

측정된 점데이터 기반 삼각형망 곡면 메쉬 모델의 국부적 자동 수정

우혁제*, 이종대**, 이관행***

Automatic Local Update of Triangular Mesh Models Based on Measurement Point Clouds

Woo, Hyuckje*, Lee, Jong-dae** and Lee, Kwan H.***

ABSTRACT

Design changes for an original surface model are frequently required in a manufacturing area: for example, when the physical parts are modified or when the parts are partially manufactured from analogous shapes. In this case, an efficient 3D model updating method by locally adding scan data for the modified area is highly desirable. For this purpose, this paper presents a new procedure to update an initial model that is composed of combinatorial triangular facets based on a set of locally added point data. The initial surface model is first created from the initial point set by Tight Cocone, which is a water-tight surface reconstructor; and then the point cloud data for the updates is locally added onto the initial model maintaining the same coordinate system. In order to update the initial model, the special region on the initial surface that needs to be updated is recognized through the detection of the overlapping area between the initial model and the boundary of the newly added point cloud. After that, the initial surface model is eventually updated to the final output by replacing the recognized region with the newly added point cloud. The proposed method has been implemented and tested with several examples. This algorithm will be practically useful to modify the surface model with physical part changes and free-form surface design.

Key words : Surface reconstruction(곡면 복원), 3D model update(3차원 모델 변형), Reverse engineering(전산 역설계), Measurement data(측정 데이터), Rapid product development(빠른제품개발)

1. 서 론

최근 다양한 비접촉식 3차원 측정 장비의 발달로 제조, 컴퓨터 그래픽, 제품 디자인 등의 많은 분야에서 전산 역설계 기술이 다양하게 응용되고 있다. 전산 역설계 기술이란 실제 존재하는 제품을 측정하여 3차원 형상 모델을 복원하는 기술을 일컫는데, CAD 모델이 존재하지 않는 제품 또는 부품의 경우 측정을 통한 설계 데이터 획득이 가능하도록 해주며, 디자이너가 생성한 Clay 형상의 곡면 모델 생성, 분화체의 3차원 모델 형상 모델링, 컴퓨터 애니메이션, 의료 분

야에서의 인공관절 또는 인공 보철물 설계 등 많은 분야에서 폭넓게 활용되고 있다^[1,2]. 일반적으로 전산 역설계 기술은 측정, 여러 방향에서 측정된 데이터의 레지스트레이션, 노이즈 제거 및 오토링, 곡면 모델 생성 등의 절차를 거쳐 시작품을 제작하게 되는데 필요에 따라 소비자의 요구, 기능성 향상 등의 이유로 시작품에 대한 디자인 변경이 종종 발생하기도 한다. 이러한 경우, 시작품의 변경에 맞추어 3차원 형상 모델에 대한 변경도 함께 이루어져야 하는데 이를 위해 재측정, 수작업으로의 재처리, 모델 재생성 등의 추가적인 많은 노력들이 요구된다^[3].

본 연구에서는 시작품 형상이 초기 3차원 형상 모델과 달리 부분적으로 변경된 경우, 변형된 특정 영역만 재측정을 하여 보다 효율적으로 초기 3차원 형상 모델을 자동 업데이트하는 알고리즘을 개발하였다. 이러한 방법은 사용자의 특성에 맞도록 제품의 일부분

*교신저자, 정회원, 경기공업대학 정밀기계시스템과

**경기공업대학 정밀기계시스템과

***중신회원, 광주과학기술원 기전공학과

- 논문투고일: 2005. 10. 10

- 심사완료일: 2006. 07. 18

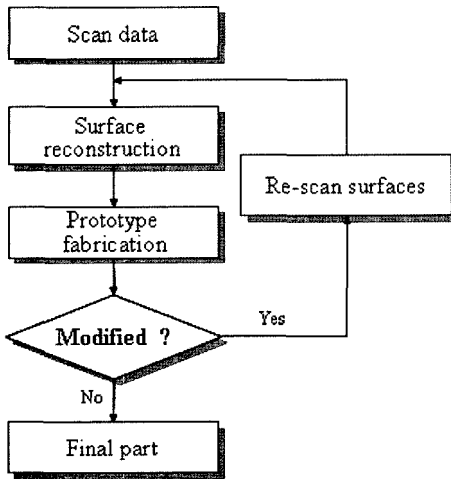


Fig. 1. Prototype modification in product development.

만 형상을 변화시켜야 할 경우, 소비자의 다양한 요구에 따른 유사 형상 파트를 가공할 경우에 매우 효율적으로 적용될 수 있다.

일반적으로 측정된 점데이터로부터 3차원 형상 모델을 생성하여 표현하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. NURBS 곡면과 같이 파라메트릭 곡면으로 생성하는 방법과 측정된 점데이터를 처리한 후 이웃하는 점들끼리 연결하여 삼각형망과 같이 메쉬를 생성하여 표현하는 방법이 있다^[45]. 일반적으로 파라메트릭 곡면으로 표현할 경우 정밀도가 높은 고품질의 곡면생성이 가능하나 커브 생성, 영역화 등 많은 전문적인 수작업과 시간을 필요로 하기 때문에 최근 여러 응용분야에서 삼각형망 기법을 이용한 곡면 생성 방법도 많이 사용되고 있다. 본 연구에서도 보다 빠르고 자동으로 모델을 생성 및 변형하기 위해 삼각형망 모델을 대상으로 한 알고리즘을 개발하였다. 이러한 삼각형망 모델은 아주 복잡한 형상의 자유 곡면들로 이루어진 형상이나 정규화되어 있지 않은 측정 점데이터들에 유용하게 적용될 수 있으며 생성 이후 필요시 파라메트릭 곡면 생성을 위한 기존 데이터로 활용될 수 있고, 폐쇄조형, NC가공 등과 같은 제조기술에도 직접적으로 응용될 수 있다.

