

자유곡면을 위한 CAD 지향 측정시스템

박 회 재, 포항공과대학 산업공학과
김 영 호, 포항공과대학 산업공학과
홍 예 선, 한국과학기술연구원(KIST)
로봇 및 유공압 연구실

현재 3차원 좌표 측정기(Coordinate Measuring Machine : CMM)는 기계가 공품의 수치검사(Dimensional inspection)에 널리 사용된다. 검사 과정의 자동화를 향상시키기 위해 CMM을 이용한 컴퓨터 통합 검사 시스템이 필요하게 되었다. 이 논문에서는 자유곡면 형상에 대해 CAD 지향의 검사 개념을 사용하여 CMM을 이용 자동 측정하고 그 결과를 토대로 측정된 자유곡면에 대한 형상오차를 분석하는 부분을 다룬다.

1. 서론

CAD와 CMM을 통합함으로써(integration) 수동적으로 이루어져왔던 측정작업을 자동화할 수 있다[1]. 즉, CAD의 기하학적 형상에 대한 데이터를 바탕으로 측정 계획을 마련하고 이러한 계획안을 CMM의 NC 코드로 변환함으로써 측정의 자동화를 이룰 수 있다. 여기서는 다양한 피측정체의 형상 중에서 자유곡면의 형상에 대한 오차를 비교 분석하고자 한다. 일반적으로 자유 곡면의 형상 오차 분석은 곡면 패러미터의 등간격마다 수행된 측정 데이터를 토대로 한다[2]. 자유곡면의 형상오차를 분석하는 것은 크게 좌표시스템 정렬(Part Alignment), 측정 계획(inspection Planning), 그리고 오차 계산(Error Evaluation) 3개의 모듈로 나눌 수 있다.

2. 좌표시스템 정렬(Part Alignment)

CAD로 설계된 금형과 가공되어 CMM 상에 올려진 금형의 좌표시스템은 서로 일치하지 않으며, 이러한 상이한 두 좌표 시스템을 맞추는 것이 필요하다. 이 부분은 CMM으로 측정한 6개의 측정점들을 이용하여 두 좌표 시스템에 관한 상관관계를 얻는다. 이는 두 개의 좌표 시스템사이의 변환행렬(Transformation Matrix) T를 구하는 것이다. 즉, CMM 상의 점을 P라 하고 CAD상의 점을 Q라 할때, 변환 행렬 T는 다음의 관계식을 만족한다.

$$\text{또는,} \quad P = T * Q \quad \text{[식 1-1]}$$

$$Q = T^{-1} * P \quad \text{[식 1-2]}$$

따라서 T를 구하게 되면, CMM으로 측정된 점에 상응하는 CAD 상의 점을 알 수 있고, 반대로 CAD 상의 점에 해당하는 CMM 상의 좌표를 알 수 있게 된다. 이러한 상관 관계를 이용하여 CAD 데이터를 이용한 측정 계획을 CMM의 NC 코드와 함으로써 컴퓨터를 이용한 자동 측정을 수행할 수 있을 뿐만 아니라, 이러한 측정 결과를 다시 CAD의 좌표상으로 변환하여 CMM의 측정치와 CAD 데이터를 비교 분석할 수 있게 된다.

3. 측정 계획 (Inspection Planning)

측정 계획은 주어진 자유 곡면 상에서 측정점을 선정하여 탐침(Probe)의 측정 경로를 마련하는 것을 말한다. 즉, CMM을 이용하여 자유곡면의 가공품을 측정한다면 몇 개의 점을 그리고 곡면 상의 어떠한 점들을 어떻게 측정할 것인가에 관한 부분이다.

3-1. 측정점의 할당

측정점의 갯수는 사용하는 CMM의 정밀도 및 그리고 측정 결과에 대해 설정된 유의수준 등을 고려하여 결정될 수 있다. 여기서는 측정점의 수(N)가 이미 결정되어 있을 때, 이 N개의 측정점들을 3가지 방법에 의해서 자유곡면 상에 할당하는 부분에 대해 고려한다. 사용된 자유곡면은 두 개의 패라미터 u, w에 의한 패라미터 곡면(Parametric Surface)이다. 본 연구에서는 자유곡면 상의 측정점을 선정하는 3가지 방법을 개발 제안한다.

