

3차원 측정기를 이용한 자유곡면 측정시 최적의 경로 결정에 관한 연구

조 명 우,* 이 승 종,** 김 문 기***

A Study on the Optimal Probe Path Generation for Sculptured Surface Inspection Using the Coordinate Measuring Machine

Myung-Wo Cho,* Seung-Jong Yi,** Moon-Ki Kim***

ABSTRACT

The objective of this research is to develop an effective inspection planning strategy for sculptured surfaces by using 3-dimensional Coordinate Measuring Machine (CMM). First, the CAD/CAM database is generated by using the Bezier surface patch method and variable cutter step size approach for design and machining of the workpiece model. Then, optimum measuring point locations are determined based on the mean curvature analysis to obtain more effective inspection results for the given sample numbers. An optimal probe sequence generation method is proposed by implementing the Traveling Salesperson (TSP) algorithm and new guide point selection methods are suggested based on the concepts of the variable distance between the first and second guide points. Finally, simulation study and experimental work show the effectiveness of the proposed strategy.

Key Words : Coordinate Measuring Machine(3차원 측정기), Sculptured Surface(자유곡면), Probe Path Generation(프로브 경로 결정)

1. 서 론

3차원 측정기는 정밀측정이 요구되거나, 자유곡면과 같은 복잡한 형상을 갖는 물체를 측정하는 장비로서 현대산업에 있어서 그 필요성은 날로 증대되고 있다. 이

는 바로 정확하고 신속한 측정작업이 기업의 생산성 및 제조비에 직접적인 영향을 주기 때문이다. 따라서, 이를 이용하는 검사방법은 정확하고 신속하여야 한다. 일반적으로 3차원 측정기(Coordinate Measuring Machine)를 사용하여 자유곡면의 기하학적 오차를 측

* 대우전자(주) 시스템 사업부

** 한양대학교 자동차공학과

*** 한국기술교육대학 제어기계공학과

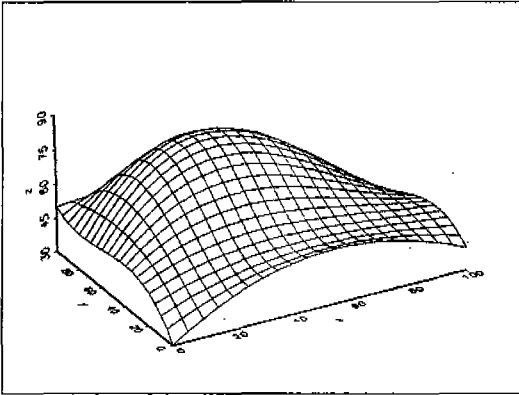


Fig. 1 Bezier Surface

정하기 위해서는 자유곡면을 구성하는 CAD 데이터베이스를 이용하여 적절한 점사계획을 수립하는 방법이 사용된다. 이를 위해 주어진 공차범위(Tolerance)를 만족시키는 적절한 측정점(Measuring Point) 수의 결정 및 최적의 측정점 위치선택, 측정오차(Measuring Error)를 최소화 시키기 위한 프로브(Probe) 접근방향의 산출, 측정시간을 최소화하기 위한 프로브의 측정 경로결정등에 관한 여러 가지 연구가 수행되어 왔다.^(1,3,4,5,7,9) CAD 데이터 베이스를 이용한 3차원 자유곡면의 검사계획은 측정점 수의 결정, 측정점 위치 및 측정 경로의 결정등의 순서로 진행된다. 최적의 측정점 수의 결정에 관한 연구는 Menq⁽⁹⁾ 등에 의하여 연구되었으며, 이들은 사용된 설비의 가공능력(Process Capability)과 공차범위를 고려하여 적합한 측정점 수의 결정방법을 제시하였다.

측정점의 수가 결정되면 다음 단계로 측정점들의 위치를 결정하여야 한다. 일반적으로 3차원 자유곡면은 다음의 식으로 표시된다.

$$P(u, v) = [x(u, v) \quad y(u, v) \quad z(u, v)] \quad (1)$$

이 때, 측정점의 위치를 결정하기 위한 간단하고도 효과적인 방법은 $u-v$ 평면상에서 등간격 측정방법을 이용하는 것이다.⁽⁴⁾ 이 경우에 있어서 각 측정점의 좌표는 하나의 매개변수(Parameter)를 일정하게 유지시키며, 다른 하나의 매개변수를 등간격으로 증가시켜 가면서 계산할 수 있다. 그러나 이러한 방법은 자유곡면의 표면곡률(Surface Curvature)이 급격히 변화하는 부분에 대해서는 측정점의 수가 불충분하거나, 상대적으로

