathbf{r}^o(t)$ 의 단위법선벡터는 항상 동일하므로 Fig. 5에서 보는 바와 같이 두 곡선의 접선벡터 $\mathbf{r}'(t)$, $\mathbf{r}'^o(t)$ 또한 동일한 방향을 향하게 된다. 즉

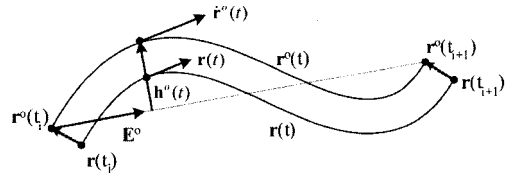


Fig. 5. A planar curve and its offset curve.

$$\mathbf{r}'(t) = |\dot{\mathbf{r}}(t)|\mathbf{T}, \quad \mathbf{r}'^o(t) = |\dot{\mathbf{r}}^o(t)|\mathbf{T}$$

여기서 \mathbf{T} : $\mathbf{r}(t), \mathbf{r}^o(t)$ 의 단위벡터

$\mathbf{h}^o(t)$ 는 항상 단위벡터 \mathbf{E}^o 와 수직인 방향을 향하므로 오프셋오차벡터 $\mathbf{h}^o(t)$ 의 단위벡터 \mathbf{H}^o 는 다음과 같이 결정된다.

$$\mathbf{H}^o = \mathbf{N} \times \mathbf{E}^o$$

여기서 \mathbf{N} : 곡선 $\mathbf{r}(t)$ 가 놓인 평면의 단위법선벡터

$$\mathbf{E}^o = (\mathbf{P}_{i+1}^o - \mathbf{P}_i^o) / |\mathbf{P}_{i+1}^o - \mathbf{P}_i^o|$$

따라서 오프셋곡선의 최대오차조건인 식 (13)은 다음과 같이 바꿀 수 있다.

$$\mathbf{H}^o \cdot \mathbf{r}'(t) = 0 \tag{14}$$

단위벡터 \mathbf{H}^o 는 고정되어 있으므로 곡선 $\mathbf{r}(t)$ 가 n 차식인 경우 식 (14)의 오프셋최대오차 조건식은 ε 에 관한 $n - 1$ 차식이 된다.

5. NC가공에서 과절삭과 해결방안

오프셋곡선으로부터 허용오차를 만족하는 점열을 구하는 것은 NC가공에서 특히 유용하게 이용될 수 있다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 두 점 $\mathbf{r}(t_i), \mathbf{r}(t_{i+1})$ 사이를 직선보간하여 NC가공할 때 구간곡선이 블록한 경우에는 빗금친 부분에서 과절삭이 발생한다⁷⁾.

Fig. 6에서 실제로 발생하는 가공오차의 최대크기는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 $|\mathbf{r}(t^*) - \mathbf{C}|$ 가 되며 이 크기는 오프셋곡선 $\mathbf{r}^o(t)$ 의 최대오차 $|\mathbf{r}^o(t^*) - \mathbf{C}^o|$ 와 동일하다. 따라서 원곡선 $\mathbf{r}(t)$ 를 가공할 때 발생하는 과

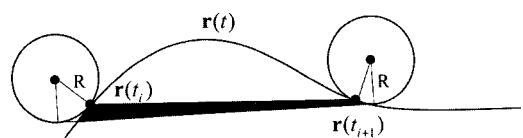


Fig. 6. Occurrence of over-cut.

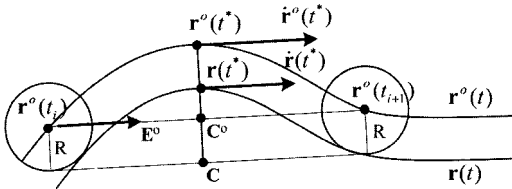


Fig. 7. Tessellation of an offset curve for over-cut free.

절삭 문제는 오프셋곡선 $r^o(t)$ 으로부터 점열을 샘플링 하면 해결될 수 있다.

곡선 $r(t)$ 를 NC가공할 때 과절삭이 없는 점열을 생성하기 위한 절차는 다음과 같다.

- 1) 원곡선 $r(t)$ 로부터 식 (12)를 이용하여 오프셋곡선 $r^o(t)$ 을 구한다.
- 2) 식 (14)를 이용하여 오프셋곡선으로부터 점열을 생성한다.
- 3) 오프셋점열에 대응하는 원곡선 상의 점열을 생성한다.