3.1.1 등간격 할당

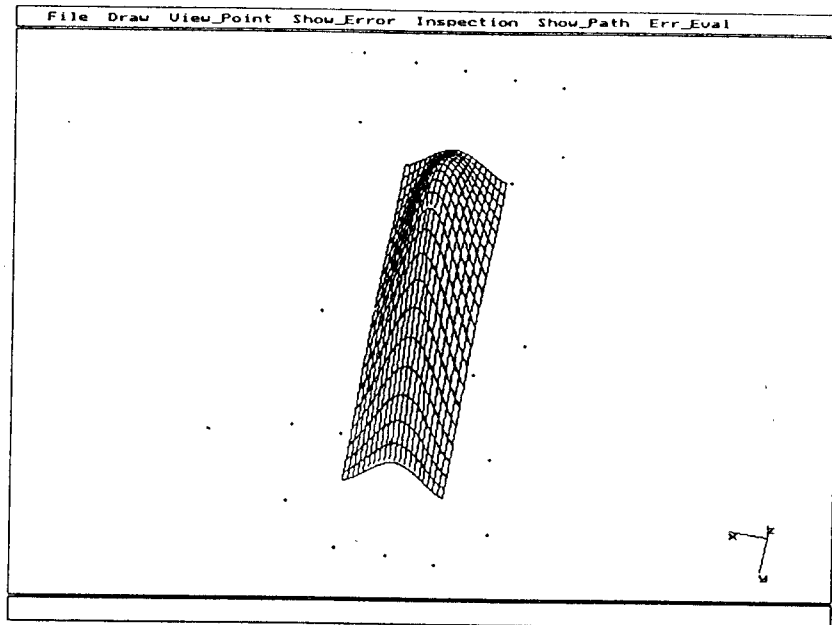
M개의 패치들로 이루어진 자유곡면 상에 N개의 측정점들을 두 패라미터의 등간격마다 할당한다. 이 방법은 평면 전체에 고른 측정점 분포를 보이는 반면에, 국부적으로 곡률이 큰 경우에도 등간격 할당으로 인한 측정의 부정확성을 보이는 것이 문제이다.

3.1.2 곡률에 따른 측정점 할당

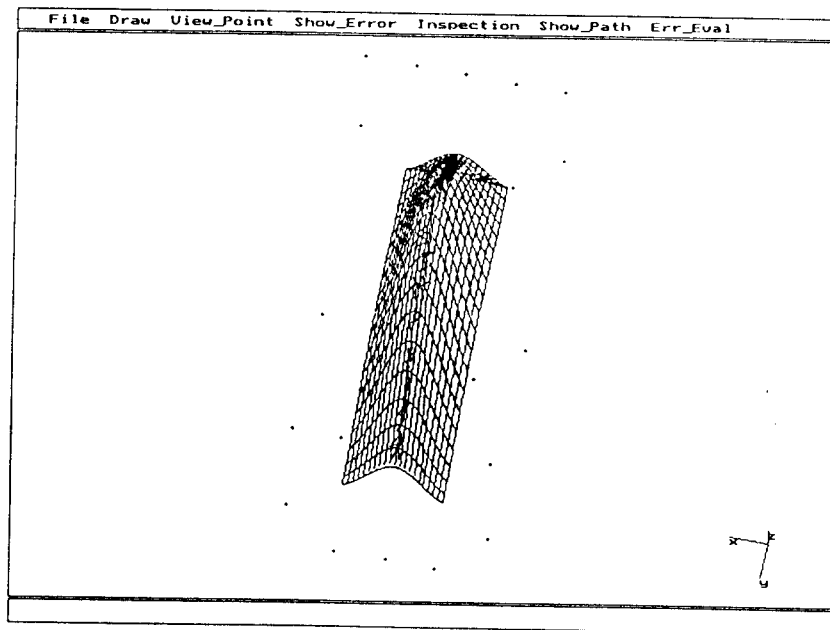
N개의 측정점들을 자유곡면의 곡률이 상대적으로 큰 부분에만 할당한다. 이는 등간격할당 방법이 곡면의 특징을 고려하지 않는 비효율성을 고려한 것이다. 자유곡면 상의 임의의 점을 지나는 곡선이 무수히 많이 존재하므로 그 점에 대한 곡률 또한 무수히 많이 존재한다. 여기서는 자유곡면의 한 점에 대해서 그 점을 지나는 u방향의 곡선에 대한 곡률 벡터를 Curvature_U (cux,cuy,cuz), w방향의 곡선에 대한 곡률 벡터를 Curvature_W (cwx,cwy,cwz), 그리고 그 점에 대한 법선 벡터를 Norm (nx,ny,nz)이라고 하면, 그 점에 대한 곡률 Norm_curvature를 [식 2-1]로 정의한다.