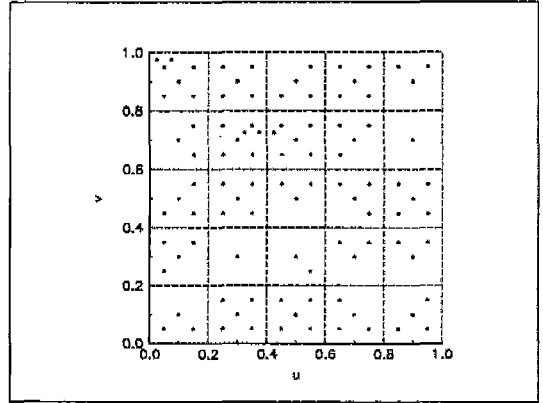


Fig. 2 Measuring Points Using Mean Curvature Analysis

로 평평한 부분에 대해서는 불필요하게 많은 측정점이 위치하게 되는 결과를 초래할 수 있다. 일반적으로 3차원 자유곡면을 가공할 때 공구는 주어진 진행경로에 따라 직선운동을 하며, 주어진 공차범위를 만족시키기 위하여 CAD 데이터베이스로부터 공구의 경로에 대한 간격(Cutter Step Size)이 적절하게 결정되어야 한다.^(6,8,13) 그러나, 공구경로에 대한 계산이 부적절하게 결정될 수도 있으며, 가공설비가 자체적인 오차(Translational, Rotational, Straightness, Squareness errors)를 가질 수도 있다.⁽²⁾ 이러한 경우, 자유곡면의 평평한 부분보다 상대적으로 표면곡률이 큰 부분에서 가공오차가 발생할 가능성이 높다. 따라서, 자유곡면의 평균곡률(Mean Curvature)의 변화에 따라서 적절한 측정점의 위치를 결정하는 방법⁽³⁾이 연구되었으며, 이 때 측정점의 밀도는 표면의 평균곡률의 정도에 따라 변한다. 그러므로 이 방법은 동일한 숫자의 측정점을 측정한다고 하였을 때, 등간격 측정법보다 효과적으로 자유곡면의 가공상태를 측정할 수 있다. Bezier 3차원 자유곡면 생성방법⁽¹⁰⁾을 사용한 표면모델과, 이 곡면의 평균곡률 분석에 의한 측정점의 위치가 Fig. 1과 2에 각각 도시되었다. 주어진 자유곡면에 대해 적절한 측정점의 위치가 결정되고 나면, 최소의 시간으로, 최소의 측정오차로 효과적으로 표면을 측정할 수 있도록 적절한 프로브의 경로가 결정되어야 한다. 이러한 프로브의 경로를 결정하기 위하여 여러 가지 방법들이 연구되었다.^(2,4)

본 연구에서는 3차원 자유곡면이 효과적으로 검사되

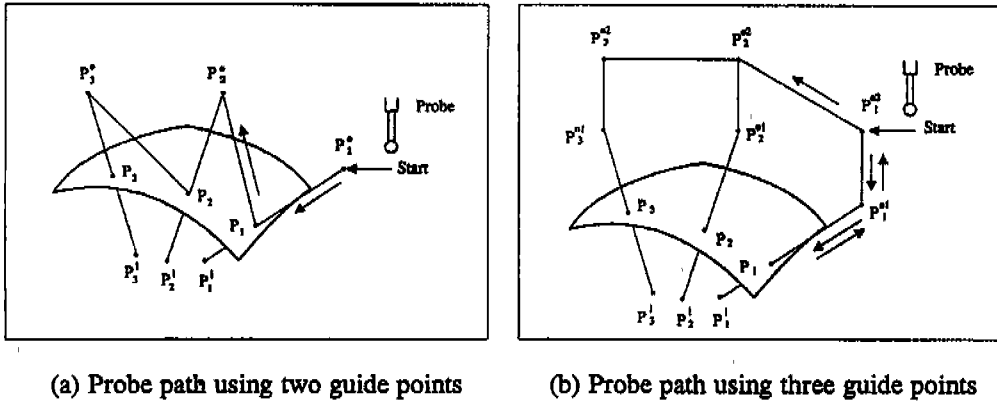


Fig. 3 Guide Points Generation for Sculptured Surface Inspection

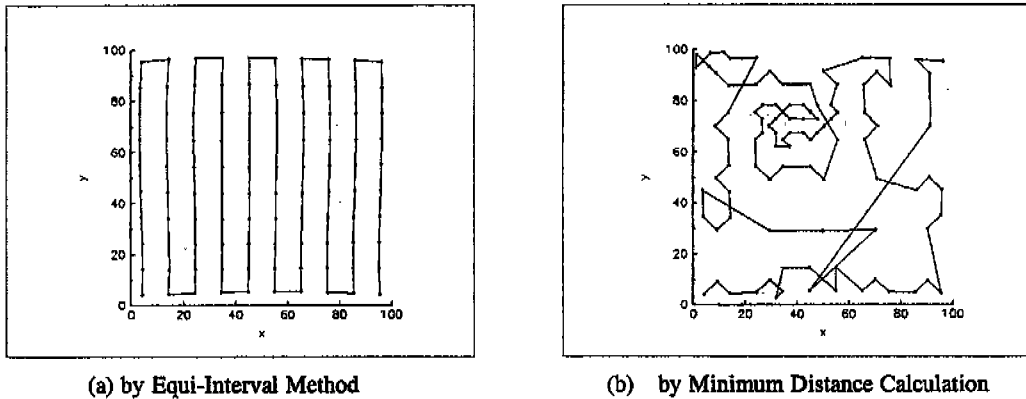


Fig. 4 Measuring Sequence Determination.

