

論文2000-37SP-5-3

정렬되지 않은 3차원 거리 데이터로부터의 NURBS 곡면 모델 생성 기법

(On Constructing NURBS Surface Model from Scattered and
Unorganized 3-D Range Data)

朴仁圭*, 尹逸東**, 李商郁*

(In Kyu Park, Il Dong Yun, and Sang Uk Lee)

요 약

본 논문에서는 NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) 곡면 근사에 기반하여 거리 데이터로부터 3차원 곡면 모델을 생성하는 기법을 제안한다. 입력으로 이용되는 거리 데이터는 연결 정보가 알려지지 않고 정렬되지 않은 일반적인 3차원 점들의 집합으로 가정한다. 제안하는 알고리즘은 초기 모델 추정, 계층적 모델 표현, NURBS 곡면 네트워크 생성의 3단계로 나뉘어진다. 초기 모델 추정 단계에서는 K-평균 군집화 기법을 이용하여 다각형면과 삼각형으로 표현되는 근사 모델을 생성하고, 계층적 트리 구조를 이용하여 초기 모델을 표현한다. 계층적 트리 구조로부터 생성된 사각형면 모델에 의하여 G^1 연속인 NURBS 곡면 네트워크를 효율적으로 생성한다. 제안하는 알고리즘은 초기 모델의 계층적 그래프 해석을 통하여 곡면 네트워크 형성에 필요한 계산량을 감소시켰으며, 또한 정확한 NURBS 제어점 추정을 통하여 근사 오차를 감소시킨다. 모의 실험 결과 거리 데이터로부터 초기 모델과 다양한 해상도의 NURBS 곡면 네트워크가 효과적으로 생성되었으며 생성된 NURBS 곡면 모델의 근사 오차는 무시할 수 있는 수준임이 관찰되었다.

Abstract

In this paper, we propose an efficient algorithm to produce 3-D surface model from a set of range data, based on NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) surface fitting technique. It is assumed that the range data is initially unorganized and scattered 3-D points, while their connectivity is also unknown. The proposed algorithm consists of three steps: initial model approximation, hierarchical representation, and construction of the NURBS patch network. The initial model is approximated by polyhedral and triangular model using K-means clustering technique. Then, the initial model is represented by hierarchically decomposed tree structure. Based on this, G^1 continuous NURBS patch network is constructed efficiently. The computational complexity as well as the modeling error is much reduced by means of hierarchical decomposition and precise approximation of the NURBS control mesh. Experimental results show that the initial model as well as the NURBS patch network are constructed automatically, while the modeling error is observed to be negligible.

* 正會員, 서울대학교 電氣工學部

(School of Electrical Engineering, Seoul National Univ)

** 正會員, 韓國外國語대학교 制御計測工學科

(Dept. of Control and Instrumentation Eng., Hankuk Univ. of F.S.)

接受日字: 1999年9月4日, 수정완료일: 2000年4月18日

I. 서 론

3차원 컴퓨터 시각 (computer vision) 분야에서 최근 활발히 연구되고 있는 문제중의 하나는 복수의 거리 영상으로부터 3차원 캐드 (CAD) 모델을 생성해 내는 문제이다. 특히, 레이저 카메라와 공간 부호화 기법등과

같은 3차원 거리 영상의 측정 기술이 발달함에 따라 물체 표면의 3차원 좌표 정보를 보다 신속하고 정확하게 얻을 수 있게 되었다. 또한, 복수의 거리 영상간의 레지스트레이션 (registration)과 인티그레이션 (integration)에 관한 연구가 활발히 진행됨에 따라 여러 방향에서 취득한 거리 영상을 병합하여 물체 표면의 전체적인 3차원 좌표 정보를 얻을 수 있게 되었다^{1), 2), 15)}. 그러나 이와 같은 3차원 정보는 그 자체가 곡면 모델이 아닌 공간상의 3차원 점들의 집합이기 때문에 실제 응용 분야에 직접 이용할 수 없다는 한계를 가지고 있다. 따라서 병합된 거리 데이터를 3차원 곡면으로 표현하여 전체적인 형상을 복원하는 3차원 모델링 기법의 중요성이 점차 증대되고 있다. 특히, 이와 같은 과정으로 얻어진 3차원 곡면 모델은 신속 원형 설계 (rapid prototype), 재공학 (reverse engineering), 컴퓨터 그래픽스 (computer graphics), 가상 환경 (virtual environment) 등의 다양한 분야에 응용될 수 있으므로 매우 유용하다고 볼 수 있다.

3차원 거리 데이터의 집합으로부터 생성되는 3차원 모델로는 전통적으로 삼각형 메쉬 모델이^{1), 2), 3), 7), 8), 10)}. 이것은 인티그레이션이 수행될 당시의 각각의 거리 영상에서의 데이터의 연결 정보를 기반으로 생성되는 것으로 그 과정이 비교적 단순하고 Delaunay 삼각화 기법으로 대표되는 기존의 삼각화 기법을 쉽게 적용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그런데 물체를 표현하는 거리 데이터의 양은 매우 방대하기 때문에 삼각형 메쉬 기반 모델링은 계산량이 많고 메쉬 최적화등의 부가 기법이 필요하게 된다. 또한 삼각형 메쉬는 곡면 모델이 아니므로 응용 범위가 거리 데이터의 시각화로 제한되는 단점을 가지고 있다. 따라서 3차원 물체의 표면의 곡면을 보다 정확하게 표현하고 곡면 편집, 변형 등의 기능을 실제 캐드 시스템에서 용이하게 이용하기 위하여 최근에는 B-Splines에 기반한 모델링 기법이 제안되고 있다^{4), 5), 6), 11), 12)}. 또한 IGES, STEP등의 CAD/CAM 표준 데이터 형식에서 B-Splines를 곡선과 곡면 표현의 기본 요소로 제공하기 때문에 PRO/ENGINEERTM, Solid WorksTM등을 비롯한 여러가지 솔리드 모델링 시스템등에서 B-Splines가 널리 이용되고 있다.

B-Splines의 가장 일반적인 형태인 NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines)에 기반한 곡면 근사에 앞서 해결되어야 할 가장 중요한 문제는 곡면을 구성하

는 데이터가 2차원 $u-v$ 매개 변수 공간에 규칙적으로 대응되어 있는 격자 구조를 이루고 있어야 한다는 것이다. 그러나 복잡한 형태의 물체의 표면 전체에 대해 매개 변수화를 수행하기는 사실상 불가능하므로 제안하는 알고리즘은 물체의 표면을 분할하여 단위 곡면들이 연결된 구조로 변형한 후, 단위 곡면별로 NURBS 곡면 근사를 수행하여 NURBS 곡면 네트워크를 형성하는 기법을 이용한다. 본 논문에서는 3차원 거리 데이터로부터 이러한 NURBS 곡면 네트워크를 신속하고 정확하게 형성하는 효율적인 기법을 제시한다.

이를 위하여 본 논문에서는 K-평균 군집화 알고리즘을 이용하여 물체의 표면을 단위 곡면으로 분할하고 분할된 단위 곡면은 주변 단위 곡면들과의 인접도를 고려하여 다각형면으로 근사되어 초기 모델로서 이용된다. 이와 같은 초기 모델 추정 방식은 전체 입력으로부터의 하향식 (top-down) 접근 방식으로 다각형면을 근사하기 때문에 모든 거리 데이터를 노드로 보는 상향식 (bottom-up) 접근 방식보다 계산량면에서 효율적이고, 또한 최종 모델이 NURBS 곡면이므로 낮은 해상도로 추정되어도 무방하다. 이러한 다각형면 초기 모델은 그래프 표현 기법에 기반하여 인접 그래프로 표현되고 이를 노드의 속성에 따라 다시 분할하여 부그래프들의 조합으로 나타낸다. 결국 거리 데이터는 인접 그래프-부그래프-다각형면 노드-삼각형면의 계층 구조로 모델링되고 NURBS 곡면 근사를 위한 매개 변수 공간은 부그래프 단위로 생성되며 이 때, 계층 구조가 효율적으로 이용되어 계산량을 줄일 수 있다. 즉, 계층 구조에서의 각 상위 계층은 자신의 하위 계층에서의 비교 및 검색 범위를 제한함으로써 계산량을 줄이고 또한 NURBS 네트워크 형성에서의 가장 중요한 문제인 매개 변수 공간 추정을 건실하게 수행한다. 그리고, 최종 NURBS 곡면 근사의 단계에서는 인접된 NURBS 곡면간의 연속성을 고려하여 G1 연속성¹⁾이 보장되도록 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 B-Splines 곡면 모델에 기반한 기존의 연구에 대하여 간략히 서술하고 제 3장에서는 초기 모델 추정 기법에 대해 서술한다. 그리고, 제 4장에서는 초기 모델의 계층적 트리 구조를 이용한 표현 기법과 NURBS 매개 변수 공간의

1) G¹ 연속성은 접선 연속 (tangent continuous)을 의미한다.