$$\text{Norm_curvature} = ((\text{cux}*\text{nx})^2 + (\text{cuy}*\text{ny})^2 + (\text{cuz}*\text{nz})^2)^{0.5} + ((\text{cwx}*\text{nx})^2 + (\text{cwy}*\text{ny})^2 + (\text{cwz}*\text{nz})^2)^{0.5} \quad [\text{식 2-1}]$$

이렇게 정의된 곡률을 이용하여 원하는 측정점 수(N)의 10배를 자유곡면의 등간격마다 곡률을 구하고 이러한 점들 중에서 곡률이 상대적으로 큰 N개의 점을 추출한다. [그림 2-1]은 [식 2-1]에서 정의한 곡률에 의한 측정 계획의 타당성을 나타내는 것으로서 Norm_curvature를 이용한 측정경로가 곡률이 상대적으로 큰 곡면의 중심 부분을 따라가는 것을 볼 수 있다.



(a)



(b)

[그림 2-1] Norm_curvature를 이용한 자유곡면의 측정경로
(a) 측정 곡면 (b) 측정 경로

3.1.3 혼합법

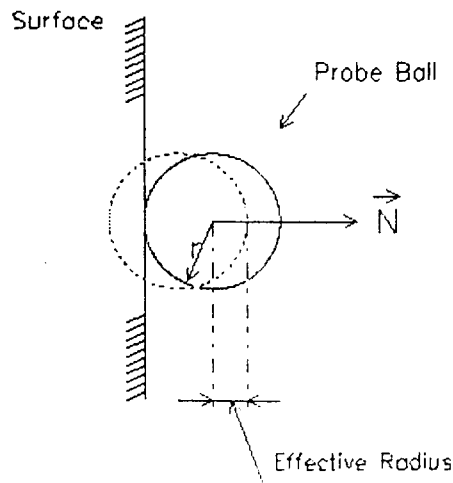
N개의 측정점들 중, 일부는 등간격 할당 방법에 의해서 그리고 나머지는 곡률 계산에 의해서 자유곡면 상에 할당한다. 이는 방법(1)에 의한 측정점들이 곡률이 비교적 큰 부분만을 고려하여 발생하는 측정점의 과도한 집중을 막기 위함이다.

3.2. 측정 경로 결정

위 3가지 방법을 이용하여 자유곡면 상에 할당된 측정점들을 정확히 측정하기 위해서 CMM의 탐침(Touch-Trigger Probe)은 할당된 자유곡면의 각 측정점에 대해서 법선 방향으로 접근해야 한다. 따라서 전체적인 측정계획은 각 측정점에 대한 법선 방향의 접근 경로가 된다. 여기서 측정의 효율성을 고려할 때 어떠한 점을 먼저 측정할 것인가하는 측정의 순위를 결정해야 한다. 이는 N개의 측정점을 모두 탐침이 최소 경로로 통과시킨다는 문제이므로 전형적인 TSP(Travelling Salesman Problem)가 된다. TSP의 난점을 고려해 여기서는 현재의 탐침 위치에서 최소 거리의 측정점을 찾아가는 방식으로 측정 계획을 하도록 프로그램되어 있다.