어질 수 있도록 표면과 프로브와의 충돌 여부를 판단하여 적절한 경로를 결정하는 방법과, TSP(Traveling Salesperson)기법을 사용하여 측정시간을 최소화하는 최적의 프로브 경로를 결정하는 방법이 제시되었으며, 실험을 통하여 제안된 방법의 효율성을 검증해 보였다.

2. 기존의 검사계획 방법

접촉식 프로브를 사용할 경우, 3차원 측정기의 프로브는 측정과정시 대상물체의 표면에 접근하여 측정 후 후진하여 다음의 측정점 위치로 이동한다. 3차원 측정기를 이용하여 표면을 측정할때, 프로브는 측정오차를 최소화하기 위하여 측정점에 대하여 법선 방향(Normal Direction)으로 접근하여야 한다. 이 경우,

프로브가 측정점의 법선 방향으로 움직이도록 하기 위하여 각 측정점에 대응하는 한 쌍의 유도점(Guide Point)이 정의된다. (4) 이러한 유도점쌍은 측정점을 중심으로 표면의 내부와 외부의 동일한 법선 벡터상에 위치하며, 이 때 표면으로부터 각각의 유도점까지의 거리는 동일하다. 이 경우에 프로브는 톱니모양의 움직임을 하게되나, 대상물체의 형상에 따라 프로브가 한 지점을 측정한 후에 다음의 유도점까지 움직일때 표면과의 충돌이 발생할 수도 있다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해 또 다른 하나의 유도점이 추가되는 경우도 있으며, 추가되는 유도점은 표면의 외부에 위치하며 표면과의 충돌을 방지하도록 충분한 높이를 가져야 한다. 이러한 각각의 경우의 유도점 결정방법을 Fig. 3에 나타내었으며, 각각의 유도점을 계산하기 위한 수식은 다

음과 같다.

2.1 유도점 결정방법

2.1.1 2개의 유도점을 정의한 경우

Fig. 3(a)와 같이 2개의 측정점을 정의한 경우, 주어진 측정점 $p(u_i, v_j)$ 에 대한 외부 및 내부의 유도점은 다음과 같이 주어지며, 여기서 Δg_{ij} 는 측정점과 각 유도점 사이의 거리이고, 프로브의 표면에 대한 접근 속도 및 표면의 형상을 고려하여 결정된다.

$$p(u_i, v_j)^o = p(u_i, v_j) + \Delta g_{ij} \cdot N(u_i, v_j) \quad (2-1)$$

$$p(u_i, v_j)^i = p(u_i, v_j) - \Delta g_{ij} \cdot N(u_i, v_j) \quad (2-2)$$

2.1.2 3개의 유도점을 정의한 경우

Fig. 3(b)와 같이 3개의 유도점을 정의한 경우, 측정점에 대한 내부 유도점과 첫번째 외부 유도점은 2개의 유도점을 정의 할 경우와 동일하며, 표면과의 충돌을 피하기 위한 두 번째 외부 유도점은 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$p(u_i, v_j)^{o2} = p(u_i, v_j) + \Delta g_{ij} \cdot N(u_i, v_j) + \Delta H \quad (2-3)$$

여기에서 $\Delta H = (0, 0, \Delta h)$ 이며, 두개의 외부유도점 사이의 거리를 나타낸다.

주어진 자유곡면에 대하여 최적의 측정점의 위치 및 이에 대응하는 유도점의 위치가 결정되면, 최소의 시간으로 자유곡면을 측정할 수 있도록 각 유도점의 측정순서를 결정하여야 한다. 동간격의 격자모양으로 측정점의 위치를 결정할 경우에는 단순히 u 또는 v 방향으로 좌표를 증가시키며 측정순서를 결정하는 방법이 사용되며, 곡면의 평균곡률을 고려하여 측정점의 위치를 결정하는 경우에는 하나의 측정점에서 가장 가까운 거리에 있는 측정점을 결정해나가는 방법으로 측정점의 순서를 결정할 수 있다. 이러한 측정점의 순서를 결정하는 방법을 Fig. 4에 나타내었다.

3. 새로운 검사계획 방법

본 연구에서는 정해진 측정점의 측정순서 결정을 위하여 Traveling Salesperson(TSP) 알고리즘이 적용되었으며, 프로브가 각 측정점 사이를 이동할 때 표면과의 충돌여부를 판단하여 유도점 사이의 거리를 가변

적으로 결정함으로써 측정시간을 최소화할 수 있는 방법을 다음과 같이 제안하였다.

