

적층 쾌속조형 시스템을 위한 시뮬레이티드 어닐링 경사절단 알고리즘

論 文
53D-4-4

A Simulated Annealing Tangential Cutting Algorithm for Lamination Rapid Prototyping System

金明淑* · 嚴泰俊** · 金承禹*** · 千仁國§ · 孔容海§§
(Myoung-Sook Kim · Tai-Joon Um · Seung-Woo Kim · In-Gook Chun · Yong-Hae Kong)

Abstract - A rapid prototyping system that laser-cuts and laminates thick layers can fabricate 3D objects promptly with a variety of materials. Building such a system must consider the surface distortions due to both vertical-cut layers and triangular surfaces. We developed a tangential layer-cutting algorithm by rearranging tangential lines such that they reconstruct 3D surfaces more closely and also constitute smoother laser trajectories. An energy function that reflects the surface-closeness with the tangential lines was formulated and then the energy was minimized by a gradient descent method. Since this simple method tends to cause many local minima for complex 3D objects, we tried to solve this problem by adding a simulated annealing process to the proposed method. To view and manipulate 3D objects, we also implemented a 3D visual environment. Under this environment, experiments on various 3D objects showed that our algorithm effectively approximates 3D surfaces and makes laser-trajectory feasibly smooth.

Key Words : rapid prototyping, surface reconstruction, tangential cutting, energy minimization, simulated annealing

1. 서 론

컴퓨터 3D 형상으로부터 물리적인 형상을 빠르게 조형하는 것을 RP(Rapid Prototyping : 쾌속 조형)라 하며, FDC(Fusion Deposition of Ceramics), SLA(Stereo Lithography Apparatus), SLS(Selective Laser Sintering)등의 방법이 있다. 대표적으로 많이 사용되는 SLA나 SLS는 가공이 쉬운 액상이나 분말 형태의 특수한 광경화 수지 재료에 레이저빔을 조사하여 재료를 경화시키는 방법을 사용한다. 이러한 방법은 약 0.1mm 두께로 재료를 적층하므로 모형 제작에 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라, 특정 재료만 사용해야 하는 제약점을 가진다[1]. 본 연구팀은 이와 같은 문제점들을 보완하기 위해 세라믹, 폴리머, 금속 등의 다양한 재료를 약 1~10mm 두께로 레이저 절단하여 신속하게 적층하는 RP 시스템을 개발하고 있다[2],[3].

두께를 가진 층 단위 조형방식의 RP 시스템에서 각 층을 수직 절단하여 적층하게 되면 3D 형상의 층과 층 사이에 계단형의 표면 왜곡이 발생하게 된다[4]. 그림 1(a)의 3D 형상을 수직 절단하여 적층할 경우 그림 1(b)와 같은 표면 왜곡이 발생하게 된다. 층의 수직절단에 의한 표면 왜곡현상은 층의 단면을 경사지게 절단함으로써 크게 완화될 수 있다. 그림 1(c)는 각 층을 경사절단하여 적층한 예로서 그림 1(b)

보다 원형상인 그림 1(a)를 매우 충실하게 복원 가능함을 보인다.

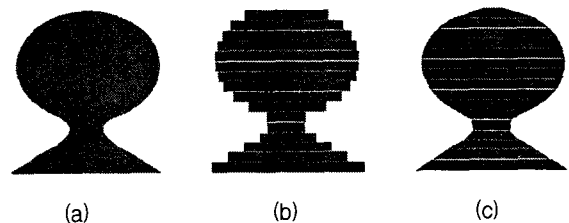


그림 1 수직 및 경사 절단에 의해 적층된 3D 형상 (a) 원형상 (b) 수직절단에 의해 적층된 형상 (c) 경사절단에 의해 적층된 형상

Fig. 1 Laminated 3D Objects with Vertical-cut and Tangential-cut Layers (a) Original Shape (b) Laminated Shape with Vertical-cut Layers (c) Laminated Shape with Tangential-cut Layers