4. 오차 계산 (Error Evaluation)

CMM을 통하여 측정한 점들과 CAD 상의 점들을 어떻게 비교할 것인가하는 것이다. Touch-trigger 탐침이 달린 CMM을 이용하여 얻은 측정값은 정확히 측정 계획의 측정점의 위치를 나타내지 않는다. 이는 크게 3가지 원인 때문에 발생하게 된다. 첫째, 탐침이 갖는 반경에 의한 오차이다. 즉, CMM이 얻는 좌표는 탐침이 하나의 질점으로 가정한 값이고 실제 탐침이 곡면 상에 닿는 곳은 탐침의 중심이 아니다. 따라서 접근 경로 방향으로 탐침의 반경 보정이 필요하다. 둘째, Pre-travel Variation에 의한 오차이다. [그림 4-1]는 이러한 오차를 나타낸다. 이는 Touch-trigger 탐침의 구조적인 문제로서 CMM이 현재의 탐침 위치를 읽어들이는 때는 Body의 스프링에 연결된 Stylus가 일정 수준 이상의 탄성 변형을 일으켰을 때이다. 따라서 접근 경로 방향으로 이러한 탄성 변형을 보정해야 하는데, 탄성 변형에 의한 오차 보정은 탐침의 유효 반경(Effective Radius)을 계산하여 반경 보정을 함으로써 가능하다.



[그림 4-1] 측정체의 표면에 닿아 신호를 발생시킬 때의 Touch-Trigger 탐침

세째, CMM의 기계오차이다. CAD 데이터를 통하여 작성된 측정 계획에 의해 CMM을 이용하여 측정을 하게 되면, 실제 얻어낸 측정 데이터는 CMM의 기계오차(Error of positioning control) 때문에 측정점 P_i 는 CAD상에서 계획된 측정점 Q_i 에 해당하는 점이 아니다. 따라서 CAD 데이터와 가공된 자유곡면을 비교하기 위해서는 측정점 P_i 에 해당하는 CAD 상의 좌표 Q_i 를 찾아야 한다. 정확한 Q_i 를 구한다는 것은 불가능하므로 여기서는 $T^{-1} * P_i$ 와 가장 가까운 CAD 상의 점으로 사용한다. 자유곡면의 형상오차는 N 개의 측정점들 중 Q_i 와 $T^{-1} * P_i$ 사이의 최대 거리와 최소거리의 차로 정의한다. Q_i 를 (x_i', y_i', z_i') P_i 를 $(x_{m_i}, y_{m_i}, z_{m_i})$ 라고 하면 Q_i 는 [식 4-1] 과 [식 4-2]를 만족한다.

$$(x_{m_i} - x_i') \frac{\partial x}{\partial u} + (y_{m_i} - y_i') \frac{\partial y}{\partial u} + (z_{m_i} - z_i') \frac{\partial z}{\partial u} = 0 \quad [\text{식 4-1}]$$

$$(x_{m_i} - x_i') \frac{\partial x}{\partial w} + (y_{m_i} - y_i') \frac{\partial y}{\partial w} + (z_{m_i} - z_i') \frac{\partial z}{\partial w} = 0 \quad [\text{식 4-2}]$$

여기서 P_i 를 CAD 좌표계로 변환한 점을 $C_i(x_{c_i}, y_{c_i}, z_{c_i})$ 라고 하면,

$$C_i = T^{-1} * P_i \quad [\text{식 4-3}]$$

이고,
측정점 i에 대한 오차 ϵ_i 는,

$$\epsilon_i^2 = (x_{c_i} - x_i')^2 + (y_{c_i} - y_i')^2 + (z_{c_i} - z_i')^2 \quad [\text{식 4-4}]$$

이다. 따라서 자유곡면의 형상오차 E은,

$$E = |\text{Max}[\epsilon_i] - \text{Min}[\epsilon_i]| \quad [\text{식 4-5}]$$

이다. 여기서 $i = 1, 2, \dots, N$ 이다.

5. 컴퓨터 시뮬레이션 (Computer Simulation)

개발된 측정 시스템의 성능 시험을 위해서 측정 작업의 시뮬레이션이 수행되었다.