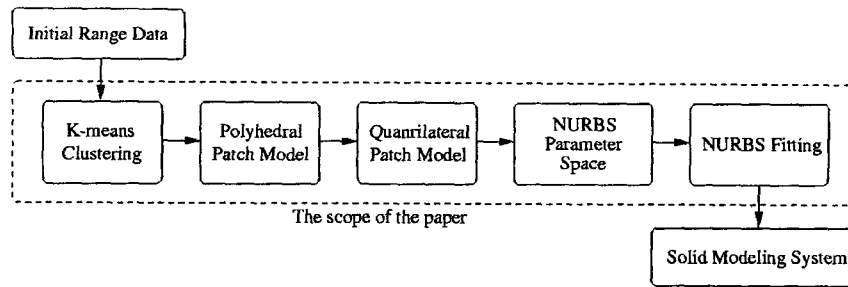


그림 1. 제안하는 모델링 알고리즘의 블록 다이어그램

Fig. 1. Overview of the modeling algorithm.

생성에 관하여 서술하고 제 5장에서는 NURBS 곡면 근사에 관하여 서술한다. 제 6장에서 제안하는 알고리즘에 대한 실험 결과를 제시하고 제 7장에서는 결론을 서술한다. 그림 1에 제안하는 알고리즘의 구조를 블록 다이어그램으로 나타내었다.

II. 기존의 연구

3차원 거리 데이터의 집합으로부터 적절한 3차원 모델을 얻기 위하여 다양한 분야에서 연구가 이루어져 왔고 여러 가지 알고리즘이 제안되었다^{1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 18)}. 기존의 모델링 기법은 3차원 모델의 표현 방식에 따라 크게 삼각형 메쉬 기반 모델링 기법^{1, 7, 8, 9, 18)}과 B-Splines 기반 모델링 기법^{4, 5)}으로 나뉘어 질 수 있다.

삼각형 메쉬 모델과 관련된 기존의 많은 연구들은 거리 데이터 또는 3차원 점들로부터 효율적으로 삼각화를 수행하는 기법^{1, 8)}과 이미 생성되어 있는 초기 삼각형 메쉬로부터 삼각형 꼭지점의 삭제 및 합병, 변의 교환등과 같은 방법을 이용하여 다중 해상도를 구현하거나 오차의 한도내에서 메쉬를 최적화하는 기법^{7, 9)}의 두 가지 분야로 나눌 수 있다.

B-Splines 기반 모델링 기법은 사용자와 컴퓨터의 작업 분담의 정도에 따라 반자동 모델링과 자동 모델링 기법으로 나뉘어지며, 또한 B-Splines 네트워크를 형성하는지의 여부에 따라 한 장 또는 원통형 B-Splines 구조의 변형에 의한 모델링과 여러 장의 B-Splines의 조합에 의한 모델링 기법으로 나뉘어진다. 반자동 모델링 기법^{11, 12)}은 전체 거리 데이터중에서 근사를 수행할 부분을 분리한 후, 사용자가 수동으로 생성한 기준 평면으로 데이터를 투영하고 이로부터 얻어진 B-Splines 곡면과 거리 데이터와의 오차를 최소화하는 방법으로

모델링을 수행한다. 이러한 기법은 국부 근사를 수행하므로 임의의 형상을 가지는 물체에 대한 전체적인 곡면 모델을 생성하는데에는 한계를 지닌다. 자동 모델링 기법^{4, 5)}은 입력 데이터를 분할하고 분할된 부분 집합으로서의 거리 데이터로부터 자동으로 B-Splines 곡면을 생성한다. Eck와 Hoppe⁴⁾의 알고리즘은 주어진 근사 오차의 한계 범위내에서 좋은 해상도의 곡면 모델을 생성하지만 과도한 최적화 과정으로 인하여 모델링의 계산량이 많다는 단점을 가지고 있다. Krishnamurthy와 Levoy⁵⁾는 조밀한 삼각형 메쉬 모델을 입력으로 받아들여 사용자가 사각형 단위 곡면으로 직접 분할한 뒤 적절한 해상도의 B-Spline 곡면으로 초기 근사를 하고 근사 오차를 displacement map의 형태로 표현하여 여러가지 영상 처리의 기법을 적용할 수 있도록 하였다.⁵⁾ 역시 사용자의 입력에 의한 단위 곡면으로의 분할 과정이 필요하기 때문에 진정한 의미에서의 자동 모델 생성 기법이라고는 볼 수 없는 단점을 가지고 있다.

한 장 또는 원통형 B-Splines 구조의 변형에 의한 모델링 기법⁶⁾은 표현할 수 있는 물체가 단순한 형태로 제한된다는 단점이 있기 때문에 실제 응용에 있어서는 부적절하며 따라서 여러장의 B-Splines의 네트워크로 물체를 표현하는 기법^{4, 5)}이 임의의 형태를 지닌 물체에 대해 B-Splines 곡면 모델을 생성하기 위한 바람직한 방법이다. 그러나 정렬되지 않은 거리 데이터로부터 자동으로 이와 같은 과정을 수행하는 알고리즘은 현재까지 많이 보고되지 않고 있다.

III. 초기 모델 추정 기법

시점이 서로 다른 복수의 거리 영상에 대하여 레지

스트레이션 (registration)과 인티그레이션 (integration)의 과정을 거치게 되면 물체 표면의 전체적인 3차원 좌표 정보를 얻을 수 있게 된다. 본 장에서는 이와 같이 생성된 거리 데이터 집합으로부터 초기 삼각형 메쉬 모델의 추정을 수행한다.

1. 단위 곡면의 생성과 다각형면 초기 모델 생성^[16]

K -평균 군집화 기법은 다차원 공간의 군집 영역에 속하는 모든 점으로부터 군집 중심까지의 거리의 제곱의 합을 최소화 하는 기법으로서 패턴 인식 및 영상 처리 분야에서 다양하게 이용되고 있다. 거리 데이터의 경우 3차원 유클리드 공간에 데이터들이 분포되어 있으므로 K -평균 알고리즘에 의해 적절한 군집화를 수행할 수 있다. 이 때, 군집의 수는 사용자에게 의하여 미리 결정되어 있어야 하고 군집의 중심을 계산하기 위하여 일반 로이드 (generalized Lloyd) 알고리즘^[13]을 이용한다. 이에 의해 얻어진 K 개의 군집 중심을 $C = \{y_1, y_2, \dots, y_K\}$ 라고 하면 주어진 3차원 데이터들의 집합은 식 (1)에 의해 K 개의 단위 곡면 P_i ($i=1, 2, \dots, K$)로 나뉘어지게 된다.

$$P_i = \{x \mid d(x, y_i) \leq d(x, y_j) \text{ for all } j(\neq i)\} \quad (1)$$

여기서,

$$d(x, y_i) = x \cdot y_i - \frac{1}{2} \|y_i\|^2 \quad (2)$$

K -평균 군집화 기법에 의해 K 단위 곡면으로 분할된 거리 데이터는 단위 곡면간의 인접도에 기반한 다각형 근사 기법에 의해 다각형면 모델로 근사된다. 이는 단위 곡면간의 인접 정보를 가지고 있는 단위 곡면 인접 테이블 (patch adjacent table)을 이용하여 수행될 수 있다. 단위 곡면 인접 테이블은 각 원소가 0 또는 1의 값을 갖는 이진 행렬로서 (i, j) 원소는 단위 곡면 P_i 와 P_j 가 서로 인접하였을 경우 1, 그렇지 않은 경우 0의 값을 취한다.