3D 형상의 층 재구성은 그림 2(a)와 같이 층 표면을 여러 개의 삼각형으로 구성하는 방법이 많이 사용되고 있다. 그러나 삼각형만으로는 복잡한 형태의 층 표면을 충실히 근사화 하는데 한계가 있다. 또한, 삼각형으로 이루어진 불연속적인 표면을 따라 레이저 구동부가 움직이기에는 동역학적으로 실현하기에 부적절할 뿐만 아니라 레이저 빔이 한 곳에 계속 머무르게 되므로 특정 부분이 과도하게 타는 현상을 유발하게 된다. 이러한 문제점들은 그림 2(b)와 같이 층 표면을 마치 기차 레일의 침목처럼 위·아래 단면 윤곽을 연결하는 경사진 선분들의 부드러운 나열로 재구성함으로써 해결될 수 있다. 이렇게 나열된 경사선분 집합은 층의 표면을 충실히

* 正 會 員 : 順天鄉大 工大 電算學科 博士課程

** 正 會 員 : 順天鄉大 工大 機械工學科 教授 · 工博

*** 正 會 員 : 順天鄉大 工大 情報技術工學部 副教授 · 工博

§ 非 會 員 : 順天鄉大 工大 情報技術工學部 副教授 · 工博

§§ 非 會 員 : 順天鄉大 工大 情報技術工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2003年 8月 10日

最終完了 : 2004年 2月 4日

근사화함과 동시에 레이저의 구동에 적합한 궤적을 생성할 수 있다.

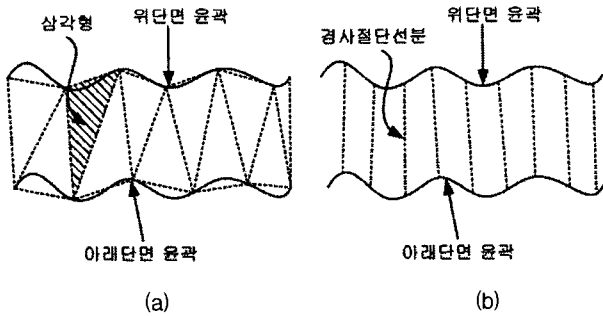


그림 2 3D 형상의 층 표면 재구성 방법 (a) 삼각형에 의한 표면 재구성 (b) 경사절단선분에 의한 표면 재구성
 Fig. 2 Layer Surface Reconstruction of 3D Shape (a) Surface Reconstruction by Triangles (b) Surface Reconstruction by Tangential Lines

본 연구는 3D 형상과 경사절단선분 등을 시각화하는 그래픽 환경을 먼저 구축한 후, 복잡한 3D 형상의 층 표면을 경사절단선의 집합으로 효과적으로 재구성하는 알고리즘을 다음과 같이 개발하였다.

먼저 경사절단선분의 길이와 중간단면과의 거리를 이용하여 층 표면에 대한 경사절단선분의 근사화 정도를 반영하는 에너지를 정의하였다. 효과적인 경사절단선분의 탐색은 이 에너지를 최소화함으로써 이루고자 하였다. 에너지 최소화는 급강하법을 이용하여 어느 정도 달성할 수 있으나 이 방법은 에너지가 감소하는 방향으로만 경사절단선분을 재배열하므로 층의 표면이 복잡할 경우 부적합한 위치에 탐색이 귀착하는 지역 최소화(Local Minima)가 다수 발생할 수 있다. 시뮬레이티드 어닐링은 에너지가 증가할 경우에도 확률적 상태 이동을 허용하므로 지역 최소해에 귀착하지 않고 전역 최소해에 도달할 가능성을 증대시킬 수 있으므로 이를 경사절단선분 탐색에 추가 적용하였다. 결과적으로, 효과적인 경사절단선분을 탐색하는 문제를 에너지 최소화 알고리즘으로 변환하여 급강하법과 시뮬레이티드 어닐링에 의해 에너지를 최소화함으로써 복잡한 3D 형상의 층을 충실하게 재구성하는 방법을 개발하였으며, 그 효과를 다양한 3D 형상에 실험하였다.