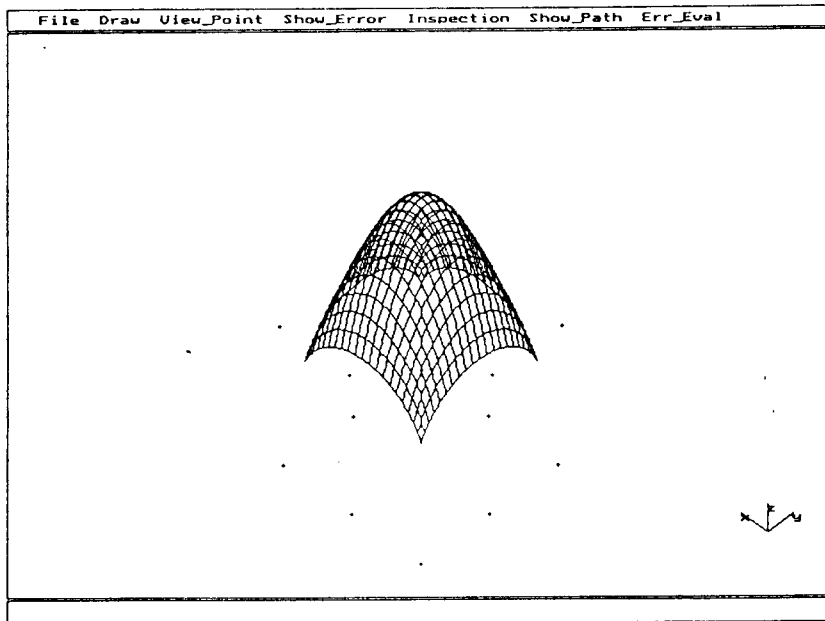
5.1. 시뮬레이션 환경

시뮬레이션 환경은 아래와 같다.

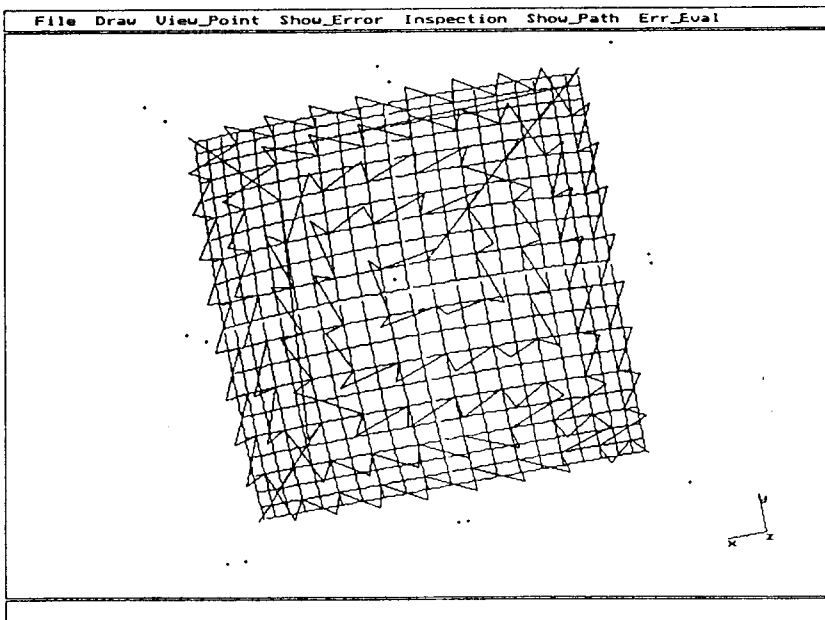
- (1) 탐침 - Touch-trigger 방식으로 반경은 1mm이고 유효 반경은 0.963mm이다.
- (2) 측정체 - Cubic B-Spline 자유곡면으로서 그 형상은 [그림 5-1]과 같다.
- (3) 측정점의 수 - 100 점