각 단위 곡면이 근사되는 다각형면의 꼭지점은 세 개 또는 네 개의 단위 곡면이 동시에 인접하는 경우 공통의 경계점에서 결정된다. 이러한 경계점들은 단위 곡면 인접 테이블을 이용하여 쉽게 얻을 수 있다. 즉, 단위 곡면 P_i , P_j , 그리고 P_k 가 동시에 인접하고 있다면 인접 테이블의 i, j, k 번째 행, 열로 구성되는 9개의 원소는 모두 1의 값을 가진다. 또한, 네 개의 단위

곡면이 동시에 인접하고 있는 지의 여부도 같은 방식으로 인접 테이블을 참조하여 쉽게 알아 낼 수 있다. 이와 같이 단위 곡면에 대한 다각형 근사가 수행되고 전체적으로 연속인 다각형면 초기 모델이 추정된다.

2. 삼각형 초기 메쉬 모델의 생성

다각형면 초기 모델이 생성되면 단위 곡면의 무게 중심과 다각형의 꼭지점을 연결하여 새로운 모서리를 생성함으로써 다각형면 초기 모델은 삼각형면 모델로 쉽게 변환될 수 있다. 이 때, 생성되는 삼각형면의 세 꼭지점은 법선 방향으로 가장 가까운 거리 데이터의 위치를 자신의 위치로 취하게 된다. 따라서 결과적으로 생성되는 삼각형 메쉬는 노드에서의 오차는 없고 각 삼각형의 내부에서 근사 오차가 발생하는 초기 근사 모델이 형성되는 것이다.

본 논문에서는 인티그레이션의 과정을 거친 거리 데이터를 입력으로 이용하므로 생성되는 초기 모델은 닫힌 면으로 둘러싸여 있다고 가정한다. 이 때, 초기 삼각형 메쉬 모델의 면, 모서리, 꼭지점의 개수에 대하여 다음과 같은 정리가 성립한다.

정리 1 : 삼각형 초기 모델에서 삼각형면의 개수는 항상 짝수이다.

정리 2 : 다각형면 초기 모델에서 홀수면 다각형면의 개수는 항상 짝수이다.

정리 1과 정리 2는 간단히 유도될 수 있다. 우선 삼각형의 개수를 n 개라고 가정한다면 하나의 삼각형에는 세 개의 모서리가 존재하고 두 개의 삼각형이 하나의 모서리를 공유하므로 전체 모서리의 개수는 $\frac{3n}{2}$ 개가 될 것이다. 그런데 모서리의 개수는 정수가 되어야 하므로 n 은 언제나 짝수가 되어야 한다. 따라서 정리 1이 성립한다. 또한, 홀수면 다각형 내부에 존재하는 삼각형의 개수의 총합이 짝수가 되어야 하므로 홀수면 다각형의 개수도 항상 짝수가 되어 정리 2가 성립한다. 정리 1은 제 5장의 NURBS 네트워크의 생성에 매우 중요한 의미를 지닌다. 즉, NURBS 곡면 근사는 격자 구조의 2차원 매개 변수 공간을 필요로 하는데, 한 쌍의 삼각형을 병합하여 하나의 사각형면을 생성함으로써 매개 변수 공간으로 이용할 수 있는 것이다. 그런데 전체적으로 사각형면 모델을 생성하기 위한 필요조건으로서 반드시 정리 1이 성립하여야만 삼각형의 개수

가 항상 짝수가 되고 사각형면의 개수는 삼각형면의 개수의 절반이 되어 사각형면 모델이 존재할 수 있는 것이다.

IV. 초기 모델의 계층적 표현 기법

3차원 물체의 거리 데이터는 일반적으로 공간에서 불규칙하게 배열되어 있고 거리 영상을 이용하여 규칙적으로 배열이 되어 있다고 하여도 임의의 형상 데이터를 직접 NURBS 곡면 근사에 이용하기는 사실상 불가능하다. 이것은 NURBS 곡면 근사의 특성에 기인한 것으로 NURBS 곡면 근사의 입력이 되는 데이터들은 반드시 규칙적인 격자 구조를 형성하여 2차원 $u-v$ 매개 변수 공간에 대응되어 있어야 하기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 NURBS를 이용한 3차원 물체의 모델링은 물체의 표면을 분할하여 네트워크로 표현하고 분할된 곡면 단위로 NURBS 근사를 수행한 후 인접 곡면간이 연속하도록 제약 조건을 추가하는 방법이 일반적이다⁴⁾.

본 논문에서는 이러한 NURBS 곡면 네트워크를 형성하기 위한 중간 단계로서, 초기 다각형 모델로부터 사각형면 모델을 생성하여 NURBS 곡면의 매개 변수 공간으로 이용한다.

초기 모델로부터 사각형면 모델을 얻기 위한 가장 쉬운 방법은 인접하고 있는 두 개의 삼각형면을 병합하여 사각형면을 생성하는 것이다. 그러나 일반적으로 삼각형면 모델은 수많은 삼각형면으로 구성되어 있으므로 전체 검색을 통하여 삼각형면의 쌍을 얻는다는 것은 거의 불가능하다. 따라서 제안하는 기법에서는 초기 모델의 계층적 표현을 통하여 효율적으로 사각형면 모델이 생성될 수 있도록 한다.

1. 계층적 트리 구조

계층 구조에서의 최상위 구조는 초기 다각형 모델로부터 생성된 인접 그래프로 표현된다.이 때 그래프에서의 각 노드는 초기 모델을 구성하는 다각형면이 되고 짝수면 다각형과 홀수면 다각형의 기본 속성을 지니게 된다. 인접 그래프는 속성에 따른 각 노드의 군집화를 통하여 다음과 같은 세 가지 유형의 부그래프로 나뉘어진다.

Type I : 노드의 속성이 모두 짝수면 다각형면인 부

래프

Type II : 노드의 속성이 모두 홀수면 다각형면이고 그래프의 차원²⁾이 짝수인 부그래프

Type III : 노드의 속성이 모두 홀수면 다각형면이고 그래프의 차원이 홀수인 부그래프

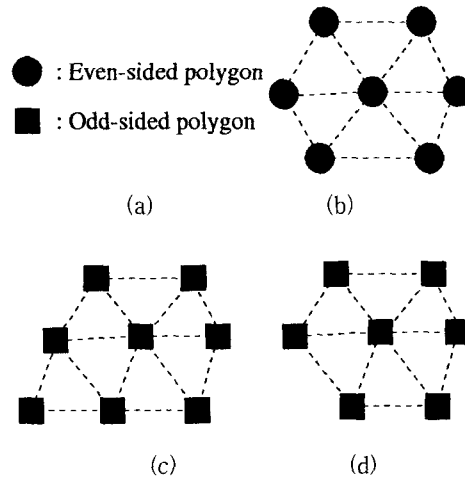


그림 2. 인접 그래프의 분할로 생성된 세가지 부그래프
(a) 노드의 속성 (b) Type I 부그래프.
(c) Type II 부그래프(차원은 8)
(d) Type III 부그래프(차원은 7)

Fig. 2. Three types of subgraph.
(a) Nodal attributes (b) Type I subgraph
(c) Type II subgraph(Cardinality is 8)
(d) Type III subgraph(Cardinality is 7)

여기서 부그래프는 속성이 같은 노드들로 이루어진 연결된 구조를 가진 다각형면들의 집합이다. 즉, 홀수면 다각형면을 기준으로 인접 다각형면을 검색하여 홀수면 다각형면들의 군집화를 수행하면 생성된 군집에 대해 부그래프를 얻을 수 있다. 그림 2에 Type I, Type II, Type III 부그래프의 예를 도시하였다.

각각의 부그래프는 또다시 각각의 노드, 즉 다각형면으로 나뉘어지고 다각형면 역시 내부적으로 삼각형들의 집합으로 분해된다. 이러한 방식 생성된 트리 구조는 그림 3에 도시한 바와 같이 인접 그래프-부그래프-다각형-삼각형의 계층적 구조를 형성한다.

2. 사각형 면 모델의 생성

다각형면 초기 모델로부터 사각형면 모델을 생성하

2) 본 논문에서 그래프의 차원은 그래프에 속하는 노드의 개수로 정의된다.