6. 오프셋곡선의 점열화와 NC가공

본 장에서는 오프셋곡선으로부터 생성된 점열을 이용한 두 종류의 NC가공을 소개하고자 한다. 첫번째는 2차원 포켓가공이고 나머지 하나는 3차원 윤곽가공이다. 특히 3차원 윤곽가공은 가공을 위해 주어진 곡선이 3차원 공간곡선임에도 불구하고 본 연구가 적용될 수 있음을 주목할 필요가 있다.

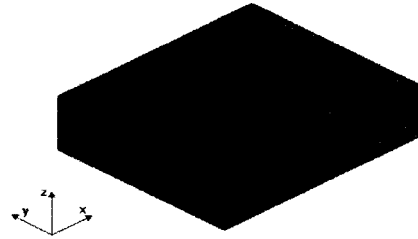
6.1 2차원 포켓가공

Fig. 8(a)에서는 포켓가공할 대상제품을 보여주고 있으며 Fig. 8(b)에서는 제품의 윤곽곡선과 오프셋된 2개의 공구경로가 도시되어 있다

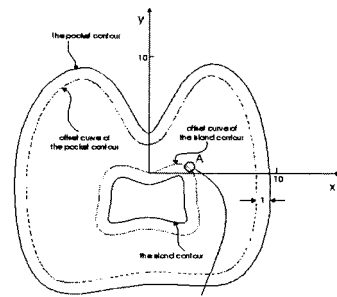
두개의 공구경로를 가운데 내부 공구경로를 따라 NC가공이 이루어졌을 때 발생하는 가공오차를 Fig. 9는 보여주고 있다. Fig. 9에서는 제품의 윤곽곡선으로부터 생성된 점열을 직선보간하여 NC가공한 결과를 실선으로 보여준다. 가공오차는 심하게 변하고 있으며 여러 곳에서 허용오차(0.001)를 벗어나고 있다. 반면에 Fig. 9에서 점선으로 표시된 것은 오프셋곡선으로부터 얻어진 점열로부터 NC가공한 것으로 가공오차는 허용오차를 벗어나지 않을 뿐 아니라 허용오차 주위에서 거의 변하지 않고 있다.

6.2 3차원 윤곽가공

3차원 윤곽가공은 금형가공에서 주로 이용되는 가



(a)



(b)

Fig. 8. (a)Example and (b)tool paths of pocket machining.

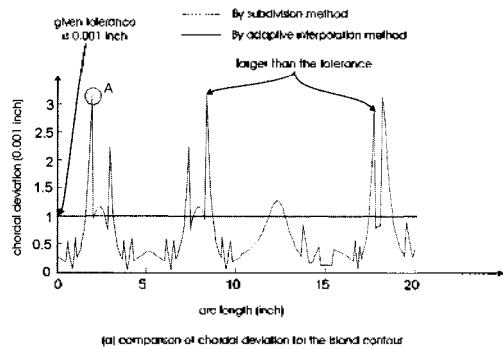


Fig. 9. Comparison of two machining deviations in pocket machining.

공으로 Z값이 고정된 2차원 윤곽가공과는 달리 Fig. 10과 같이 Z성분의 값이 변화하며 가공이 이루어진다^[8,9]. 3차원 윤곽가공에서 오차벡터의 Z성분은 가공의 정밀도에 영향을 주지 않는다. 따라서 3차원 윤곽가공을 위한 점열은 윤곽곡선 $r(t)$ 를 XY-평면에 투영시킨 2차원 윤곽곡선 $p(t)$ 과 그 오프셋곡선 $p^o(t)$ 에 의하여 얻어진다.

3차원 윤곽가공을 위한 윤곽곡선 $r(t)$ 상에서 점열을 얻는 절차는 다음과 같다.

- 1) Fig. 11과 같이 윤곽곡선 $r(t)$ 를 XY평면에 투영시켜 곡선 $p(t)$ 를 얻는다

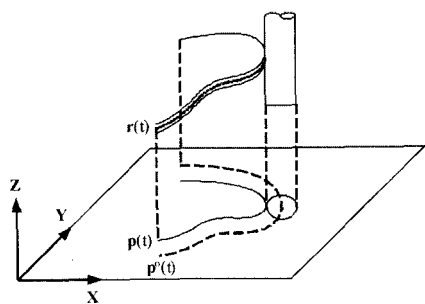


Fig. 10. 3-D contour machining and its projection.