2. 기존 연구 고찰

최근 수년간 많은 연구자들이 측정 점데이터로부터 3차원 곡면 모델 복원에 관한 연구와 생성된 3차원 형상 모델을 변형하거나 수정하는 방법에 관한 연구를 수행해 왔다^[46]. 하지만 대부분의 연구가 3차원 형상

모델을 직접적으로 수정하는 방법에 관한 내용들이고 변형된 형상을 위한 추가적인 측정 데이터를 기반으로 한 연구는 매우 미비한 편이다. 더욱이 기존 대부분의 모델 변형에 관한 연구는 조정점 및 knot 변경 기법을 이용한 파라메트릭 곡면에 대해서만 주로 다루고 있다^[10-12]. 본 연구와 관련된 형상 변형에 관련된 정보를 추가하여 수행한 3차원 곡면 모델의 변형에 관한 몇몇 연구내용들을 살펴보면 다음과 같다.

T. Reuding과 M. Sreckovic^[13]은 존재하는 NURBS 곡면들을 크레이 모델의 측정 데이터 또는 다른 NURB 커브와 곡면과 같은 형상 변형인사를 도입하여 그에 따른 기존 NURBS 곡면을 변형시키는 방법에 관한 연구를 수행하였다. 형상 변형인사는 먼저 점들로 모두 변형하여 그 점들을 기존 곡면에 수직방향으로 투영시킨 후 해당되는 점을 대체한 후 최소사승법으로 곡면을 재생성하는 방법을 취했다. 무엇보다도 실제 존재하는 파트와 컴퓨터상에 존재하는 3차원 모델과의 관계를 부여하는데 의미를 두었고 전체 형상과 비교하여 변화되어야 할 영역이 상대적으로 작다고 가정하였으며 복잡한 형상이 존재하지 않는다는 가정하에 수직 투영방법을 사용하였다. Ma와 He^[14]는 B-spline과 NURBS 곡면이 존재할 때 변화가 되어야 할 부분에 대해 변형될 형상으로 점데이터를 추가하여 기존 곡면이 국부적으로 변형되도록 하는 알고리즘을 개발하였다. 사용된 방법으로는 추가된 점들을 기존 곡면 상에 투영하여 변경되어야 할 영역과 그에 해당되는 조정점들을 찾아내어 국부적 변형 방법을 제안하였다. Bruijic 등^[15]은 선형 최소사승법으로 곡면을 업데이트 하는 방법을 개발하였는데 점데이터의 부족한 경우 발생하는 ill-condition과 랭크 부족(rank deficiency) 문제를 해결하기 위해 변형된 부분에만 국한되지 않고 전체 곡면을 한번에 다시 근사화하는 방법을 시도하였다. Biermann 등^[16]은 기존에 존재하는 3차원 형상 모델에 다른 형상들을 추가하기 위해 영역을 자르고 붙이는 cut-and-paste 수정 방법을 제안하였는데, 본 방법은 사용자가 수동으로 변화되어야 할 부분을 선택하고 분리하여 다른 모델로 대체하고 재파라미터화하는 인터랙티브한 방법을 사용하였다. 이 밖에 Biermann 등^[17]은 기존 삼각형망 모델을 변형시키기 위해 필요한 불리안 작업 방법에 대한 연구를 수행하였는데 하나의 곡면 위에 부분적으로 안쪽으로 깎여야 하는 영역과 바깥 쪽으로 나와야 하는 영역이 동시에 존재하는 경우 새로운 알고리즘 개발이 필요하다. 이러한 연구들과 같이 기존 곡면을 추가된 다른 형상 정보들에 기반하여 변형시키고자 하는 연

구가 몇몇 이루어졌으나 추가된 측정 데이터를 바탕으로 한 초기 3차원 삼각형망 모델을 변형하려는 연구는 매우 미비하다. 본 연구에서는 새롭게 추가된 측정 점데이터가 주어졌을 때 기존 3차원 삼각형망 곡면 모델을 그 변경된 형상에 맞게 변형되도록 하는 새로운 방법을 제안하였으며 초기 3차원 삼각형망 모델 생성을 위해 tight cocone^[7]이란 곡면 복원 알고리즘을 사용하였다. 제안된 방법은 제작된 시작품이 변경된 경우 측정 시간을 효과적으로 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 실제 파트를 기반으로 한 변형과 자유 곡면 형상 모델 변형에 매우 효율적 적용이 가능하다.

3. 초기 곡면 모델 생성

본 연구에서는 초기 곡면 모델 생성을 위해 초기 점데이터는 경계(boundary)가 존재하지 않는 닫힌 곡면 SCR^3 에서 추출된 점들로 구성되어 있다고 가정한다. 초기 3차원 모델은 점데이터로부터의 곡면 복원 알고리즘인 tight cocone 기법을 적용하여 생성되는데 다음 절에 이에 필요한 기본 내용에 대해 간단히 기술하였다.

3.1 기초 용어 설명

점데이터로부터 3차원 곡면 모델을 복원하기 위해서는 곡면 S 의 특징 형상 등의 모든 곡면에 대한 정보를 표현하기에 충분한 점들로 구성이 되어야 한다. 이를 위해서 tight cocone은 ϵ -샘플링 이론을 바탕으로 수행되는데 ϵ -샘플링의 기본 개념은 다음과 같다. 점데이터 P 를 곡면 S 로부터 샘플링된 점이라 하였을 때, 점데이터 샘플링 비율은 곡면 S 의 미디얼 액시스 M 과 곡면까지의 거리인 국부적 형상 크기(local feature size) $f(x)$ 를 이용하여 표현되며, $x \in S$ 일 때 $f(x)$ 는 x 에서 미디얼 액시스 M 까지의 거리로 정의될 수 있다^[19,20]. 여기서 미디얼 액시스 M 이란 곡면 S 가 존재할 때 곡면 S 와 적어도 두 점 이상이 접하는 모든 미디얼 볼 B 들의 중심점들의 집합으로 정의되며, 모든 점 p 들 간의 거리가 국부적 형상 크기 $f(x)$ 와 일정 비율 ϵ 을 곱한 $\epsilon f(p)$ 값보다 작은 값을 유지한다면 S 의 ϵ -샘플링 조건(보통 $\epsilon \leq 0.4$)^[18,19]을 만족한다고 할 수 있다. 이렇게 ϵ -샘플링 조건을 만족하는 점데이터는 곡면 S 를 표현하기에 충분한 밀도를 가진다고 볼 수 있으며, 이러한 점데이터로부터 보로노이 다이어그램, V_p 를 계산했을 때 이와 dual 관계에 있는 Delaunay 삼각형망은 D_p 로 정의되고, V_p 의 각 보로노이 cell은 Fig. 2와 같이 점 p 의 법선 방향으로 긴 형