2. RP 시스템의 그래픽 환경 구축

RP의 자료교환 표준형식인 STL(Stereolithography) 파일을 입력받아 물리적 형상을 빠르게 적층구조화하는 RP 시스템은 STL 형상을 여러 가지 형태로 조작하고, 단면과 경사절단 등을 시각적으로 확인할 수 있는 그래픽 환경을 요구한다. 본 연구는 구조적인 문제점을 가지는 STL 파일을 먼저 RPI 파일로 변환하고, 3D 형상을 조작할 수 있는 뷰어를 개발하였으며, 적층구조화에 반드시 필요한 단면을 생성하였다.

2.1 RPI 파일 변환

RP 시스템은 3D 형상의 기하학적 정보를 패싯(평면삼각형)들의 집합으로 표현한 STL 파일을 사용한다. 그러나

STL 파일은 다음과 같은 몇 가지 구조적인 문제점을 갖는다. 첫째, 정점들이 다수의 패싯에 중복 저장되어 있다. 둘째, 패싯이 서로 인접되어 있으나 공유된 정점을 독립적으로 표현한다. 따라서 비주얼 환경에서 STL 파일을 디스플레이하거나 단면의 교차점을 탐색하는 경우, 정점의 공유 정보나 패싯의 인접 정보 등을 사용할 수 없으며 데이터의 중복 참조로 인한 연산속도 저하 등을 초래하게 된다.

이를 보완하기 위해 STL 파일을 그림 3과 같은 구조의 RPI 파일로 변환하였다. RPI 파일 구조에서 각 정점은 중복이 제거된 유일한 좌표값으로 표현되고, 각 선분은 선분을 구성하는 두개의 정점 정보와 선분을 공유하는 두개의 패싯 정보로 표현된다. 또한 각 패싯은 패싯을 구성하는 세 개의 정점 정보, 세 개의 선분 정보, 패싯에 인접한 세 개의 패싯 정보, 그리고 방향 벡터 값으로 표현된다. 이러한 구조는 중복된 정점 정보를 제거함으로써 파일의 크기를 작게 할 뿐 아니라, 단면 추출 과정에서 참조할 수 있는 교차점 이동방향, 인접 패싯 정보, 공유 선분 정보 등을 포함하고 있기 때문에 교차점 탐색 시 매우 효과적인 정보를 제공할 수 있다[5].

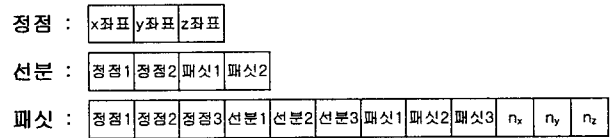


그림 3 RPI 파일의 개체 구조
 Fig. 3 Structure of Entities in RPI File

그림 4는 여러 개의 패싯으로 구성된 3D 형상의 일부를 RPI 파일의 패싯 표현 방법으로 나타낸 예이다. 각 패싯F[0], F[1], ..., F[n]은 패싯을 구성하는 세 개의 정점 정보, 세 개의 선분 정보 그리고 패싯에 인접한 세 개의 패싯 정보를 포함하고 있다.

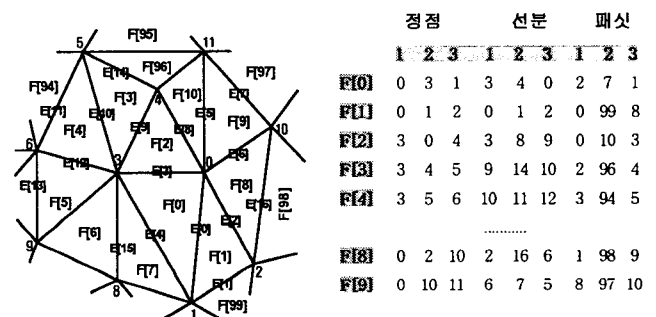


그림 4 패싯 개체의 RPI 표현
 Fig. 4 RPI Representation of Facet Entity

2.2 RPI 파일을 이용한 단면정보 추출

RPI 파일을 대상으로 단면을 생성할 때, 슬라이스 되는 경계선 윤곽의 탐색은 격자 모양의 표면에서 삼각형 패싯의 선분과 슬라이스 단면의 교차정보를 고려한다. 임의의 선분에서 슬라이스 단면의 초기 점이 결정되면 이 선분을 마킹하고, 이 선분을 공유하는 인접 패싯 정보를 참조하여 일정한 방향

