

곡률 기반의 측정점 결정 알고리즘 개발

박현풍*, 손석배, 이관협(광주과학기술원)

Determination of Sampling Points Based on Curvature distribution

Hyunpung Park*, Seokbae Son and Kwan H. Lee(K-JIST)

ABSTRACT

In this research, a novel sampling strategy for a CMM to inspect freeform surfaces is proposed. Unlike primitive surfaces, it is not easy to determine the number of sampling points and their locations for inspecting freeform surfaces. Since a CMM operates with slower speed in measurement than optical measuring devices, it is important to optimize the number and the locations of sampling points in the inspection process. When a complete inspection of a surface is required, it becomes more critical. Among various factors to cause shape errors of a final product, curvature characteristic is essential due to its effect such as stair-step errors in rapid prototyping and interpolation errors in NC tool paths generation. Shape errors are defined in terms of the average and standard deviation of differences between an original model and a produced part. Proposed algorithms determine the locations of sampling points by analyzing curvature distribution of a given surface. Based on the curvature distribution, a surface area is divided into several sub-areas. In each sub-area, sampling points are located as further as possible. The optimal number of sub-areas is determined by estimating the average of curvatures. Finally, the proposed method is applied to several surfaces that have shape errors for verification.

Key Words : Inspection(검사), coordinate Measuring Machine(3 차원 측정기), sampling(샘플링), freeform surface(자유 곡면), curvature-based(곡률 기반)

1. 서론

제품 검사 작업은 생산품의 품질 관리 및 생산 공정 관리를 위한 중요한 작업 가운데 하나이다. 제품의 외관 형상에 대한 검사에는 CMM (Coordinate Measuring Machine)이 주로 많이 사용되어져 왔다. CMM은 제품표면과의 물리적 접촉을 통해 데이터를 획득하므로 광학식 측정 장비에 비해 상대적으로 측정 속도를 가지는 반면 측정 데이터의 정밀도는 매우 우수하다. CMM의 느린 측정 속도로 인해서, 곡면 특성을 통계적으로 잘 보여줄 수 있는 영역에 소수의 측정 데이터를 얻는 것이 일반적이다. 따라서 몇 개의 점을 측정해야 하며, 어느 곳을 측정해야 하는지에 대한 문제가 중요하게 다루어져 왔다.

사각형 평면을 측정하기 위한 최적 측정점의 결정을 위해 Hammersley point를 이용한 방법이 제안

되었으며[1,2], 원형 평면, 반구면(hemi-sphere), 원추 곡면 등의 측정에 있어서 Hammersley 방식을 응용한 기법이 연구되었다[3]. Fig. 1은 평면에 대한 Hammersley point를 보여주고 있다.

자유곡면은 앞에서 언급한 primitive 곡면과 같은 정형화된 형상이 아니므로 위의 기법들을 사용하기 어렵다. 자유 곡면 검사를 위해 일반적으로 측정점들로부터 보간 곡면을 생성하고 부가적인 측정을 통해 실제 제품의 면과 보간 곡면과의 오차 허용치 이내에 들어갈 때까지 측정점 증가 및 곡면 보간을 반복하는 방식이 많이 연구되었다[4]. 그러나 이러한 방식은 대부분의 경우 매우 많은 측정점을 필요로 하게 되며, 전수 검사 등과 같이 검사 시간이 매우 중요한 곳에서는 효율성이 낮다.

본 연구에서는 보간 곡면을 생성하지 않고 곡면을 검사하기 위한 최적 측정점의 위치 결정 알고리즘을 개발하였다. 측정점의 개수는 통계적 기법을

이용해서 결정되며, 가공에러와 곡면의 곡률과의 상관관계를 통해 에러를 가장 잘 표현할 수 있는 곳에서 측정 데이터를 얻게 된다.