5.2. 시뮬레이션 결과

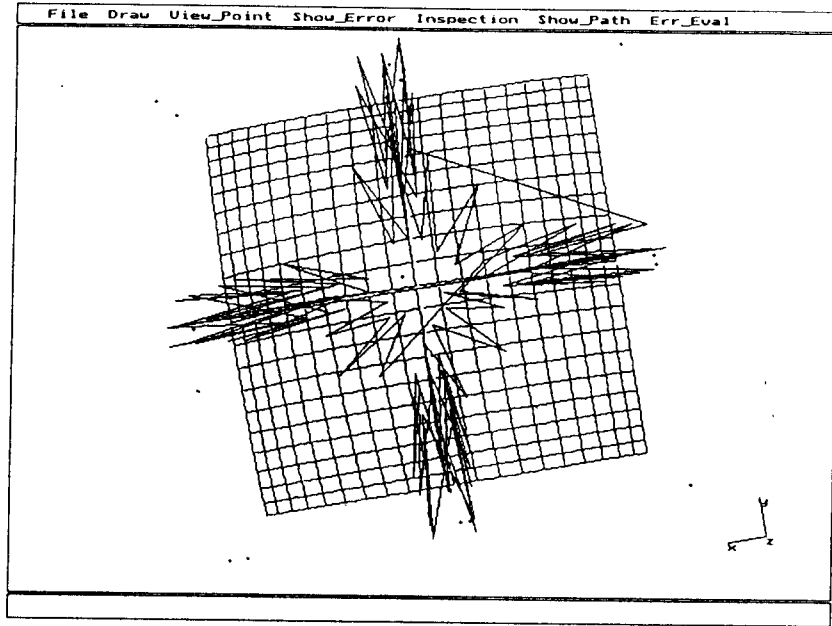
[그림 5-2], [그림 5-3], 그리고 [그림 5-4]은 각각 inspection Planning의 3가지 방법을 이용해 설계한 측정 경로를 나타낸다. [그림 5-5]은 100점 측정을 통한 Bicubic B-Spline 곡면의 오차를 u, w의 평면 상에 나타낸 결과이다. 그림에서 수직 방향의 직선은 자유곡면의 기계 가공오차를 나타낸다.