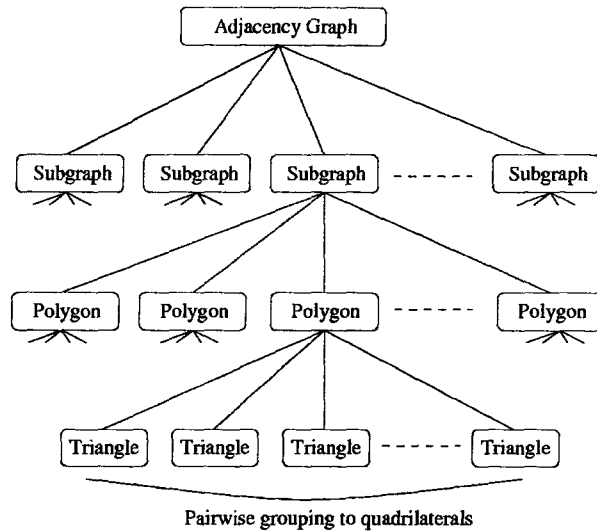


그림 3. 초기 다각형 모델로부터 생성된 계층적 트리구조

Fig. 3. Hierarchical decomposition of the initial polyhedral model.

는 기본적인 과정을 그림 4에 도시하였다. 우선, 짝수면 다각형면은 내부의 삼각형면을 한 쌍씩 결합하여 하나의 사각형면으로 변환할 수 있다. 그림 4 (a)-(b)에 하나의 육각형으로부터 세 개의 사각형면이 생성되는 예를 나타내었다. 한편, 홀수면 다각형면은 내부에 존재하게 되는 삼각형의 수가 홀수이므로 이 경우 하나의 삼각형이 남게된다. 따라서, 그림 4 (c)-(d)에 도시한 바와 같이 인접하는 홀수면 다각형면이 존재하는 경우 인접부의 두 삼각형면을 우선 결합하고, 나머지 삼각형면들은 이들이 포함되는 다각형면 내부에서 한 쌍씩 결합하여 사각형면으로 변환할 수 있다.

그러나 이와 같은 결합 방식은 홀수면 다각형면들이 한 쌍씩 묶이는 해가 존재하는 경우에 제한적으로 적용이 가능하다. 예를 들어 세 개의 홀수면 다각형면들이 모여 있는 경우에는 이러한 해가 존재하지 않을 것이다. 따라서, 일반적인 경우에 대하여 사각형면 모델을 생성하기 위하여 다음 절에 기술하는 바와 같이 계층적 트리 구조를 이용하여 부그래프 단위로 변환을 수행한다.

3. Type I, II 부그래프로부터 사각형면 모델의 생성

사각형면 모델의 생성은 부그래프 단위로 수행된다. Type I 부그래프는 그림 4 (a)-(b)에 도시한 바와 같이 그래프의 노드에 해당되는 다각형 단위로 간단히 처리할 수 있다. Type II 부그래프는 노드의 속성이 홀수면

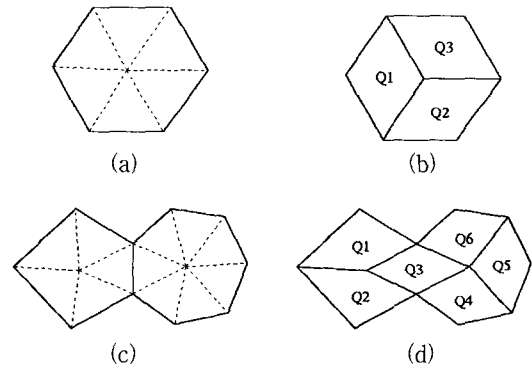


그림 4. 사각형면의 생성

(a) 짝수면 다각형

(b) 생성된 사각형면 구조

(c) 한 쌍의 홀수면 다각형

(d) 생성된 사각형면 구조

Fig. 4. Generating quadrilaterals.

(a) An even-sided polygon

(b) Resultant quadrilaterals

(c) Odd-sided polygons neighboring each other

(d) Resultant quadrilaterals

다각형이므로 Type I과 같이 다각형 단위로 사각형면 모델을 생성할 수가 없기 때문에 그래프 내부에서 인접하는 각 쌍의 노드를 동시에 고려하여 그림 4 (c)-(d)에 도시한 바와 같이 사각형면으로 변환할 수

있다. 이것은 Type II 부그래프의 차원이 짝수이므로 노드를 두 개씩 병합하는 그룹핑에 기반하여 수행된다.

4. Type III 부그래프로부터 사각형면 모델의 생성

Type III 부그래프는 차원이 홀수이기 때문에 두 개의 노드를 병합하는 과정을 거치더라도 하나의 노드가 남게 되어 이에 대하여는 사각형면으로 변환을 할 수 없게 된다. 그런데, 기술한 바와 같이 홀수면 다각형의 개수는 항상 짝수이므로 Type III 부그래프의 개수도 항상 짝수가 된다. 이 성질을 이용하여 한 쌍의 Type III 부그래프를 병합한다면 부그래프 내부의 노드의 수를 짝수개로 유지할 수 있을 것이다.

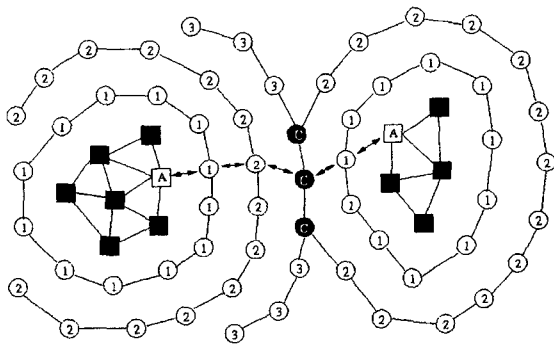
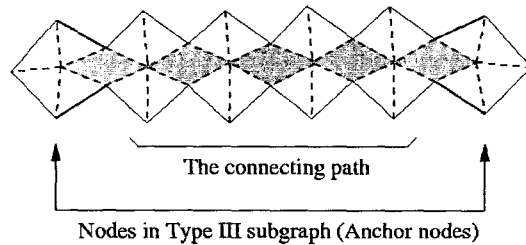


그림 5. Type III 부그래프를 연결하는 노드 리스트의 검색. 'A'와 'C'는 각각 anchor 노드와 공통 노드를 나타낸다.

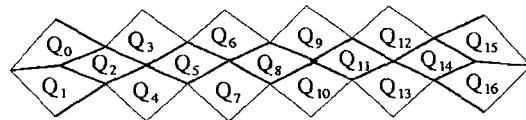
Fig. 5. Finding the shortest path between Type III subgraphs. The number indicates the level of expansion. The nodes with label 'A' denote the anchor node of each subgraph.

두 개의 Type III 부그래프의 병합은 부 그래프간을 Type I 부그래프에 속하는 노드들로 연결하여 줌으로써 수행할 수 있다. 즉, Type I 부그래프는 그 속성이 짝수면 다각형면이므로 내부의 노드가 분리되어 독립되어도 사각형면으로의 변환을 수행하는 데에는 아무 문제가 없다. 또한 Type III 부그래프들의 사이에는 Type I 부그래프의 노드들이 존재할 것이므로 두 그래프를 연결하는 연결 노드들이 존재할 것이다. 이 과정을 그림 5에 도시하였다. 그림 5에서 사각형들로 표시된 노드들로 구성된 그래프는 Type III의 부그래프를 의미한다. 우선 부그래프간을 연결하는 노드를 찾기 위하여 각각의 부그래프에 대한 계층 확장을 수행한다. 부그래프 자신은 0번 계층이 되고 현재 자신의 계층에

인접하고 있는 Type I 부그래프의 노드들이 다음번 계층을 구성한다. 그림 5에서 Type I 부그래프의 노드들을 원형으로 나타내었고 내부의 번호는 자신의 계층 번호를 의미한다. 두 부그래프에 대하여 계층 확장을 수행한 후, 낮은 계층을 우선으로 계층간의 공통 노드를 찾고 공통 노드를 지나면서 시점과 종점이 양쪽의 부 그래프에 속하는 노드들의 리스트를 구하면 이것이 바로 부그래프간을 잇는 연결 노드가 되는 것이다. 그림 5에서 검은 원으로 표시한 노드가 부그래프간의 공통 노드가 되며 얻어진 연결 노드를 화살표로 나타내었다.