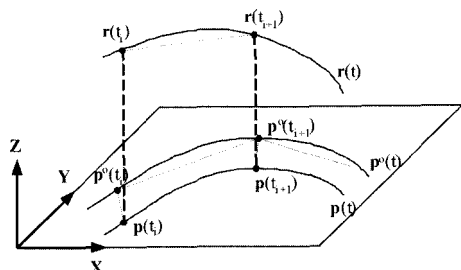


Fig. 11. Tessellation for 3D-contour curve.

- 2) XY평면 상에서 투영곡선 $p(t)$ 를 오프셋시킨 곡선 $p'(t)$ 를 구한다.
- 3) 유셋곡선 $p'(t)$ 로부터 허용오차를 만족하는 접열을 얻는다.
- 4) 오프셋곡선 $p'(t)$ 상의 점열에 해당되는 윤곽곡선 $r(t)$ 상의 점열을 찾는다.

7. 결 론

본 논문에서는 최대오차조건을 사용하여 평면곡선으로부터 점열을 얻는 방법을 제시하였다. 이 방법으로 얻어진 점열은 허용공차를 충족시키면서도 상대적으로 적은 수의 점들을 생성한다. 더욱이 이 방법은 오프셋곡선에서도 적용될 수 있다는 장점이 있다. 오프셋곡선으로부터 허용오차를 만족하는 점열을 구할

수 있다는 점은 정밀한 NC가공에 매우 효과적이다. 본 논문은 원곡선으로부터 얻어진 점열이 NC가공에서 유발시키는 과결삭의 문제점을 오프셋곡선으로부터 생성한 점열을 사용함으로써 해결할 수 있음을 보여주었다. 본 연구는 특히 2차원 포켓가공과 3차원 윤곽가공에 유용하게 적용될 수 있다.

본 연구는 평면상의 곡선에 대하여만 이루어졌다. 이를 좀더 일반화하여 3차원 공간곡선으로부터 점열을 생성하는 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2003년 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었습니다.

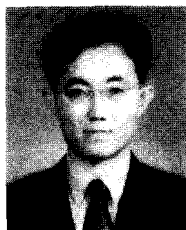
참고문헌

1. 정연찬, 기동우, 박준철, "곡선 점열화의 다양한 요구와 실제적 접근법," 한국 CAD/CAM학회 학술발표회 논문집, pp. 131-136, 2001.
2. Piegl, L. and Tiller, W., "Geometry-based triangulation of trimmed NURBS surfaces," *Computer Aided Design*, Vol. 30, No.1, pp. 11-18, 1998.
3. de Boor, C., *A Practical Guide to Splines*, Springer-Verlag, New York, 1978.
4. Filip, D., Magcdson, R. and Markot, R., "Surface algorithms using bounds on derivatives," *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 3, pp. 295-311, 1986.
5. Kirk, D., *Graphics Gems III*, pp. 262-265, AP Professional, Boston, 1992.
6. Pearson, C., *Handbook of Applied Mathematics*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1974.
7. 최병규, 전차수, 유우식, 편영식, CAD/CAM시스템과 CNC설각가공, 희중당, 1996.
8. 주상윤, 남장현, "자동차 산업의 금형제작을 위한 3차원 윤곽가공," *산업공학*, 제9권, 제2호, pp. 119-128, 1996.
9. 이상헌, 장언찬, 주상윤, "자동차 프레스 금형을 위한 3차원 윤곽가공의 분석법," 한국CAD/CAM학회 논문집, 제7권, 제3호, pp. 141-147, 2002.



주 상 윤

1977년 서울대학교 산업공학과 학사
 1979년 한국과학기술원 산업공학과 석사
 1989년 한국과학기술원 산업공학과 박사
 1979년~현재 울산대학교 산업공학과 교수
 관심분야: 곡면모델링, CAD/CAM, NC 가공, 제조시스템자동화



주 한

2002년 울산대학교 산업정보경영공학부 학사
 2002년~현재 울산대학교 산업정보경영공학부 석사과정
 관심분야: CAD/CAM, 시스템자동화, 네트워킹