3.1 TSP를 기초로한 경로 생성

종래의 방법에 있어서 측정점의 순서는 Parametric Domain상에서의 u, v 값들에 의해서 결정되어진다. 측정점들은 u 좌표값이 큰 순서에 따라 label이 정해지고, 여기서 u 좌표값이 같은 점들은 같은 label을 갖게 된다. 그리고 같은 label을 갖는 측정점들의 수가 1개 이상일때는 점들은 다시 v 좌표값에 따라서 분류 되어진다. 여기서, 측정시간을 줄이기 위하여 첫번째 label이 홀수라면 v 값이 큰 순서에 따라 등급이 매겨지고, 짝수라면 작은 순서에 따라 등급이 매겨진다. 표면을 측정하기 위한 순서는 첫 번째 및 두 번째 label로부터 결정되어질 수 있다. 이 경우에 있어서 프로브는 u 방향으로 증가하는 쪽으로 움직이는 반면에, v 방향으로 교대로 번갈아 가는 추세로 움직일 것이다. 그러나 표면의 기하학적 특성이 양방향으로 다르기 때문에 u 와 v 좌표의 순서가 변함에 따라 전체 측정시간은 달라질 수 있다. 그러므로 측정점들을 v 좌표에 따라 label을 정하고, 다음에 u 좌표에 따라 순서를 정하는 방법으로 한번 더 측정순서를 결정한 후, 두가지 경우에 대한 전체 측정시간을 비교하여 적절한 측정경로를 결정한다.

본 연구에서는 프로브의 동작시간, 즉 전체 측정시간을 줄이기 위해 TSP 알고리즘(Simulated Annealing Method(11)를 기초로함)을 적용하였다. Simulated Annealing 방법은 대규모의 최적화(Optimization) 문제들에 대해, 특히 원하는 global 극값(Extrema)이 여러 local 극값 사이에 숨겨져 있을 때, 아주 효과적인 해결방안을 제시해주는 알고리즘이며, 이 방법은 3차원 측정기를 이용하여 자유곡면을 측정할 때 프로브의 최단시간 경로를 결정하는데 효과적으로 적용 될 수 있다. 이 때 사용된 목적함수(Objective Function)는 다음과 같다.

$$E = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 + (z_i - z_{i+1})^2} \quad (3)$$

여기에서, n 은 측정점의 총갯수이며, (x_i, y_i, z_i) 는 각 측정점의 좌표, E 는 전체 움직인 거리를 나타내며, E 를 최소화하는 측정점의 순서를 결정함으로써 최소측

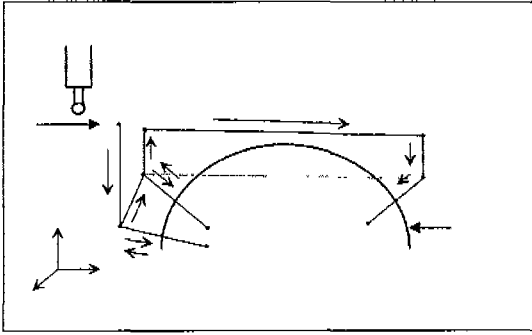


Fig. 5 First Proposed Guide Point Determination Method

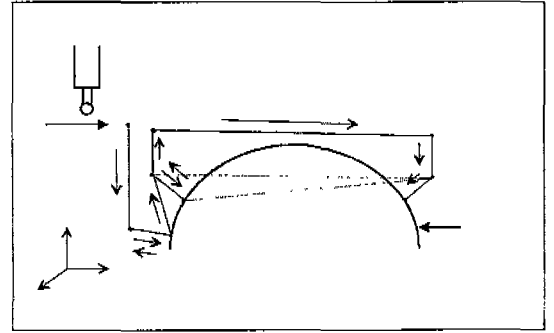


Fig. 6 Second Proposed Guide Point Determination Method

정시간을 위한 프로브의 경로를 얻을 수 있다.

3.2 새로운 유도점 결정방법

주어진 자유곡면에 대한 측정점들의 위치와 측정순서가 결정되면 최소한의 측정오차내에서 효과적으로 표면을 측정하기 위한 유도점의 위치가 결정되어야 하며, 본 연구에서는 다음과 같은 방법이 제시되었다.