(a)



(b)

그림 6. 연결 노드에서의 사각면성 생성

(a) 초기 연결도 (b) 사각형면 생성

Fig. 6. Quadrilateral path generation in the connection nodes.

(a) Initial layout (b) Quadrilateral patches

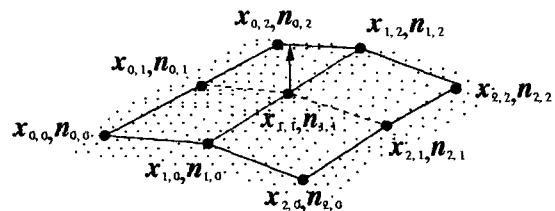


그림 7. 계층적 분할을 이용한 새로운 격자점의 추정

Fig. 7. Determining position and normal vector of new grid points during recursive division.

그림 6에 연결 노드를 이용한 사각형면의 생성 과정

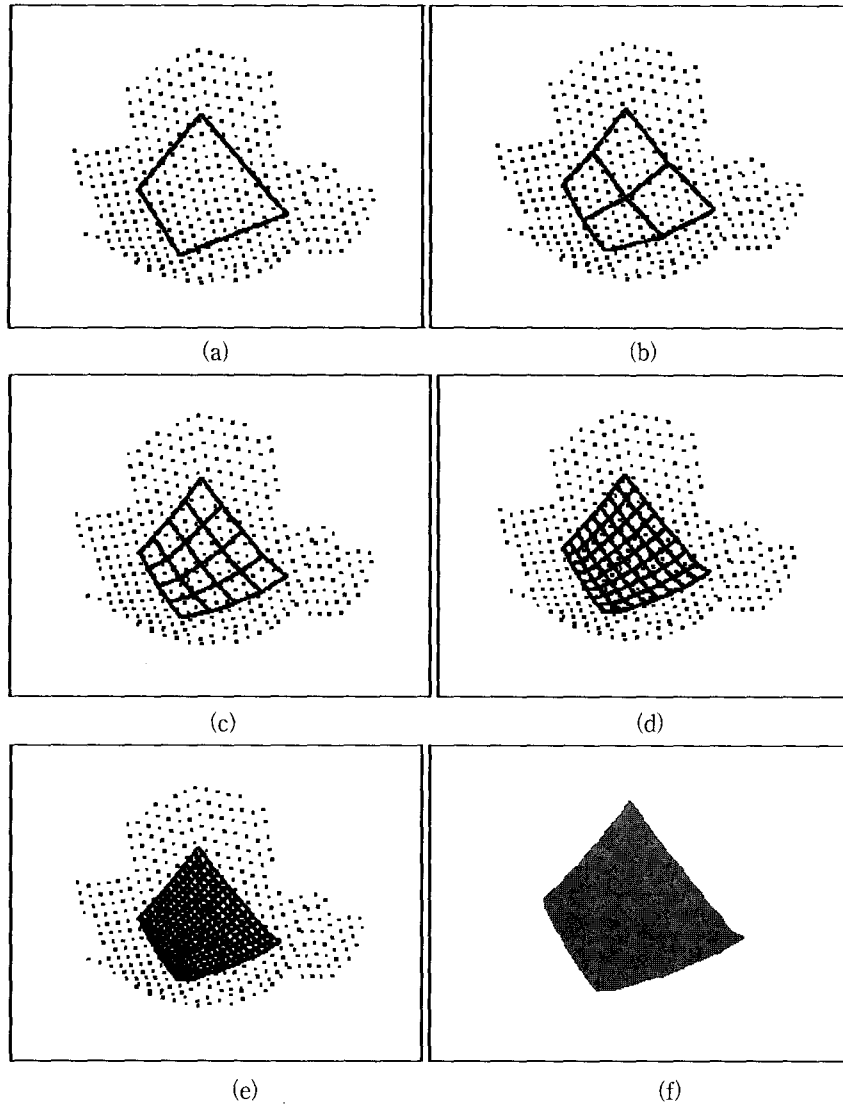


그림 8. 사각형 단위 곡면의 격자 구조 생성 (a) 사각형면 모델 (b) 3×3 분할 (c) 5×5 분할 (d) 9×9 분할 (e) 17×17 분할 (f) 생성된 NURBS 곡면

Fig. 8. Constructing a regular grid structure from an initial quadrilateral patch (a) Initial quadrilateral patch (b) 3×3 grid (c) 5×5 grid (d) 9×9 grid (e) 17×17 grid (f) Reconstructed NURBS surface (from (e))

을 도시하였다. 그림 6 (a)에 도시한 바와 같이 서로 인접하고 있는 노드에서는 두 개의 삼각형면이 병합되어 사각형면을 형성한다. 이 경우, 각각의 다각형면에서의 남은 삼각형면의 개수는 짝수이므로 다각형면 내부에서 한 쌍씩의 삼각형면을 병합하여 사각형면을 생성할 수 있다. 그림 6 (b)에 결과적으로 생성된 사각형면들을 도시하였다. 한편, Type III 부그래프 자체는 연결 노드에 포함된 노드가 하나씩 제외되었으므로 차원이

감소하여 Type II 부그래프로의 변환이 수행되었다. 따라서 이 경우 Type II 부그래프에 대한 사각형면 생성할 수 있다.

V. NURBS 네트워크 형성 기법

계층적 트리 구조를 이용하여 생성된 사각형면 모델로부터 NURBS 곡면 네트워크를 형성하기 위하여, 각

각의 사각형면을 국부적인 매개 변수 공간으로 이용한다. 본 장에서는 사각형면 모델에서의 격자 구조의 입력 데이터 추정, NURBS 곡면 근사, 그리고 NURBS 곡면의 연속성에 관하여 서술한다.

1. 격자 구조 단위 곡면의 추출

생성된 사각형면은 NURBS 네트워크의 형성에서 각각의 곡면의 매개 변수 공간으로 이용된다. 이 때, 각각의 매개 변수 공간에서 거리 데이터를 근사하는 격자 구조의 입력 매쉬를 추정하기 위하여 본 논문에서는 계층적 분할 기법을 이용한다.

그림 7에 계층적 분할 기법의 기본 개념을 도시하였다. 여기서 $x_{i,j}$ 와 $n_{i,j}$ 는 각각 격자점의 위치와 격자점에서의 단위 법선 벡터를 의미한다. 초기 사각형면은 $\{x_{0,0}, x_{0,2}, x_{2,0}, x_{2,2}\}$ 로 이루어져 있고, 1차 분할에 의하여 그림 7과 같은 3×3의 격자 구조가 생성되는데 그 과정은 다음과 같다. 우선 각 변에서의 새로운 격자점 $\{x_{1,0}, x_{0,1}, x_{2,1}, x_{1,2}\}$ 은 인접하는 격자점에서의 중점을 계산하고, 마찬가지로 인접하는 격자점에서의 법선 벡터의 평균을 자신의 법선 벡터로 설정한다. 이 때, 중점을 지나고 법선 벡터의 방향을 가지는 직선과 거리 데이터의 가상 곡면과의 교점이 새로운 격자점의 위치로 결정되는 것이다. 다음으로 교점 근방의 거리 데이터들로부터 새로운 단위 법선 벡터를 추정하고 이를 새로운 격자점의 법선 벡터로 설정한다. 마찬가지로 내부의 새로운 격자점 $x_{1,1}$ 은 4-연결성을 가지는 인접 격자점 $\{x_{1,0}, x_{0,1}, x_{2,1}, x_{1,2}\}$ 의 무게 중심과 평균 법선 벡터로부터 추정할 수 있다. 이와 같은 과정을 반복적으로 격자 구조에 적용하면 계속하여 5×5, 9×9의 격자 구조를 생성할 수 있다. 생성된 격자 구조의 입력 매쉬는 거리 데이터로 이루어진 가상 평면을 정확히 근사하게 되며 또한 매우 규칙적인 격자 배열을 형성하게 된다. 격자 구조가 형성되면 이를 입력으로하여 NURBS 곡면의 제어점과 매듭 벡터를 추정함으로써 NURBS 곡면이 생성되는 것이다. 그림 8에 사각형면으로부터 17×17 격자 구조의 생성 과정과 생성된 NURBS 곡면을 도시하였다. 그림 8에서 각 점들은 근사되는 거리 데이터를 의미한다.