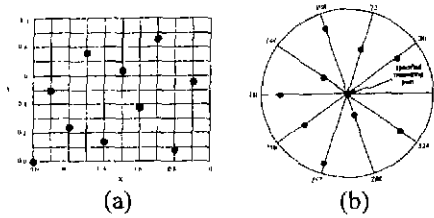


Fig. 1 Hammersley points (a) Rectangular plane (b) Circular plane

2. 측정점 결정 알고리즘

2.1 곡률과 형상오차의 관계

설계 데이터와 가공된 제품간에는 필연적으로 형상 오차가 발생하기 마련이다. 이러한 형상 오차는 가공 제품의 면과 설계 데이터상의 면과의 차이에 대한 분포로 나타낼 수 있다. 실제로 중요한 값은 형상 오차의 평균과 표준편차인데, 이러한 데이터를 바탕으로 가공된 제품의 형상 오차 수준을 파악할 수 있을 뿐만 아니라, 품질 관리 기법을 이용해 가공 공정 자체의 이상 유무도 파악할 수 있기 때문이다.

제품 개발 단계에서 많이 사용되는 제품 제작 기술로 NC 가공과 패속 조형(Rapid prototyping)을 들 수 있다. NC 가공의 경우 자유곡면을 가공하더라도 실제로 공구는 직선 경로를 따라 움직이게 되므로 공구 경로는 자유곡면에 대한 직선 보간으로 이루어진다. 이에 따라 오차가 발생하는데 Fig. 2(a)에서 보이는 바와 같이 오차는 곡률이 큰 곳일수록 더 커지게 된다[5].

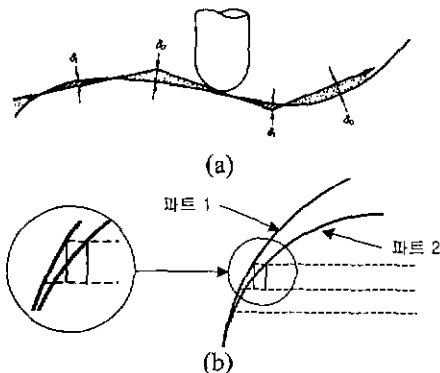


Fig. 2 Relationship between the shape error and the curvature (a) NC machining[5] (b) Rapid prototyping

패속 조형에서는 제작하고자 하는 제품을 얇은

층으로 나누어서 제작하는 기술이다. 따라서 계단 효과와 같은 에러가 발생할 수 밖에 없는데 Fig. 2(b)와 같이 곡률이 큰 곳에서 계단 효과는 더 커지게 된다. 따라서 이러한 에러를 줄이기 위해 층의 두께를 조절하는 adaptive slicing 기법이 제안되기도 하였다[6].

이와 같이 가공 에러는 제품의 곡률에 큰 영향을 받는다. 따라서 제품 검사시에는 오차의 평균과 표준편차를 잘 추정하기 위하여 곡률이 큰(곡률 반경이 작은) 영역이 적절히 포함되도록 측정점을 결정하여야 한다.

2.2 Overall procedure

측정점 결정 알고리즘의 절차는 Fig. 3 과 같다. 먼저 가설 검증에 기반한 통계적 기법을 통해 측정해야 할 점의 개수를 결정한다. 결정된 개수의 측정점을 결정하기 위해 먼저 곡면에 대한 곡률 분포를 계산한다. 구해진 곡률은 동일한 확률값을 가지는 구간으로 구분하는데, 이때 구간의 개수가 결과에 영향을 주게 되며, 이는 곡률 추정 기법을 이용하여 결정한다. 마지막으로 각 곡률 구간에 대해 동일 개수의 측정점을 할당하여 에너지 함수를 이용하여 되도록 멀리 분포하도록 측정점을 배치한다. 각 단계의 자세한 설명은 아래 각 절에 기술되어 있다.

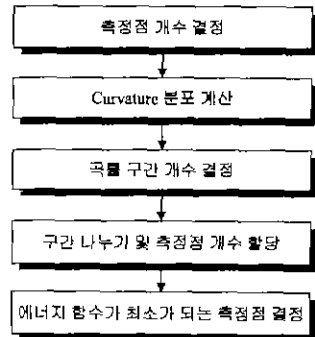


Fig. 3 Overall procedure

2.3 측정점 개수 결정

측정점의 개수는 통계적 가설 검증 기법 근거한 방법으로 결정할 수 있다. 이에 대한 연구는 기존에 수행된 바가 있으며, 본 연구에서는 이를 이용하였다[7].