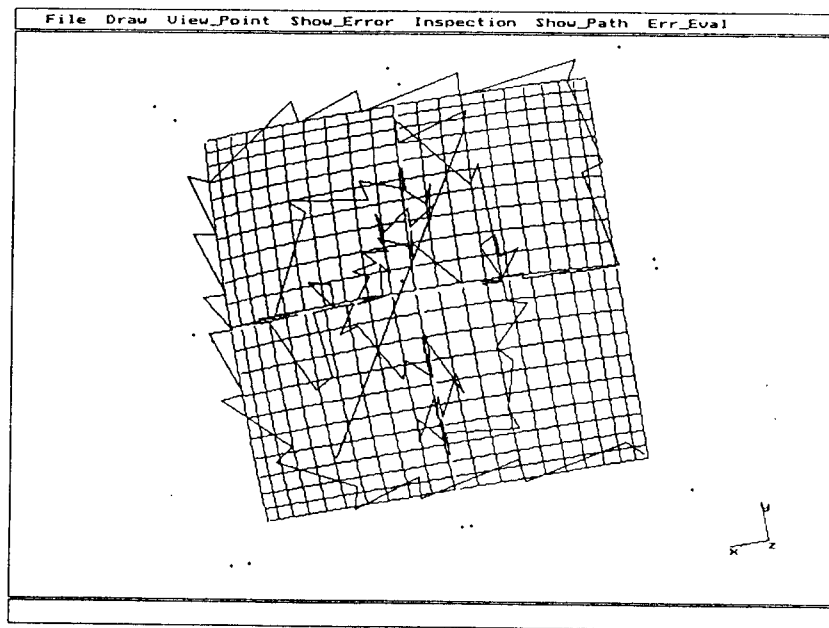
[그림 5-1] 측정하고자 하는 곡면의 형상



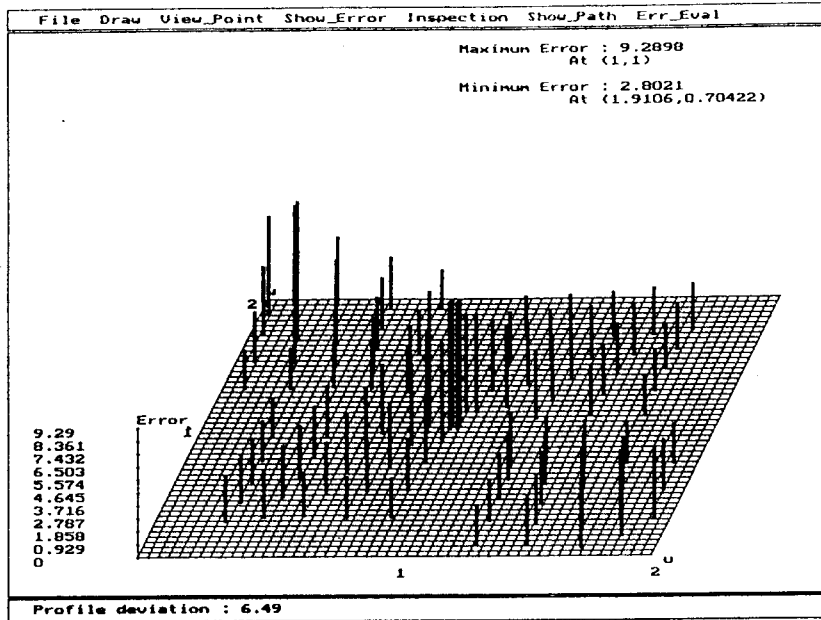
[그림 5-2] 등간격 할당에 의해서 100점을 측정하는 측정 경로



[그림 5-3] 곡률 계산에 의해서 100점을 측정하는 측정 경로



[그림 5-4] 혼합법에 의해서 100점을 측정하는 측정 경로



[그림 5-5] 곡면 오차 분석 결과

6. 결론 및 향후 연구 계획

6.1 결론

- (1) 자유곡면의 CAD 지향 측정 시스템이 개발되었으며 그 유효성이 시뮬레이션을 통하여 입증되었다.
- (2) 측정 계획을 위한 등간격 할당, 곡률 계산 및 혼합법이 개발되었다.
- (3) 자유곡면 가공오차 계산을 위한 엘거리듬이 개발되었으며 시뮬레이션을 통해 유용성을 입증할 수 있었다.

6.2 향후 연구 계획

현재는 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 단계에 머물고 있지만, 자유곡면이 가공되어 있는 알루미늄 금형을 이용하여 실질적인 측정시스템을 개발하고자 한다. 그리고 이러한 시스템은 CAD 시스템과의 링크를 통한 컴퓨터 통합 시스템이다. 그런데 시스템 통합에 앞서, 곡률을 고려한 측정 계획을 향상시키기 위해 De Casteljau 엘거리듬을 이용한 Subdivision 방법을 이용하자 한다. 그리고 측정 경로의 소요시간을 최소화하기 위하여 TSP를 푸는 효과적인 엘거리듬을 도입하여 보다 효율적인 측정 계획을 마련하고자 한다.

후기

본 연구는 한국 과학 기술 연구원(KIST)의 연구비 지원에 의한 연구임을 밝혀둔다.

Reference

- [1] Hopp, Theodore H., CAD-Directed inspection. *Annals of the CiRP*, Vol.33, 357-361, 1991.
- [2] 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, 1:347-350, 1984.
- [3] Lu,J., Duffie,N., Bolinger,J. Two Dimensional Tracing and Measurement Using Touch Trigger Probes. *Annals of the CiRP*, Vol.31, 415-419, 1982.
- [4] Treacy,P., Ochs,J.B., Ozsoy, T.M., Wang,N. Automated tolerance analysis for mechanical assemblies modeled with geometric features and related data structure. *Computer-Aided Design*, Vol. 23,number 6, july/august, 444-453, 1991.
- [5] Sarkar,B., Menq,C.H. Parametric optimization in approximating curves and surfaces to measurement data. *Computer Aided Geometric Design*, Vol.8,Number 4, 267-290, October 1991.