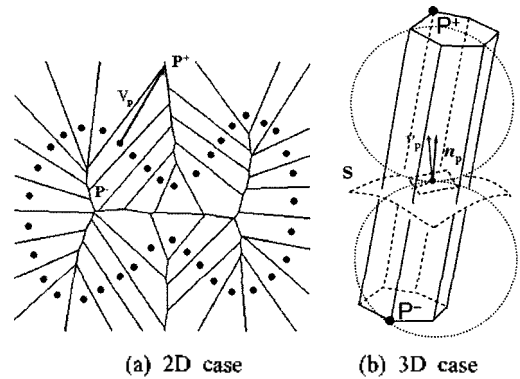


Fig. 2. Pole P^* and pole vector V_p in D_p .

태로 이루어지게 된다.

이때, 점 P 로부터 해당되는 cell에 포함되는 가장 먼 보로노이 꼭지점 p^* 를 폴(pole)이라 정의하며, p 와 p^* 가 이루는 벡터 $v_p(V_p = P^* - P)$ 를 폴 벡터(pole vector)라 정의한다. 이 폴 벡터(pole vector)는 ϵ -샘플링 조건을 만족할 경우 폴 벡터는 곡면의 노말 n_p 에 근사다고 할 수 있다. 따라서 이러한 폴 벡터를 안다면 곡면의 법선 정보를 추측할 수 있어 이를 이용한 곡면 모델 복원이 가능하다.

3.2 점데이터로부터의 곡면 모델 복원

주어진 점데이터로부터 계산된 Vorono이 다이어그램을 통해 각 점 p 에 대한 폴벡터 V_p 를 얻게 되면 Fig. 3과 같이 p 와 V_p 를 중심으로 $3\pi/8(67.5^\circ)$ 보다 작은 양쪽 두 콘과 같은 공간 영역을 생각할 수 있다.

이러한 영역을 제외한 공간을 cocone(complementary cone)이라 하고 정의하고^[18] 생성되어야 할 곡면 모델은 이 영역 안에 존재하게 되는 점을 착안하여 곡면 복원에 활용할 수 있다. 본 연구에서 사용된 Tight

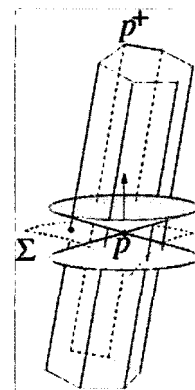


Fig. 3. Definition of cocone.

cocone 알고리즘은 이러한 cocone 개념을 이용하여 홀이 존재하지 않는 밀폐된 형상(water-tight)의 최종 모델을 생성하게 되는데 다음과 같은 절차를 따라 수행된다. 먼저 입력된 점데이터로부터 V_p 와 D_p 를 계산하고 cocone과 교차하는 보로노이 모서리들과 dual 관계에 있는 Delaunay 삼각형면들을 곡면 생성에 필요한 후보면들로 추출한다.

이렇게 추출된 면들로부터 다양체(manifold)에 해당되는 면들만 추출하면 1차적인 원시 곡면(preliminary surface)을 얻을 수 있다. 이 원시 곡면은 동형적(homomorphic)이고, 생성하고자 하는 최종 곡면 S 와 거의 일치하게 되나 점데이터가 충분치 않은 곳에서는 홀(hole)들이 발생할 수 있다. 따라서 이러한 홀들을 모두 없애기 위해 원시곡면을 이용하여 D_p 로부터 최종 곡면을 재추출 과정을 거치게 된다. D_p 에 속한 사면체 중에 원시곡면을 기준으로 모델의 외부 영역에 속한 사면체들을 모두 제거하면 모델 내부에 속한 사면체들만 남게 되는데 모든 사면체를 하나의 집합체(union)로 생각하고 이로부터 바운더리에 해당되는 면들만 추출하면 최종적으로 삼각형망들로 이루어진 완벽한 곡면 모델이 얻어진다. Fig. 4는 Tight cocone 알고리즘 구현을 통해 얻어진 점데이터로부터 3차원 형상 모델 복원 결과를 보여주고 있다.

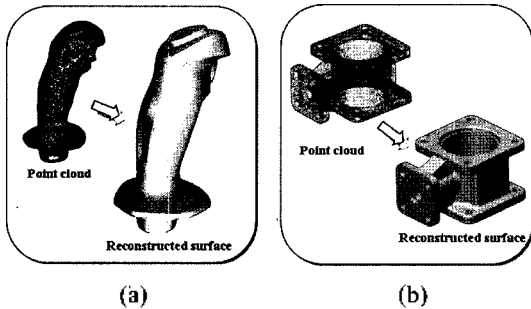


Fig. 4. Initial surface reconstruction by Tight-cocone.