2. NURBS 곡면 근사

NURBS는 제어점 (control point)과 각 제어점에서의 가중치 (weight), 매듭 벡터 (knot vector), 그리고 기저

함수 (basis function)등의 요소들로 정의된다. u, v 축 방향으로 p, q 차의 NURBS 곡면의 수식적인 정의는 식 (3)과 같다.

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j} b_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j}}, \quad (3)$$

$0 \leq u, j \leq 1$

표 1에 NURBS 곡면 근사에 관련된 여러가지 기호를 정리하여 나타내었다.

표 1. NURBS 곡면 근사식에 사용되는 기호
Table 1. List of Symbols Used in the NURBS Surface Fitting.

symbol	Description
$N_{i,p}(u)$	u 의 방향의 NURBS 기저함수
$N_{j,q}(v)$	v 의 방향의 NURBS 기저함수
$b_{i,j}$	제어점
n	제어점 격자구조의 u 방향 최대 인덱스
m	제어점 격자구조의 v 방향 최대 인덱스
p	u 방향의 근사 차수
q	v 방향의 근사 차수
U	u 방향의 매듭 벡터
V	v 방향의 매듭 벡터
r	매듭 벡터 U 의 원소의 수
s	매듭 벡터 V 의 원소의 수
$Q_{k,l}$	입력 데이터
N	입력 데이터의 u 방향 최대 인덱스
M	입력 데이터의 v 방향 최대 인덱스
\bar{u}_k	$Q_{k,l}$ 에서 추정된 u 방향 매개 변수
\bar{v}_l	$Q_{k,l}$ 에서 추정된 v 방향 매개 변수

본 논문에서의 NURBS 곡면 근사는 NURBS 곡면 네트워크를 구성하고 있는 개별의 곡면 단위로 이루어지며 그 과정은 다음과 같다. 격자 구조 단위 곡면의 추출에 의하여 3차원 데이터들의 집합 $Q_{k,l}$ ($k=0,1, \dots, N; l=0,1, \dots, M$)이 주어졌다고 하자. 이 때, $Q_{k,l}$ 를 근사하는 NURBS 곡면을 구하는 과정은 결국 제어점 $b_{i,j}$ 와 매듭 벡터 U, V 를 구하는 과정이다. u, v 방향으로의 근사 차수를 각각 p, q 라 할 때, NURBS의 정

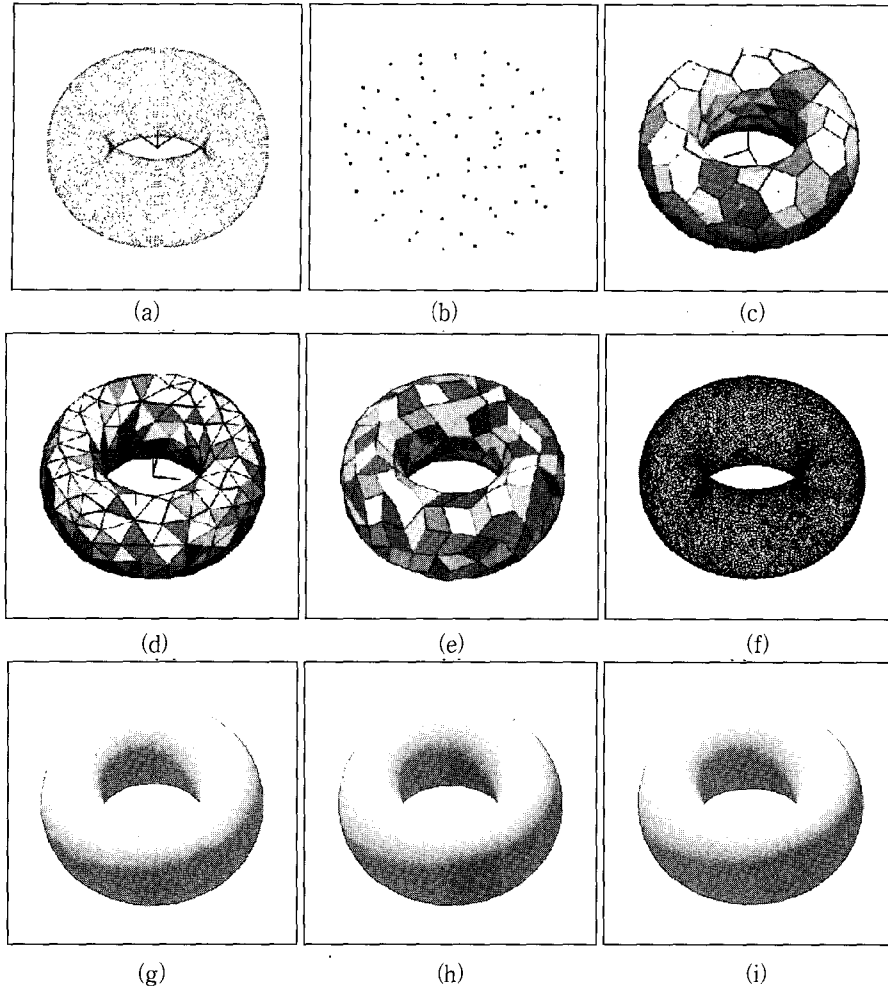


그림 9. 토러스 데이터에 대한 모델링 결과($K=80$) (a) 거리 데이터 (b) 단위 곡면의 중심 (c) 다각형면 초기모델 (d) 삼각형 초기모델 (e) 사각형면 모델(NURBS 매개 변수 공간) (f) NURBS 제어 매쉬($n=m=8$) (g) NURBS 곡면 모델($n=m=4, p=q=2$) (h) NURBS 곡면 모델($n=m=8, p=q=2$) (i) NURBS 곡면 모델($n=m=16, p=q=2$)

Fig. 9. Modeling result of torus data($K=80$) (a) Range data (b) Centroids of the point patches (c) Polyhedral initial model (d) Triangular initial model (e) Quadrilateral patch model(NURBS parameter space) (f) NURBS control mesh($n=m=8$) (g) Reconstructed NURBS($n=m=4, p=q=2$) (h) Reconstructed NURBS surface($n=m=8, p=q=2$) (i) Reconstructed NURBS surface($n=m=16, p=q=2$)

의로부터 식 (4)가 성립한다.

$$Q_{i,j} = S(\overline{u_k}, \overline{v_l}) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(\overline{u_k}) N_{j,q}(\overline{v_l}) w_{i,j} b_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(\overline{u_k}) N_{j,q}(\overline{v_l}) w_{i,j}} \quad (4)$$

여기서 u_k, v_l 은 $Q_{k,l}$ 의 u, v 방향의 매개 변수를 의미한다. 식 (4)로부터 제어점 $b_{i,j}$ 와 매듭 벡터 U, V 를 구하기 위한 일반적인 방법은 다음과 같다^[20].

Step 1: u, v 방향으로의 근사의 차수 p, q 를 결정한다.

Step 2: 2차원 매개 변수 공간에서 $Q_{k,l}$ 이 대응되는 매개 변수 u_k 와 v_l 를 추정한다.

Step 3: $Q_{k,l}$ 의 매개 변수로부터 매듭 벡터 U, V 를 추정한다.