Fig. 3(b)와 같이 유도점을 결정하는 방법에서는 프로브는 z 방향을 따라 유도점 p_1^{o2} 에서 다음 유도점 p_1^{o1} 로 빠르게 움직인다. p_1^{o1} 을 지난 후 프로브는 표면과의 급작스런 접촉을 피하기 위하여 속도를 줄이게 되고, 법선벡터(Normal Vector)방향을 따라서 내부 유도점 p_1^i 을 향해 접근한다. 프로브는 내부 유도점에 도달하기 전에 표면점 p_1 에서 자유곡면과 접촉하며, 그때의 프로브 좌표를 읽어서 측정값으로 사용한다. 표면과 접촉한 후에 프로브는 p_1^{o1} 을 거쳐서 p_1^{o2} 로 후퇴하며, 측정을 계속하기 위하여 다음 측정점의 유도점으로 이동한다. 이 방법에서, 각 측정점에 대한 유도점과 표면과의 거리(예를 들면 유도점 p_1^{o1} 과 표면의 측정점 p_1 사이의 거리)는 일반적으로 일정하게 정해지며, 2개의 외부 유도점 p_1^{o1} 과 p_1^{o2} 사이의 거리는 다음 측정점으로 이동할 때 발생할 수도 있는 표면과의 불필요한 충돌을 피할 수 있도록 정해진다. 프로브의 측정경로를 설계할 때, 이러한 값들은 설계자의 과거 경험과 주어진 자유곡면의 형상을 참조하여 결정하게 되며, 이러한 방법은 프로브의 경로에 불필요한 움직임을 포함시킬 수도 있기 때문에 전체 측정시간을 증가시킬 수도 있다. 따라서, 본 연구에서는 전체적인 측정시간의 단축을 위한 두 가지의 프로브 경로 결정방법을 다음과 같

이 제시하였다.

3.2.1 프로브 경로 결정방법 1

Fig. 5에서 보는 바와 같이, 첫 번째 방법은 2개의 외부 유도점 사이의 거리를 가변적으로 변화시켜 최소 경로를 구하는 방법을 사용하였으며, 제시된 방법은 다음과 같이 요약 할 수 있다.

1. 프로브는 z 방향을 따라서 외부 유도점 p_1^{o2} 에서 다른 외부 유도점 p_1^{o1} 로 빠르게 움직인다.
2. 프로브가 p_1^{o1} 을 지나며 감속한 후 법선벡터 방향을 따라서 내부 유도점 p_1^i 를 향하여 천천히 접근한다. 프로브는 내부 유도점에 도달하기 전에 표면의 측정점과 접촉하며, 접촉 후 다시 외부 유도점 p_1^{o1} 으로 후퇴한다.
3. 이 때, 프로브가 다음 측정점의 외부 유도점 p_2^{o2} 으로 이동할 때 표면과의 충돌 여부를 판단하여 충돌하지 않으면 유도점 p_1^{o2} 를 지나지 않고 p_1^{o1} 에서 p_2^{o2} 로 직접 이동하며, 충돌 발생시에는 유도점 p_1^{o2} 를 거친 후 p_2^{o2} 로 이동한다.
4. 이 때, 외부 유도점 p_1^{o2} , p_2^{o2} 의 위치는 표면의 형상에 따라서 결정되며, 충돌이 발생하지 않는 안전한 거리를 확보한다.

3.2.2 프로브 경로 결정방법 2

Fig. 6에서와 보는 바와 같이, 두 번째 방법은 기존의 2 유도점 방식과 3 유도점 방식을 혼합한 형태의 것이며, 한 측정점을 측정한 후에 다음 측정점의 외부 유도점으로 직접 움직일 때 표면과의 충돌여부를 검사하여 최단 측정경로를 결정하는 방법이다. 이 방법은 다음과 같이 요약할 수 있다.

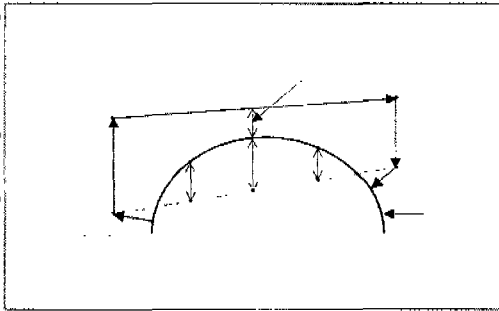


Fig. 7 Determination of the Second Guide Point

1. 프로브가 측정점 p_1 에 도달하여 측정후, 다음 측정점의 외부 유도점 p_2^{01} 으로 이동할 때의 경로에서 표면과의 충돌이 없으면 p_1^{01} 으로 돌아가지 않고 p_2^{01} 로 직접 움직인다.

2. 그림에서 보이는 것처럼 프로브가 p_2 를 측정후 p_3 의 외부 유도점 p_3^{01} 으로 움직일 때 충돌이 발생하면 p_2^{01} 으로 후퇴하여 p_1^{01} 으로 이동시의 충돌 여부를 다시 판정한다.

3. 이 때, 충돌이 발생하지 않으면 p_2^{01} 에서 p_3^{01} 로 직접 이동하여 측정하고, 충돌이 발생하면 p_2^{02} 로 후퇴한 후 p_1^{02} 로 이동한다. 이 때, 2개의 외부 유도점 사이의 거리는 첫 번째 방법과 마찬가지로 표면과 충돌하지 않는 안전거리를 유지한다.