4. 초기 곡면 모델의 업데이트

4.1 곡면 업데이트의 전체 공정

일단 초기 모델이 완성이 되어 시작품이 제작되었다고 하더라도 소비자의 요구, 디자인 수정 등에 의해 시작품 변형이 발생할 경우 초기 설계 모델에 대한 업데이트가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 이를 위하여 초기 곡면 모델이 생성된 후에 재측정된 점데이터가 변형되어 추가된 경우 초기 모델을 자동으로 업데이트 하는 알고리즘을 개발하였다. 초기 곡면

모델 업데이트를 위한 전체적인 절차를 Fig. 5에 정리하였고 본 알고리즘 수행을 위해 추가된 점데이터는 기존 모델의 해당 부분에 이미 레지스트레이션이 되었다고 가정하였고, 비접촉식 레이저 스캐너의 경우 변형부분만 아주 정확하게 재측정하기 어려운 점을 고려하여 경계부분에서는 기존 곡면과 일부 겹치게(overlapping)되어 측정된다고 가정하였다.

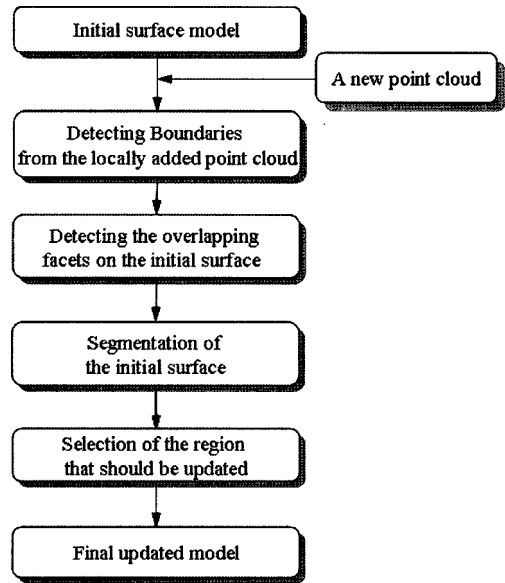


Fig. 5. Overall process for updating a surface.

4.2 점데이터의 경계 추출

추가된 점데이터의 경우 변형되어야 할 부분을 표현하고 있기 때문에 낯선 형상이 아니고 경계를 갖는 열린 형상에 해당되게 된다. 따라서 먼저 점데이터의 경계에 해당되는 점들을 추출하여 변형될 영역을 자동으로 찾게 되는데 입력된 점데이터로부터 경계를 찾기 위해서 cocone 개념을 이용한 경계점 추출 방법^[18]을 이용하였다. 일반적으로 경계에 해당되는 점에 해당된 보로노이 셀의 경우는 내부에 존재하는 점과 달리 셀 형태가 길고 두께가 얇게 된다.

이렇게 두께가 얇고 긴 셀의 경우 cocone은 거의 평평하게 되므로 반지름 조건과 노발 조건을 따져 바운더리에 해당되는 점들의 구분이 가능하다. Fig. 6은 곡면 위로 제한된 보로노이 다이어그램과 경계 점 및 모서리를 도시하고 있으며 이러한 경계에 해당되는 점들이 추출된 후에는 cocone 곡면으로부터 경계에 해당되는 모서리들도 쉽게 추출할 수 있다. Fig. 6은 본 방법을 사용하여 입력된 점데이터로부터 경계 부

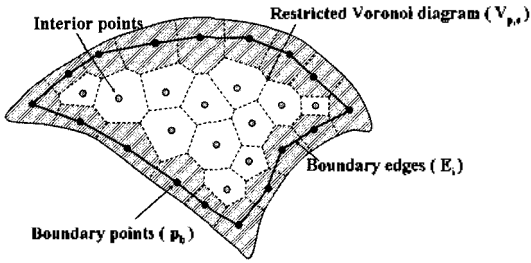


Fig. 6. Boundary points on the restricted VD.

분에 해당되는 점들과 모서리들을 추출한 결과를 보여주고 있다. 추출된 경계 모서리들은 하나씩 점검 절차(walking process)를 수행하여 모서리간 연결성을 점검한 후 닫힌 루프로 구성되어 모서리-list에 저장된다.

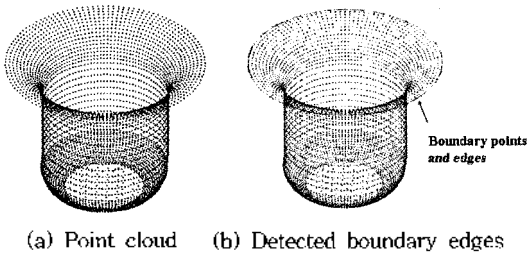


Fig. 7. Boundary detection from point clouds.

4.2 겹치는(overlapping) 면 검색

앞서 추가된 점데이터로부터 경계에 해당되는 점과 모서리들을 추출한 후 곡면 업데이트를 위해 추가된 점데이터의 경계와 초기 곡면 간의 겹치는 면들을 추출하게 된다. 실제적으로 초기 곡면이 삼각형망으로 선형보간 되어 구성되어 있으므로 추가된 점데이터의 경계가 초기 곡면 위에 정확하게 존재하지 않고 한 초기 곡면의 외부 또는 내부에 존재하게 된다. 따라서 겹치는 면들을 추출하기 위해 초기 곡면의 법선 방향으로의 투영을 통해 찾을 수 있는데 잘못된 곡면 상의

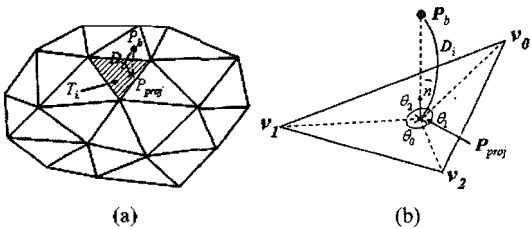


Fig. 8. Detecting overlapping facets.

로의 투영을 방지하기 위해 유클리디안(Euclidean) 거리 또한 함께 고려하여 다음 절차로 수행된다.