검사 작업에서 허용 가능한 오차의 표준편차를 σ_c , 오차의 추정 표준편차를 σ_0 라고 하면, $H_0: \sigma = \sigma_0, H_1: \sigma = \sigma_c$ 이라는 가설 검증에서 type-I, type-II 에러를 각각 α, β 라 정하면 필요로 하는 sample 의 개수 N_p 는 아래와 같이 정해진다.

$$N_p = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_0 t_{1-\alpha} - \sigma_c t_{1-\beta}}{\sigma_c - \sigma_0} \right)^2$$

2.4 곡률 분포 계산 및 최적 곡률 구간 개수 결정

곡률 분포를 계산하기 위해 곡면 상의 많은 점들에서 곡률을 계산한다. 구현의 편의를 위해서 곡률 분포 계산에 이용되는 점들 가운데서 최종 측정점을 고르는 방식을 취한다.

평균을 잘 추정하기 위해서는 곡률을 몇 개의 구간으로 나누어야 하는데, 이 때 몇 개의 구간으로 나눌 것인가가 추정 정확도에 영향을 준다. 따라서 본 연구에서는 곡률 평균 추정을 통해 곡률 구간 개수를 결정하도록 하였다. 곡률과 형상 오차가 상관관계를 가진다면 곡률 분포를 가장 잘 추정할 수 있는 측정점들이 오차의 특성 또한 잘 추정할 수 있을 것이다. 따라서 구간의 개수를 변화시켜가면서 임시로 측정점들을 결정하고 이를 가지고 곡률을 추정하여 참값과의 오차가 가장 작아지는 구간 개수를 최종 곡률 구간 개수로 정한다.

2.5 곡률 구간 결정

결정된 곡률 구간 개수에 따라 전체 곡률을 나눈다. 이 때 각 곡률구간에 대한 확률값은 동일하게 유지되도록 해야 한다. 이렇게 구간에 대한 확률값이 동일하게 구간을 설정하는 이유는 곡률 전 구간에 대해 균일하게 점들을 분포시킴으로써 평균 추정에 더 좋은 결과를 얻기 위해서이다. 즉, 아래에서 $P(c)$ 가 곡률의 확률 분포를 나타낸다면, 각 곡률 구간에 대해 아래의 관계를 만족해야 한다(Fig. 4).

$$\int_{c_j}^{c_{j+1}} P(c)dc = \int_{c_1}^{c_2} P(c)dc$$

여기서, c_1 는 곡률 구간의 끝점을 나타낸다. 즉, $c_0 < \dots < c_1 < c_{j+1} < \dots < c_j < c_{j+1} < \dots < c_{N_c}$ 이다.

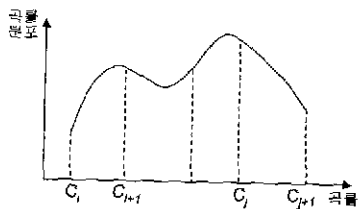


Fig. 4 Curvature distribution

2.6 각 곡률 구간에 대해 측정 점 배치

곡률 구간이 정해진 뒤에는 각 곡률 구간에 N_p/N_c 개 만큼 측정점을 할당한다. 여기서 N_p 는 전체 측정점의 개수이고, N_c 는 곡률 구간의 개수이다. 각 곡률 구간에 대해 계산된 개수만큼의 측정점의

위치를 결정할 때에는 각 측정점들은 서로 최대한 멀리 떨어져 있도록 위치시킨다. 점들을 최대한 넓게 분포시킴으로써 표준 편차 추정시에 오차가 더 줄어들게 된다. 측정점들을 넓게 분포시키기 위한 기준으로써 에너지 함수가 사용되는데, 두 점에 대한 에너지 함수는 parameter 공간 상에서 두 점간의 거리 제곱의 역수로 표현된다. 이때 최종 측정점들은 에너지의 합이 최소가 되는 점들로서 결정된다. 즉, 아래 조건을 만족하는 측정점이 결정된다.

$$\min \sum_{each\ i, j} E(p_i, p_j)$$

$$E(p_i, p_j) = \frac{1}{dist(p_i, p_j)^2}$$

3. 적용 예

3.1 에러를 포함하는 실험 데이터 생성

제안된 알고리즘을 검증하기 위하여 오차를 포함하는 실험 데이터를 생성하였다. 원하는 만큼의 오차를 가지는 실제 가공 파트를 제작하기란 어려운 일이므로 이와 비슷한 특성을 지니는 실험 데이터를 polygonization 을 이용해서 생성하였다. 곡면을 polygonize 할 때에는 NC 가공이나 쾌속 조형과 같이 곡률이 큰 영역에서는 곡률이 작은 곳에 비해 큰 deviation 이 발생한다. 즉, 가공데이터의 오차 성향과 비슷한 특성을 가지는 것이다. 본 실험에서는 쾌속 조형의 입력 데이터인 STL 파일을 만들으로써 실험데이터를 생성하였다. 아래 Fig. 5는 이렇게 생성된 실험용 모델을 보여주고 있다.