상기한 방법이 실제로 적용되기 위해서는 프로브의 이동시에 표면과 충돌이 발생할 것인지를 판단하는 방법을 결정하여야 한다. Fig. 7에 프로브의 표면과의 충돌여부 판단과 이동시 충돌을 피하기 위한 안전거리 계산방법이 도시되었다. 이 방법에서는 프로브가 p_1^{02} 에서 p_2^{02} 로 이동할 때 표면과 충돌하지 않기 위한 안전거리 확보를 위하여 최소 허용 거리 (H_{max})를 다음과 같이 계산하였다.

3.2.3 충돌판정과 안전거리 계산방법

1. p_1^{01} 과 p_2^{01} 을 연결하는 직선을 L_1 이라 정의하고 이 직선위에서 등간격으로 위치해 있는 $q_1^1(x, y, z)$, $q_2^1(x, y, z)$, $q_3^1(x, y, z)$ 의 3개의 점을 정의한다.

2. (q_1^1, q_2^1, q_3^1) 에서 z 축에 평행으로 수직선을 정의하고 이 수직선과 주어진 자유곡면이 만나는 점을 구하여 이를 (q_1^2, q_2^2, q_3^2) 라 정의한다. 이 때, (q_1^2, q_2^2, q_3^2) 의 x, y 좌표는 (q_1^1, q_2^1, q_3^1) 의 x, y 좌표와 동일하며, z 좌표는 다음과 같이 구할 수 있다.

Table 1 Machining Condition

Cutting	Cutter Size	Tolerance	Side Step No.	Spindle rpm
Rough	0.50 inch	0.50 mm	100	3600
Finishing	0.50 inch	0.005 mm	500	3600

※ z 좌표의 계산

a. 주어진 (x_o, y_o) 값에 대하여 다음 식을 동시에 만족하는 u, v 값을 구한다. 이 때, 일반적인 Newton-Raphson Method⁽¹¹⁾를 적용할 수 있다.

$$x(u, v) = x_o, \quad y(u, v) = y_o$$

b. 계산된 u, v 값을 다음식에 대입하여 z 좌표를 구한다.

$$Z_o = Z(u, v)$$

이 때, 다음 식과 같은 관계가 성립한다.

$$H_i = (q_i^2)_z - (q_i^1)_z, \quad \text{for } i = 1, 2, 3$$

$$H_{max} = \max\{H_1, H_2, H_3\}$$

$$\begin{cases} \text{if } H_{max} \geq 0 : \text{collision} \\ \text{else} : \text{wo collision} \end{cases}$$

3. 프로브와 표면과의 충돌이 발생하는 경우, p_1^{02} 와 p_2^{02} 를 포함하는 직선 L_2 를 정의하고 이 직선과 표면과의 최소 거리를 계산하여 이 거리가 안전거리(Safety Distance) 보다 크도록 유도점 p_1^{02} 와 p_2^{02} 의 좌표를 결정한다.

$$d_{min} > SD$$

여기에서 d_{min} 는 직선 L_2 와 표면과의 최소거리이고, SD는 계산오차 및 가공 오차를 고려한 안전거리를 나타낸다.

4. 실험과 결과

본 연구에서 제안된 프로브의 경로 결정 방법을 검증하기 위하여 여러 가지 시뮬레이션과 실험이 수행되었으며, 그 결과는 다음과 같다.

4.1 자유곡면의 설계와 가공

본 연구에서 사용된 자유곡면 모델은 식(1)에 나타낸 바와 같이 Bezier Surface Patch Generation 방법을 이용하여 생성하였으며, 생성된 곡면은 Fig. 1에 도