앞서 추출된 점데이터의 경계 모서리로부터 조밀한 간격으로 샘플링(sampling)된 임의의 한 점 P_b 가 주어졌을 때, Euclidean 거리를 계산하여 초기 곡면상의 겹치는 면에 해당될 수 있는 후보 삼각형면들 T_i 얻는다. 즉, P_b 에서 초기 곡면 모델의 꼭지점 중 가장 가까운 꼭지점을 찾으면 이 꼭지점을 포함하고 있는 삼각형면들 모두가 후보 삼각형 T_i 라 할 수 있다. 여기서 후보 삼각형면들 T_i 모두가 겹치는 면들로 사용될 수도 있으나 불필요한 삼각형 면들도 함께 포함되어 실제보다 폭이 넓은 경계를 생성하게 되므로 다음 단계로 후보 삼각형면들 중 P_b 에 해당되는 한 면을 추출하는 과정을 거친다. P_b 를 삼각형면 T_i 의 세 꼭지점을 지나는 평면상으로 투영된 점 P_{proj} 이 T_i 의 내부에 존재한다면 T_i 가 P_b 에 겹치게 된 면이라고 정의할 수 있으며 Fig. 8(a)은 이러한 방법을 통해 찾아진 겹치는 면 예를 보여주고 있다. 투영된 점 P_{proj} 은 식 (1~3)을 기저 구해질 수 있으며 최종적으로 Fig. 8(b)

$$\text{에서 } P_{proj} \text{와 } T_i \text{ 간에 } \sum_{i=0}^3 \theta_i = 2\pi \text{ 를 만족한다면 } T_i \text{ 는}$$

P_{proj} 의 겹치는 면으로 선택된다.

$$\bar{n} = \frac{v_1 v_0 \times v_2 v_0}{|v_1 v_0 \times v_2 v_0|} \tag{1}$$

$$\overline{p_b v_1} \cdot (-\bar{n}) = |p_b v_1| \cos \delta = D_i \tag{2}$$

여기서 δ 는 $\overline{p_b v_1}$ 와 \bar{n} 사이의 각도를 의미하며

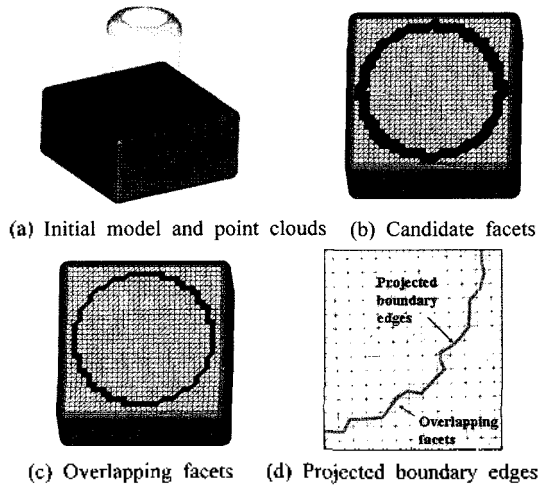


Fig. 9. An example of the overlapping facets.

$0 \leq \delta \leq \pi$ 의 범위를 갖는다.

$$P_{proj} = P_b - D_i \bar{n} \quad (3)$$

이러한 절차를 통해 새롭게 추가된 점데이터의 경계와 초기 곡면 모델상의 겹치는 면들이 추출되며 Fig. 9(a)는 초기 곡면 모델에 추가된 점데이터를 보여주고 있고 Fig. 9(b)와 Fig. 9(c)는 앞서 설명한 방법을 통해 계산된 후보면들과 후보면들 중 최종 선택된 겹치는 면들을 보여주고 있다.

4.2 곡면 모델 업데이트

앞에서 구한 겹치는 면들의 집합은 결국 초기 곡면에 있어서 업데이트가 이루어져야 할 영역을 나타내는 하나의 닫힌 루프를 형성하게 된다. 따라서 이러한 루프를 기준으로 초기 곡면에 대해 영역화(segmentation)가 수행될 수 있으며, 영역화를 위해 본 연구에서는 초기 곡면 모델 상에 있는 겹치는 면에 속하지 않은 임의의 삼각형면을 기초(seed)면으로 정하고 이로부터 영역화하는 region growing 방법⁽⁴⁾을 사용하였다. 기초(seed)면이 겹치는 면을 만나 더 이상 성장할 수 없을 때까지 이웃하는 면들과 결합하면서 영역화가 이루어지는데 이 과정으로 초기 모델은 그룹 R_k 로 나누어질 수 있다. 여기서 k 는 그룹 번호를 의미하며, 닫힌 겹치는 면의 루프 수가 m 이라 할 때 $k = m + 1$ 이 되게 된다. 이렇게 영역화를 통한 그루핑 작업이 이루어진 후 다음 단계로 업데이트가 필요한 영역에 대한 자동식별이 가능해야 하는데 이를 위해 본 연구에서는 각도 조건(angle condition)을 사용하였다. 일반적으로 비접촉식 3차원 측정기를 사용하여 변형되어진 부분만 추가 측정을 하게 될 경우 변형된 형상만 정확하게 따서 측정하기는 매우 어렵기 때문에 초기 곡면과 일정부분을 포함한 측정 데이터가 얻어지게 되어 결국 추가된 측정 데이터의 곡면은 초기 곡면 모델과는 부드러운 면으로 연결되게 된다. 따라서 추가된 점데이터의 경계에 있어서 추가 점데이터에 의한 곡면과 초기 곡면모델 중 변형되어야 하는 그룹에 속한 부분의 면과 연결되는 각도는 변형이 되지 않는 그룹에 속한 면과 이루어지는 각도보다 작은 값을 가지게 된다.

이와 같은 관점에서 변형부분 자동 판별을 위해 각도 조건을 설정하였다. Fig. 10은 여기서 사용된 각도 조건에 대한 내용을 단면을 통해 보여주고 있는데 업데이트가 되어야 할 대상인 R_1 에 대한 각도 θ_1 은 R_2 에 대한 각도 θ_2 보다 작은 값을 갖는다. 이러한 각도들을 계산하기 위해 Fig. 11에서 설명되고 있는 것과

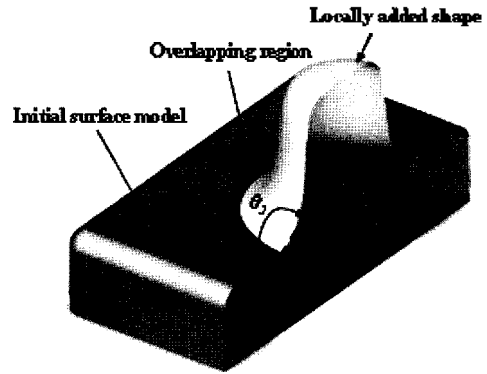


Fig. 10. An Example of the angle condition.