Step 4: 식 (4)에 의해 $b_{i,j}$ 에 대하여 $(N+1) \times (M+1)$ 개의 벡터 연립 방정식을 세우고 최소 자승법

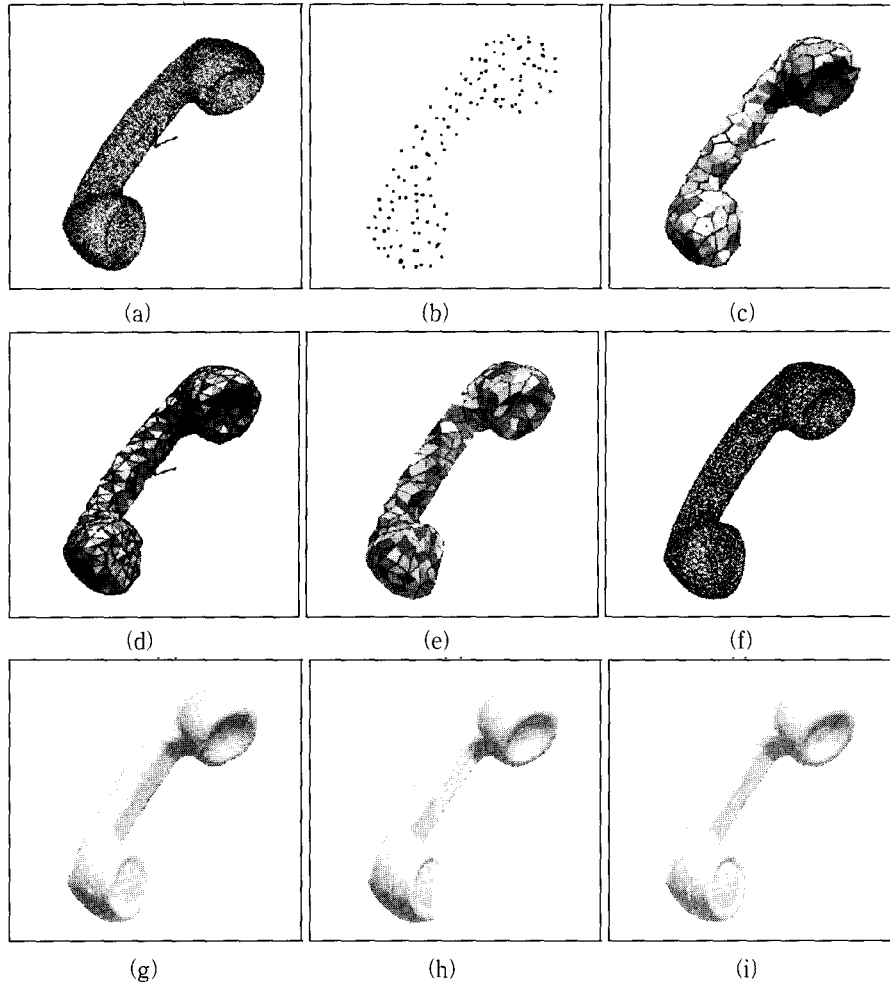


그림 10. 전화기 데이터에 대한 모델링 결과($K=130$) (a) 거리 데이터 (b) 단위 곡면의 중심 (c) 다각형면 초기모델 (d) 삼각형 초기모델 (e) 사각형면 모델(NURBS 매개 변수 공간) (f) NURBS 제어 매쉬($n=m=8$) (g) NURBS 곡면 모델($n=m=4, p=q=2$) (h) NURBS 곡면 모델($n=m=8, p=q=2$) (i) NURBS 곡면 모델($n=m=16, p=q=2$)

Fig. 10. Modeling result of the Phone data($K=80$) (a) Range data (b) Centroids of the point patches (c) Polyhedral initial model (d) Triangular initial model (e) Quadrilateral patch mode!(NURBS parameter space) (f) NURBS control mesh($n=m=8$) (g) Reconstructed NURBS($n=m=4, p=q=2$) (h) Reconstructed NURBS surface($n=m=8, p=q=2$) (i) Reconstructed NURBS surface($n=m=16, p=q=2$)

에 의하여 $b_{i,j}$ 를 추정한다.

이와 같은 방법에 의하여 NURBS 곡면 네트워크의 각각의 개별 곡면의 제어점과 매듭 벡터가 추정되어 전체적으로 NURBS 곡면 모델이 생성된다.

3. NURBS 곡면 네트워크의 연속성

본 논문에서는 NURBS 곡면 근사의 차수를 2차로 설정하였기 때문에 각각의 NURBS 곡면의 내부에서는

C^2 연속성이 만족된다. 그러나 NURBS 곡면과 곡면간의 경계선상에서는 제어점이 공유되기 때문에 기본적으로 C^0 연속성만이 만족된다. 이 때, 제어점의 조절을 통하여 이를 C^1 연속성이 만족되도록 부가 조건을 설정한다. 즉, 인접하고 있는 제어 매쉬의 공유점을 양쪽 곡면에서의 인접 제어점의 평균점으로 재설정하고 전체적인 매듭 벡터는 각각의 곡면에서의 매듭 벡터의 평균값을 취함으로써 공통 매듭 벡터를 이용한다. 이와 같은 방식으로 제안하는 기법에서 생성되는 NURBS

표 2. 근사 오차 및 수행 시간 분석

Table 2. Analysis of Modeling Error and Execution Time.

모델링 단계		토러스 모델(K=80)		전환기 모델(K=80)	
		$E_{avg}(\%)$	수행시간 (초)	$E_{avg}(\%)$	수행시간 (초)
초기 모델 생성		0.37	42	0.25	160
NURBS 매개변수 공간 생성		0.40	27	0.28	108
NURBS 모델 생성 ($n \times m$)	$n=m=4$	0.031	73	0.038	194
	$n=m=8$	0.029	276	0.029	730
	$n=m=16$	0.028	1089	0.027	2875

곡면체는 최소 G^1 연속성을 만족하게 된다.

VI. 실험 결과

제안하는 모델링 기법의 성능을 평가하기 위하여 합성 및 실제 거리 데이터에 대하여 모의 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 거리 데이터는 토러스와 전환기 모델의 거리 데이터이며 각각 16,200개와 41,522개의 점으로 이루어져 있다. 토러스 모델의 거리 데이터는 합성 데이터이며 전환기 모델의 거리 데이터는 레이저 스캐너로 취득된 10장의 range image에 대해 레지스트레이션과 인티그레이션의 과정을 거쳐 생성되었다^[2]. 그림 9 (a), 그림 10 (a)에 토러스와 전환기 모델의 거리 데이터를 각각 도시하였다. 실험에 이용된 컴퓨터는 Intel Pentium II 266Mhz이다.

토러스와 전환기의 거리 데이터에 대하여 우선 초기 모델을 추정하였다. K-평균 군집화에서의 군집의 수 K는 토러스와 전환기에 대하여 각각 80과 130으로 설정하였다. 그림 9 (b), 그림 10 (b)에 Lloyd 알고리즘^[13]에 의해 생성된 군집의 중심 $C = \{y_1, y_2, \dots, y_K\}$ 을 도시하였다. 이 군집의 중심에 대하여 거리 데이터를 군집화하여 단위 곡면을 생성하고, 생성된 단위 곡면에 대하여 다각형 근사가 수행된 다각형면 초기 모델을 그림 9 (c), 그림 10 (c)에 각각 도시하였다. 그림 9 (d), 그림 10 (d)에는 다각형면 초기 모델로부터 생성된 삼각형 초기 모델을 도시하였으며 각각 470개와 722개의 삼각형으로 근사되고 있다.

제 4장에서 기술한 바와 같이 초기 다각형면 모델과 삼각형 모델은 각각 계층적 그래프의 최상위 계층과 최하위 계층을 형성하게 된다. 이 때, 부그래프 표현을

이용한 사각형면 모델의 생성 결과는 그림 9 (e), 그림 10 (e)에 도시한 바와 같다. 그림 9 (e)와 그림 10 (e)에 도시된 사각형면 모델은 각각 235개와 361개의 사각형면으로 구성되어 있다. 모든 사각형면에 대하여 격자 구조의 NURBS 입력 메쉬가 추정되게 되면 제5장에서 기술한 바와 같이 NURBS 곡면의 제어 메쉬와 매듭 벡터를 추정할 수 있다. 전체 NURBS 네트워크의 제어 메쉬는 그림 9 (f), 그림 10 (f)에 도시하였고 해상도를 변화시키면서 생성된 NURBS 곡면을 그림 9 (g-i), 그림 10 (g-i)에 도시하였다. NURBS 근사의 차수 (order)는 모두 2차를 사용하였고, 따라서 각각의 NURBS 곡면의 내부에서는 C^2 연속성이 만족되고 곡면간의 경계에서는 G^1 연속성이 만족된다. 그림 9 (g-i), 그림 10 (g-i)에 도시한 바와 같이 해상도가 증가함에 따라 시각적인 정밀도가 향상됨을 알 수 있다.