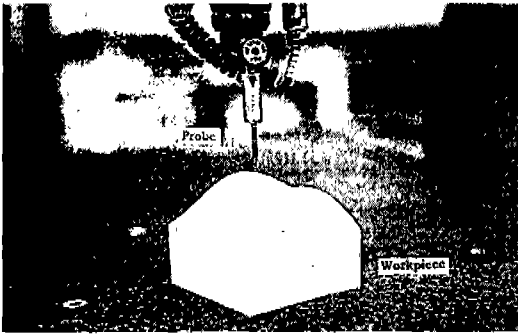


Fig. 8 CMM Setup and Workpiece

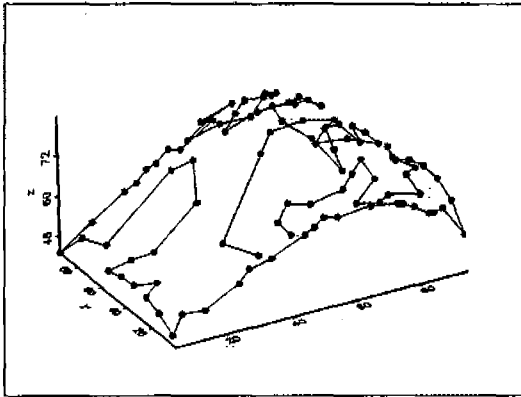


Fig. 9 Probe Path by Using TSP

시한 바와 같다. 곡면의 가공은 KIWA(Model EXCEL-510) CNC 머시닝 센터를 사용하였으며, 100mm×100mm×100mm의 알루미늄 소재를 사용하였다. 절삭을 위한 데이터 계산을 위하여 곡면의 u -방향에서는 Variable Step Size 결정 방법을 사용하였고, v -방향에서는 균일한 Step Size를 사용하였다.^(12,13) 사용된 가공조건은 Table 1에 나타내었으며, 계산된 데이터를 이용하여 CNC 가공을 위한 G-codes를 계산하였으며, 가공시 주축속도는 3600rpm이고 이송속도는 350mm/min으로 하였다.

4.2 3차원 측정기를 이용한 자유곡면의 검사

제시된 프로브 경로 결정방법의 실용성을 보여주기 위하여 3차원 측정기를 사용하여 가공된 곡면에 대한 측정실험을 수행하였다. 이 때, Brown & Sharpe (model Xcel) 3차원 측정기를 사용하였으며, 직경

Table 2 Average Moving Distance of the Probe

Probe Path Generation Method	Average Moving Distance
Rank first by u -value	18.1270mm
Rank first by v -value	18.0249mm
Traveling Salesperson	9.9473mm

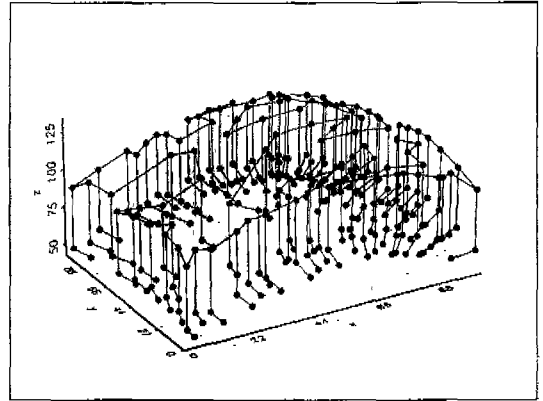


Fig. 10 Generated Probe Path Based On Conventional Method

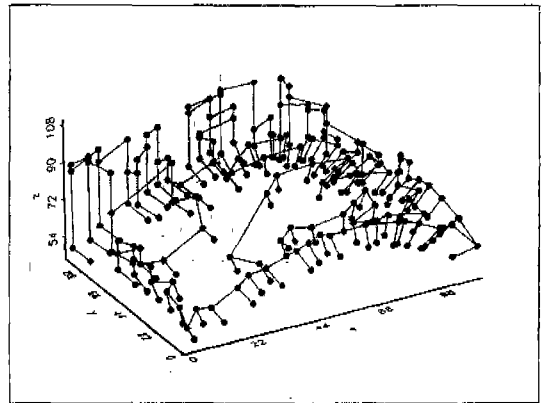


Fig. 11 Generated Probe Path Based On the First Proposed Method

1mm의 Ball-Type의 프로브를 사용하였다. Fig. 8은 실험에 사용된 3차원 측정기와 소재를 나타낸다.

Fig. 9는 TSP 알고리즘을 이용하여 결정된 측정순서를 보여주며, Table 2에 기존의 측정순서 결정방법과 TSP 알고리즘을 이용했을 때의 각 측정점 사이를 프로브가 이동한 평균거리를 나타내었다. 측정점의 순서를 결정한 후에, 기존의 프로브 경로 결정 방법과 제

Table 3 Experimental Result of the Probe Path Generation Method

Probe path generation method	Average moving distance (through simulation study)	Measuring time (through experimental work)
Conventional method	111.2604mm	986 sec
The first proposed method	41.4051mm	534 sec
The second proposed method	29.4942mm	457 sec