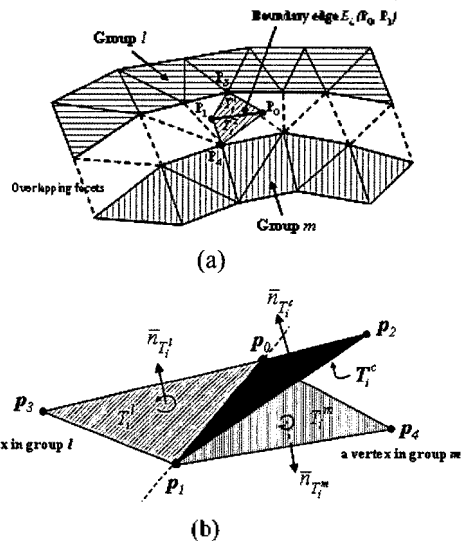


Fig. 11. An example of the overlapping facets.

같이 다음 절차들을 수행한다. 먼저 Fig. 11(a)와 같이 초기 모델은 추가된 점데이터의 경계를 기준으로 서로 다른 그룹으로 나누어졌기 때문에 경계 모서리들은 두 다른 영역사이에서 존재하는 겹치는 면들 위에 존재하게 되고 이 경계 모서리 E_i 의 두 꼭지점과 다른 두 영역에 존재하는 꼭지점 하나씩을 연결하여 구성되는 두 삼각형면들을 생각할 수 있다. 즉, 그룹 R_k 에 속한 한 꼭지점과 경계 모서리 E_i 로 연결된 삼각형 T_i^k 는 E_i 와 겹치는 면들의 꼭지점 중 E_i 의 중간점(mid-point)과 R_k 에 속하는 가장 가까운 점으로 구성된다. Fig. 11(a)의 경우 E_i 와 영역 l, m 의 가장 가까운 점들로 각각 구성된 삼각형면 T_i^l 과 T_i^m 의 예를 보여주고 있고, 이러한 영역별 삼각형들 T_i^k 와 추가된 점데이터로부터 cocone 방법을 통해 구성된 해당 삼각형 T_i^c 간의 각도 θ_i^k 는 삼각형 면들의 노말값을 이

용하여 식 (4-5)와 같이 유도될 수 있다.

$$\overline{n_{T_i^c}} = \frac{\overline{P_o P_1} \times \overline{P_o P_2}}{\left| \overline{P_o P_1} \times \overline{P_o P_2} \right|} \quad (4a)$$

$$\overline{n_{T_i^l}} = \frac{\overline{P_o P_3} \times \overline{P_o P_4}}{\left| \overline{P_o P_3} \times \overline{P_o P_4} \right|} \quad (4b)$$

$$\overline{n_{T_i^m}} = \frac{\overline{P_o P_4} \times \overline{P_o P_1}}{\left| \overline{P_o P_4} \times \overline{P_o P_1} \right|} \quad (4c)$$

위의 식 (4)를 통해 계산된 노말값을 이용하여 T_i^c 와 T_i^k 가 이루는 각도는 식 (5)를 통해 계산된다.

$$\theta_i^k = \angle T_i^c T_i^k = \cos^{-1} \left(\frac{\overline{n_{T_i^c}} \cdot (-\overline{n_{T_i^k}})}{\left| \overline{n_{T_i^c}} \right| \left| \overline{n_{T_i^k}} \right|} \right) \quad (5)$$

여기서 $i = \{0, \dots, n\}$, $k = \{0, \dots, m\}$ 이며 각도 θ_i^k 는 $0 \leq \theta_i^k \leq \pi$ 를 만족하며 n 은 경계 모서리의 수, m 영역화된 그룹의 수를 의미한다.

위 식들을 통해 계산된 각 면들이 이루는 각도를 계산할 수 있으며 이 값들의 평균값을 이용하여 최종 각도조건에 따라 변형되어야 할 영역이 선택되게 된다. 여기서 사용된 각도 조건은 다음과 같이 정의될 수 있다.

각도 조건(angle condition): θ_{mean}^k 를 θ_i^k 들의 평균값, 즉 $\theta_{mean}^k = \sum_{i=0}^n \theta_i^k / n$ 이라 정의하고, k 는 영역화된 그룹 인덱스, n 은 경계 모서리 수를 의미하며 그룹 m 과 l 에 해당하는 꼭지점들이 주어졌을 때 $\theta_{mean}^m < \theta_{mean}^l$ 을 만족하면 그룹 m 에 해당하는 꼭지점들을 선택한다.

이러한 정의된 각도 조건을 통해 초기 곡면 모델 중 업데이트가 되어야 할 부분에 해당하는 꼭지점들이 선택되고 선택된 꼭지점들은 초기 생성된 Delaunay 삼각형 망에서 삭제되게 된다. 그 후 새롭게 추가된 점데이터가 대신 현재 구성되어 있는 Delaunay 삼각형 망에 삽입되어 최종적으로 앞서 설명한 Tight cocone 방법을 통해 최종 모델로 업데이트 되게 된다.