표 2에는 각 모델링 단계에서의 근사 오차와 소요된 시간을 나타내었다. 정규 근사 오차 E_{avg} 는 물체를 포함할 수 있는 가장 작은 직육면체의 대각선 길이에 대한 전체 거리 데이터와 근사 모델간의 평균 거리의 비율을 이용하며 식 (5)와 같이 정의된다.

$$D_{avg} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} |d_i|}{N} \quad (5)$$

$$E_{avg} = \frac{D_{avg}}{L}$$

여기에서 d_i 는 각각의 거리 데이터 x_i 의 NURBS 곡면에 대한 근사 오차를 의미하며 N 은 전체 거리 데이터의 수를 나타낸다. NURBS 곡면 모델에서의 근사 오차는 삼각형 모델의 근사 오차에 비하여 $n=m=8$ 인

경우 토러스와 전화기에 대하여 각각 8%와 12% 정도의 수준으로 급격히 감소하였다. 전체 거리 데이터에 대한 오차는 약 0.03% 수준을 유지하고 있는데 이것은 거의 무시할 수 있을 정도의 오차로서 생성된 곡면 모델이 입력 거리 데이터를 그대로 표현하고 있음을 알 수 있다.

VII. 결 론

본 논문에서는 정렬되지 않은 3차원 거리 데이터로부터 NURBS 근사를 이용하여 곡면 모델을 자동 생성하기 위한 새로운 기법을 제안하였다. 제안하는 초기 모델 추정 기법에 의하여 입력 거리 데이터는 다각형 면 모델과 삼각형 모델로 근사되었으며 이를 계층적 그래프 표현 기법에 의하여 사각형면 모델로 변환하였다. 사각형면 모델은 NURBS 곡면의 매개 변수 공간을 형성하고 이로부터 NURBS 제어점과 매듭 벡터가 추정되었다. 제안하는 알고리즘은 오직 하나의 NURBS 곡면으로 물체의 형상을 근사하는 경우의 단점을 극복하여 NURBS 곡면 네트워크로 자유 곡면의 형상 모델을 근사하였다. 또한, NURBS 매개 변수 공간이 자동적으로 생성되어 거리 데이터로부터 직접 NURBS 곡면 모델을 생성하는 것을 가능하게 하였다. 그리고, 계층적 그래프 표현의 효율적 이용에 의하여 초기 모델로부터 사각형면 모델을 얻는 과정에서의 계산량을 줄이고, NURBS 제어점 추정의 현실화를 통해 생성되는 곡면이 실제 거리 데이터를 무시할 수 있을 정도로 오차로 근사하도록 하였다.

본 논문에서 제안하는 기법은 거리 데이터로부터 NURBS 곡면 모델을 얻기 위한 기본적인 틀을 제공하며 이에 기반하여 많은 연구가 진행될 수 있다. 특히, 본 연구에서는 고려하지 않은 거리 데이터의 조밀도와 곡면의 국부적인 곡률을 고려한 적응적 초기 모델의 추정 기법은 향후 반드시 고려되어야 할 문제이다. 또한 NURBS 네트워크를 구성하는 각각의 NURBS 곡면을 메쉬 구조를 적응적으로 설정하여 복잡한 곡면에 대하여 조밀한 메쉬를 생성하는 기법이 매우 바람직하다. 그러나 이러한 경우 곡면간의 경계에서의 연속성을 유지하는 것이 매우 어려운 문제가 되며 이를 수학적으로 해석하고 적용하는 과정이 반드시 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] M. Soucy and D. Laurendeau, "A general surface approach to the integration of a set of range views," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 17, no. 4, pp. 344-358, April 1995.
- [2] G. Turk and M. Levoy, "Zippered polygon meshes from range images," *Proc. of SIGGRAPH '94*, pp. 311-318, July 1994.
- [3] Curless and M. Levoy, "A volumetric method for building complex models from range images," *Proc. of SIGGRAPH '96*, pp. 303-312, Aug. 1996.
- [4] M. Eck and H. Hoppe, "Automatic reconstruction of B-spline surfaces of arbitrary topological type," *Proc. of SIGGRAPH '96*, pp. 325-334 Aug. 1996.
- [5] V. Krishnamurthy and M. Levoy, "Fitting smooth surfaces to dense polygon meshes," *Proc. of SIGGRAPH '96*, pp. 313-324, Aug. 1996.
- [6] D. R. Forsey and R. H. Bartels, "Surface fitting with hierarchical splines," *ACM Trans. on Graphics*, vol. 14, no. 2, pp. 134-161, April 1995.
- [7] M. Soucy and D. Laurendeau, "Multiresolution surface modeling based on hierarchical triangulation," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 63, no. 1, pp. 1-14, January 1996.
- [8] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald, and W. Stuetzle, "Surface reconstruction from unorganized points," *Proc. of SIGGRAPH '92*, pp. 71-78, July 1992.
- [9] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald, and W. Stuetzle, "Mesh optimization," *Proc. of SIGGRAPH '93*, pp. 19-26, August 1993.
- [10] Y. Chen and G. Medioni, "Description of complex objects from multiple range images using an inflating balloon model," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 61,

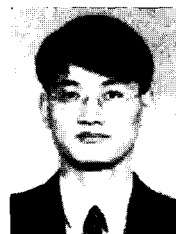
- no. 3, pp. 325-334, May 1995.
- [11] M. J. Milroy, C. Bradley, G. W. Vickers, and D. J. Weir, "G1 continuity of b-spline surface patches in reverse engineering," *Computer-Aided Design*, vol. 27, pp. 471-478, 1995.
- [12] W. Ma and J. P. Kruth, "Parameterization of randomly measured points for least square fitting of b-spline curves and surfaces," *Computer-Aided Design*, vol. 27, no. 9, pp. 663-675, 1995.
- [13] A. Gersho and R. M. Gray, *Vector quantization and signal compression*, Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [14] J. L. Marroquin and F. Girosi, "Some extensions of the K-means algorithm for image segmentation and pattern recognition," AI Memo 1930, MIT Artificial Intelligence Laboratory, January 1993.
- [15] D. H. Chung, I. D. Yun, and S. U. Lee, "Registration of multiple range views using the reverse calibration technique," *Pattern Recognition*, vol. 31, no. 4, April 1998.
- [16] I. K. Park and S. U. Lee, "Geometric modeling from scattered 3-D range data," *Proc. of IEEE International Conference on Image Processing*, vol. 2, pp. 712-715, October 1997.
- [17] I. K. Park, I. D. Yun, and S. U. Lee, "Constructing NURBS surface model from scattered and unorganized range data," *Proc. of Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 312-321, October 1999.
- [18] 박인규, 이경무, "정렬되지 않은 3차원 거리 데이터로부터의 다중 해상도 삼각형 메쉬 모델의 생성 기법," *한국통신학회 논문지*, vol. 23, no. 10, pp. 2799-2810, 1998년 10월.
- [19] G. Farin, *Curves and surfaces for computer aided geometric design*, Academic Press, 1990.
- [20] L. Piegl and W. Tiller, *The NURBS book*, Springer-Verlag, 1995.

 저 자 소 개



朴仁圭(正會員)

1972년 28일생. 1995년 2월 서울대학교 제어계측공학과 학사. 1997년 2월 서울대학교 제어계측공학과 석사. 1997년 3월~현재 서울대학교 전기공학부 박사과정. 주관심 분야는 컴퓨터 비전, 그래픽스, 멀티미디어 응용



尹逸東(正會員)

1965년 7월 21일생. 1989년 2월 서울대학교 제어계측공학과 학사. 1991년 2월 서울대학교 제어계측공학과 석사. 1996년 8월 서울대학교 제어계측공학과 박사. 1996년 9월~1997년 2월 대우전자 영상연구소 선임연구원. 1997년 3월~현재 한국외국어대학교 전자 제어공학부 조교수 주관심 분야는 영상신호처리, 3차원 데이터 취득 및 모델링 기법, 내용기반의 영상/3D 데이터 처리



李商郁(正會員)

1949년 8월 11일생. 1973년 2월 서울대학교 전기공학과 학사. 1976년 5월 Iowa State University 전기공학과 석사. 1980년 2월 Univ. of Southern California 전기공학과 박사. 1980년 1월~1981년 10월 M/A-COM 연구소 선임연구원. 1983년 3월~현재 서울대학교 전기공학부 교수 주관심분야는 영상부호화, 컴퓨터 비전, 영상처리 등