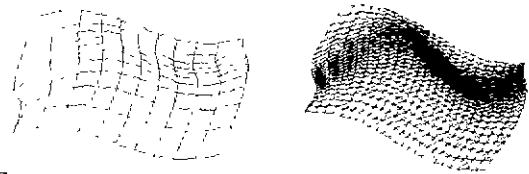


Fig. 5 Generation of simulation data (a) surface model (b) polygonized model

3.2 측정점 적용 결과

본 연구에서 제안된 알고리즘에 의해 결정된 측정점의 위치가 Fig. 6에 보여지고 있다. 측정 위치의 타당성을 보이기 위해 측정점 개수 결정 모델은 추가 하지 않고 측정점의 개수를 50 개로 고정하였다. 결정된 측정점에서의 모의 측정 데이터와 원래 자유곡면과의 차이를 구하여 이로부터 평균, 표준 편차, 절대값의 표준편차, 절대값의 평균, 최대 및 최소값을 구하여 다른 샘플링 방법과 비교하였다. 비교 대상이 된 알고리즘은 random sampling, uniform sampling 이다. 실험결과 각 통계값에 대해

여 제안된 알고리즘이 더 나은 결과를 보였음을 알 수 있다.

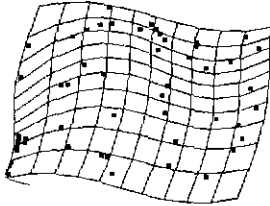


Fig. 6 Sampling points determined by proposed algorithms

| | mean | std | Abs mean | Abs std | min | max |
|-----------------|--------|-------|----------|---------|---------|--------|
| Noisy data | -22.26 | 68.96 | 62.17 | 37.24 | -146.22 | 211.05 |
| Random | -32.49 | 78.90 | 76.05 | 37.43 | -129.02 | 159.17 |
| Uniform | -31.61 | 50.95 | 70.33 | 59.85 | -125.07 | 83.37 |
| Curvature-based | -21.58 | 70.42 | 61.94 | 38.97 | -139.04 | 179.11 |

Table 1. Comparison of experimental results

4. 결론

본 연구에서는 CMM 을 이용한 자유곡면 검사에서 측정점을 결정하는 알고리즘을 제안하였다. 곡면 생성 기반의 검사에 비해 측정 점수를 줄이기 위하여 곡률 분석을 통해 가공면의 오차 경향을 잘 파악할 수 있도록 측정점을 결정하였으며 모의 실험을 통해 제안된 알고리즘의 효율성을 보였다. 제안된 알고리즘을 이용함으로써 자유곡면 검사의 시간을 단축시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Woo, T. C and Liang R., "Dimensional measurement of surfaces and their sampling", *Computer-Aided Design*, Vol. 25, No. 4, pp. 233-239, 1993
2. Woo, T. C et al. "Efficient Sampling for Surface Measurements", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 14, No. 5, pp. 345-354, 1995
3. Lee, G, Mou, J. and Shen Y., "Sampling Strategy Design for Dimensional Measurement of Geometric Features using Coordinate Measuring Machine", *Int. J. of Machine Tools Manufacturing*, Vol. 37, No. 7, pp. 917-934, 1997
4. Lin, Z. and Liu, Q. Y., "Algorithm for the normal direction error analysis of surface mesh grids for searching measuring points", *Int. J. Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 14, No. 4, pp. 335-344, 2000

5. 최병규, 전차수, 유우식, 편영식, CAD/CAM 시스템과 CNC 절삭가공, 희중당, 1996
6. Mani, K., Kulkarni, P. and Dutta, D., "Region-based adaptive slicing", Vol. 31, No. 5, pp. 317-333, 1999
7. Huang, X. and Gu, P., "CAD-model based inspection of sculptured surfaces with datums", *Int. J. Production Research*, Vol. 36, No. 5, pp. 1351-1367, 1998