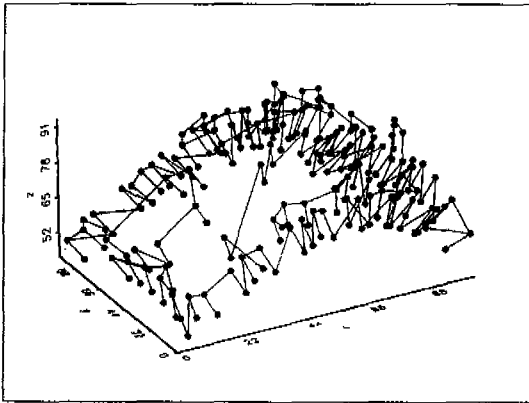


Fig. 12 Generated Probe Path Based On the Second Proposed Method

시된 두 가지의 방법을 이용하여 소재를 측정하였으며, 이 때의 프로브 경로를 Fig. 10, 11, 12에 나타내었다. 본 실험에서는 표면과 접촉하기 위한 프로브 접근 속도를 3mm/sec로 정하였으며, 전체 소요된 측정시간은 Table 3에 요약되었다. 실험 결과에 의하여, 제안된 방법들은 기존의 방법에 비해서 측정 시간을 상당히 감소시킬 수 있다는 결론에 도달하였다. 본 연구에서 제안된 방법들은 기존의 방법을 사용했을 때의 측정시간을 각각 986초에서 534초와 457초로 감소시켰으며, 이는 각각의 측정 시간이 45.84%와 53.65%로 감소했음을 의미한다. 따라서, 본 연구에서 제시된 방법은 3차원 자유곡면의 측정과정에서 소요되는 시간과 비용을 줄이기 위하여 이용 할 수 있는 효과적인 방법이라 사료된다.

5. 결 론

본 연구는 3차원 측정기를 이용하여 자유곡면을 측정할 때 효과적으로 측정계획을 수립하는 방법을 제시하였으며, 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 소재 모델의 설계와 가공을 위하여 Bezier Sur-

face Patch Generation 방법과 Variable Cutter Step Size 결정법을 적용하여 CAD/CAM 데이터 베이스를 구축하였다.

2. 적절한 측정점들의 위치를 결정하기 위하여 평균 곡률(Mean Curvature) 해석에 의한 방법이 사용되었다.

3. 최단의 측정순서를 Traveling Salesperson (TSP) 알고리즘을 이용해서 결정하는 방법을 제안하였으며, 시뮬레이션 결과는 TSP 알고리즘이 기존의 방법에 비해서 이동 평균거리가 12.87mm에서 9.95mm로 감소하였음을 보여주었다.

4. 프로브의 충돌여부를 판단하여 경로결정을 할 수 있는 방법을 제안하였으며, 시뮬레이션 결과는 기존의 방법보다 이동 평균거리가 111.26mm에서 29.49mm로 감소 하였음을 보여주었다.

5. 제안된 방법의 검증을 위하여 일련의 실험이 수행되었으며, 실험 결과 전체 측정시간이 986초에서 457초로 감소하는 결과를 얻었으며, 따라서 본 연구에서 제안된 방법들이 실제적으로 사용될 수 있음을 보여 주었다.

참고문헌

1. 조명우, 박용길, "3차원 측정기를 이용한 유연검사 시스템", 한국정밀공학회지, 1993 12월, pp.16-29
2. Cho, J.H., Cho, M.W and Kim, K., "Volumetric Error Analysis of a Multi-Axis Machine Tool Machining a Sculptured Surface Workpiece", International Journal of Production Research, Vol.32, No.2, 1994, pp.345-363
3. Cho, M.W. and Kim, K., "New Inspection Planning Strategy for Sculptured Surfaces Using Coordinate Measuring Machine", International Journal of Production Research, Vol.33, No.2, 1995, pp.427-444.
4. Duffie, N., Bollinger, J., Piper, R. and Kroneberg, M., "CAD Directed Inspection and Error Analysis Using Surface Patch Databases", Annals of the CIRP, Vol.33/1/1984, pp.347-350.

5. Duffie, N.A., Kann, J.A. and Feng, S.C., "Integration of CAD and Inspection for Mold Production and Rework", Transactions of the NAMRC/SME XV, 1987, pp. 641-648.
6. Ferrelra, P., Puls, F., Chang T.C., and Liu, C.R., "A CAD/CAM System for Complex Surfaces", Proceedings of Computer-Aided/Intelligent Process Planning, ASME Winter Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, 1985, pp.189-199.
7. Hopp, T.H. and Hocken, R.J., "CAD-Directed Inspection", Annals of the CIRP, Vol.33/1, 1984, pp.357-361.
8. Loney, G.C. and Ozsoy, T.M., "NC Machining of Free Form Surfaces", Computer-Aided Design, Vol. 17 No. 2 3/1985, pp.69-76
9. Menq, C.H., Yau, H.T., Lai, G.Y. and Miller, R.A., "Statistical Evaluation of Form Tolerances Using discrete Measurement Data", 1990 ASME Winter Annual Meeting, ASME, PED-Vol.47, 1990, pp.135-149.
10. Mortenson, M.E., Geometric Modeling, John Wiley & Sons, New York, N.Y. 1985.
11. Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. and Flannery, B.P., Numerical Recipes in C, Cambridge University Press, N.Y. 1992.
12. Kim, K.I. and Kim, K., "Parametric Tool Path Planning Based on New Variable Step Strategy for Sculptured Surfaces", Transaction of NAMRI/SME, Vol.21/1993.
13. Suh, Y.S. and Lee, K., "NC Milling Tool Path Generation for Arbitrary Pockets Defined by Sculptured Surfaces", Computer-Aided Design, Vol.22 No.5 6/1990, pp.273-284.