5. 실험 결과

제한된 알고리즘은 Visual C++을 이용하여 구현되

었고, Tight Cocone 알고리즘 구현을 위한 보로노이 다이어그램 계산 및 Delaunay 삼각형 망 계산을 위해서는 CGAL(Computational Geometry Algorithms Library)이 사용되었다. 첫 번째 예제로 단순한 L-자 형상의 모델 일부분에 붙들 튀어나온 점데이터가 추가되었는데 Fig. 12(a)는 Tight Cocone으로 생성된 초기 모델에 점데이터가 새롭게 추가된 형상을 보여 주고 있다. 이렇게 추가된 점데이터로부터 경계점을 추출하고 이를 통해 기존 모델에서의 겹치는 면들을 추출하여 Fig. 12(b)와 Fig. 12(c) 같이 영역화 과정

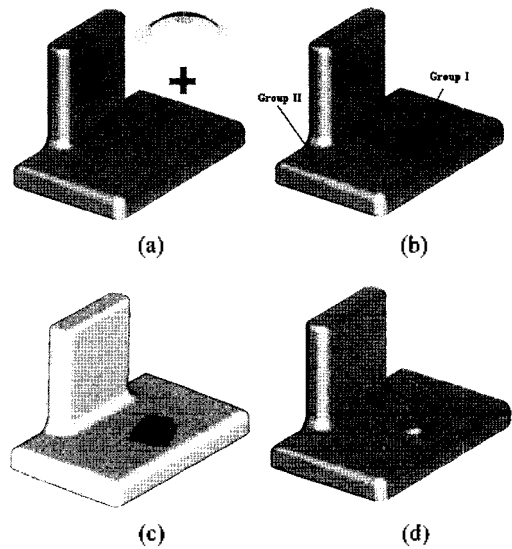


Fig. 12. An example of a test block model.

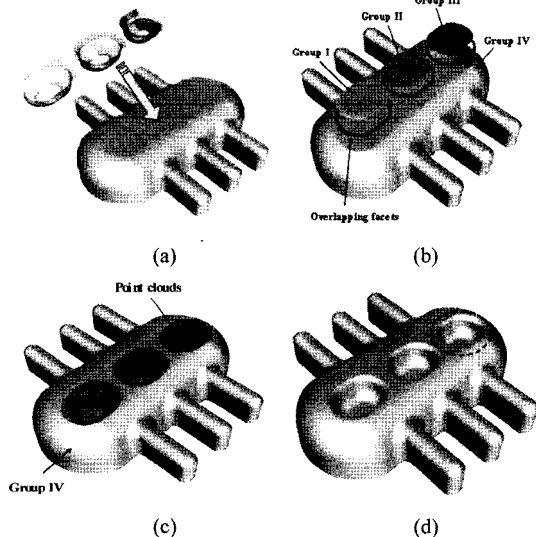


Fig. 13. An example of an air-bag model.

을 거쳐게 된다. 그런 후에 앞서 제안된 각도 조건에 의해 업데이트가 이루어져야 하는 부분이 자동 선택 되는데 본 형상의 경우 그룹(Group) I에 해당되는 평균 각도는 3.29도, 그룹 II의 경우 176.86도로 그룹 I에 해당되는 꼭지점들이 최종 업데이트 되어야 하는 영역으로 선택되었다. 본 과정을 통해 업데이트된 최종 형상은 Fig. 12(d)에서 보여지고 있다.

두 번째 예제로 Fig. 13(a)와 같이 에어백 형상에 대해 세 부분 영역으로 나뉜진 음각 형태의 점데이터군이 추가되었을 경우에 대해 본 알고리즘을 적용한 결과를 보여주고 있으며 Fig. 13(b)의 경우는 Fig. 13(a)에서 추가된 점데이터의 경계점 검색 및 영역화를 통해 구분된 그룹들을 보여주고 있다. 본 예제 모델의 경우 총 4가지 영역으로 나누어지게 되며 추가된 각각의 점데이터군에 대해 각각 각도조건 계산을 통해 최종 변형이 이루어져야 할 부분이 선택되게 된다. Fig. 13(c)는 선택된 영역의 꼭지점들이 추가된 점데이터로 대체된 결과를 보여주고 있으며 이렇게 자동 검색을 통해 새로 구성된 데이터는 Delaunay 삼각형망의 재계산에 적용되고, 초기 형상이 Fig. 13(d)와 같이 최종적으로 업데이트 되게 된다.

Fig. 14의 경우 조이스틱 모델에 대해 추가된 점데이터를 통해 자동으로 변형된 예를 보여주고 있다. Fig. 14(a)(c)와 같은 초기 조이스틱 형상 모델에 대해

서로 각각 다른 형태의 점데이터가 추가되었을 때 제시된 알고리즘을 통해 각각의 형상에 맞도록 효율적 자동 국부 업데이트되어 Fig. 14(b)(d)와 같은 각각의 최종 형상 모델들을 얻을 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 추가로 얻어진 점데이터를 기반으로 한 초기 형상 모델이 자동으로 국부 변형이 이루어지도록 하는 새로운 알고리즘을 제안하였다. 추가된 점데이터 기반으로 초기 형상 모델을 업데이트하기 위해 점데이터의 경계점 검색, 영역화, 변형되어야 할 대상의 자동 선택 알고리즘들을 개발하였고, 점데이터로부터의 초기 모델 복원, 최종 모델 업데이트를 위해서는 Delaunay 계산법을 기반으로한 Tight Cocone 알고리즘을 응용하였다. 본 제안된 알고리즘은 측정을 통해 실제 존재하는 파트의 형상 곡면 모델을 복원하였으나 실제 존재하는 파트의 일부분이 수정된 경우, 파트를 전부 다시 스캔하거나 형상모델 전체를 다시 만들지 않고 수정된 일부분만 측정 변형하는데 효율적으로 적용될 수 있으며 초기 모델로부터 다양한 사용자의 요구에 맞도록 신속하게 변형해야 하는 경우나 실제 모델을 기반으로 한 자유곡면 형상 모델링에 매우 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Varady, T., Martin, R. and Cox, J., "Reverse Engineering of Geometric Models an Introduction", *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 255-268, 1997.
2. Tai, C. and Huang, M., "The Processing of Data Points basing on Design Intent in Reverse Engineering", *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, Vol. 40, pp. 1913-1927, 2000.
3. 우혁제, 석태훈, 류계현, 이관행, "역엔지니어링을 위한 측정 점 데이터 처리에 관한 연구", 한국CAD/CAM학회 학술발표회 논문집, pp. 24-29, 1999.
4. Woo, H., Kang, E., Wang, S. and Lee, K. H., "A New Segmentation Method for Point Cloud Data", *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, Vol. 42, pp. 167-178, 2002.
5. Sun W., Bradley, C., Zhang, Y. F. and Loh, H. T., "Cloud Data Modeling Employing a Unified, Non Redundant Triangular Mesh", *Computer-Aided Design*, Vol. 33, pp. 183-193, 2001.
6. Edelsbrunner, H. and Mucke, E. P., "Three Dimensional Alpha Shapes", *ACM Trans. Graphics*, Vol. 13, pp. 43-72, 1994.

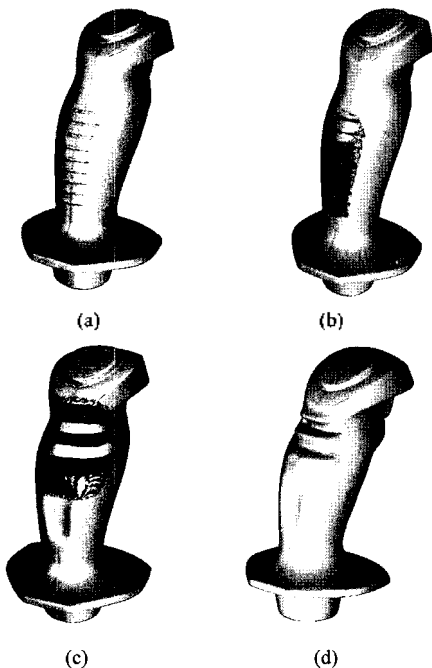


Fig. 14. An example of a joystick model.

7. Amenta, N., Choi, S. and Kolluri, R. K., "The Power Crust", *Proc. of 6th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, pp. 249-260, 2001.
8. Dey, T. K. and Goswami, S., "Tight Cocone: A Water Tight Surface Reconstructor", *Proc. of 8th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, pp. 127-135, 2003.
9. Boissonnat, J. D. and Cazals, F., "Smooth Surface Reconstruction via Natural Neighbor Interpolation of Distance Functions", *Proc. of 16th ACM Symposium on Computational Geometry*, pp. 223-232, 2000.
10. Coquillart, S., "Extended Free form Deformation: A Sculpturing Tool for 3D Geometric Modeling", *Proc. of ACM SIGGRAPH*, pp. 187-195, 1990.
11. Cavendish, J. C., "Integrating Feature based Surface Design with Freeform Deformation", *Computer-Aided Design*, Vol. 27, No. 9, pp. 703-711, 1995.
12. 김성환, 송성재, "불균일 이산 구속조건을 만족시키는 곡면 모델의 변형 방법", 한국 CAD/CAM학회 학술발표회 논문집, pp. 219-235, 2006.
13. Reuding, T. and Sreckovic, M., "Automatic Local Updating of CAD Surface Models", *3rd Third SLAM Conference on Geometric Design*, 1993.
14. Ma, W. and He, P., "B-spline Surface Local Updating with uNorganized Points", *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 11, pp. 853-862, 1998.
15. Bruijic, D., Ristic, M. and Ainsworth, I., "Measurement based Modification of NURBS Surfaces", *Computer-Aided Design*, Vol. 34, pp. 173-183, 2002.
16. Biermann, M., Martin, I., Bernardini, F. and Zorin, D., "Cut and Paste Editing of Multiresolution Surfaces", *Proc. of ACM SIGGRAPH*, pp. 312-321, 2002.
17. Biermann, H., Kristjansson, D. and Zorin, D., "Approximate Boolean Operations for Free-form Solids", *Proc. of ACM SIGGRAPH*, pp. 185-194, 2001.
18. Dey, T. K. and Giesen, J., "Detecting Undersampling in Surface Reconstruction", *17th Annual Symposium on Computational Geometry*, pp. 257-263, 2001.
19. Kang, E., Woo, H. and Lee, K. H., "Data Reduction based on Geometry and Color Variation", *International Journal of CAD/CAM Workshop on Digital Engineering*, pp. 14-18, 2006.
20. Dey, T. K., Woo, H. and Zhao, W., "Approximate Medial Axis for Cad Models", *Proc. of ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, pp. 280-285, 2003.



우혁제

1996년 충남대학교 기계설계공학과 학사
 1998년 광주과학기술원 기전공학과 석사
 2002년 광주과학기술원 기전공학과 박사
 2003년~2004년 The Ohio State Univ.
 Post-doctoral researcher
 2004년~2005년 삼성전자 반도체총괄 책임연구원

2005년~현재 경기공업대학 정밀기계시스템과 교수
 관심분야: Geometric modeling, mesh generation, reverse engineering, virtual engineering, computer-aided inspection, etc.



이종대

1990년 서울산업대학교 기계공학과 학사
 1992년 단국대학교 대학원 기계공학과 석사
 2003년 금오공과대학교 대학원 생산기계공학과 박사과정 수료
 1984년~1998년 한국생산기술연구원 기술교육센터 선임연구원

1999년~현재 경기공업대학 정밀기계시스템과 교수
 관심분야: Precision Metrology, Precision Machining, GD&T, Tolerance Stacks Reverse Engineering



이관형

1976년 서울대학교 섬유공학과 학사
 1982년 서울대학교 산업공학과 석사
 1985년 North Carolina State Univ. 산업공학과 석사
 1988년 North Carolina State Univ. 산업공학과 박사
 1988년~1994년 Northern Illinois Univ., 산업공학과 Assistant Professor

1995년~현재 광주과학기술원 기전공학과 교수
 관심분야: Immersive modeling, geometric modeling, photorealistic rendering, reflectance measuring and modeling, depth video acquisition and modeling