으로 이동하면서 교차점을 탐색한다[6]. 그림 5에서 화살표의 흐름은 RPI 파일 정보를 이용한 슬라이스 단면의 교차점 탐색 과정을 나타낸다.

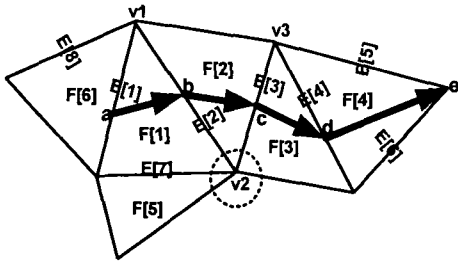


그림 5 슬라이스 단면의 교차점 탐색
Fig. 5 Cross Point Search

슬라이스 단면과 교차되는 선분에서의 교차점 탐색은 슬라이스 단면의 높이 Z_h 를 기준으로 세 가지로 분류할 수 있다. 첫째, 교차선분의 한 정점 v_{zi} 에 대하여 " $v_{zi} > Z_h$ "일 경우, 둘째, " $v_{zi} < Z_h$ "일 경우, 셋째, " $v_{zi} = Z_h$ "일 경우이다. 여기서 Z_h 는 슬라이스 평면의 높이, v_{zi} 는 $i(i=0, 1, 2, \dots)$ 번째 정점의 z 좌표를 나타낸다. 그림 5에서 슬라이스 될 초기 위치 a를 결정하고, 점 a가 위치한 선분 E[1]과 선분 E[1]을 포함한 패시 F[1]을 참조하여 나머지 두 선분 E[2], E[7]을 탐색한다. 두 선분 E[2], E[7]을 구성하는 각 정점의 z 좌표와 주어진 슬라이스 평면의 높이 Z_h 를 비교하여 교차점 위치를 추정한다. 이 경우 정점 v_1, v_2 에 대하여 " $v_{z2} < Z_h$ "이고 " $v_{z1} > Z_h$ "이므로 탐색할 교차점 b는 선분 E[2] 상에 있음을 알 수 있다. 탐색된 교차선분 E[2]에서 교차점 b는 식 (1)에 의하여 구할 수 있다. 여기서, (x_1, y_1, z_1) 과 (x_2, y_2, z_2) 는 선분 E[2]를 구성하는 두 정점 v_1, v_2 이며 Z_h 는 슬라이스 단면의 높이이다.

$$\begin{bmatrix} x_h \\ y_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 + \frac{Z_h - z_1}{z_2 - z_1}(x_2 - x_1) \\ y_1 + \frac{Z_h - z_1}{z_2 - z_1}(y_2 - y_1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.3 3D 뷰어 구현

3D 형상을 3차원으로 비주얼하게 표현하고 조작할 수 있도록 구현된 3D 그래픽 뷰어는 아스키 형식 및 바이너리 형식의 STL 파일과 RPI 파일을 모두 입력으로 사용할 수 있으며, 화면 표시 모드(솔리드 모드, 와이어프레임 모드), 확대·축소, 자유각도 회전, 바탕화면과 객체의 색상설정, 좌표축 표시, 광원 효과 등의 기능을 포함하고 있다. 또한 경사절단선분 탐색에 반드시 필요한 단면 생성 기능과 경사절단선분들을 탐색하여 재배치한 결과를 디스플레이 하는 기능 등을 포함한다.

그림 6은 구축된 3D 뷰어에서 STL 파일을 디스플레이 한

것이다. 그림 7은 3D 객체를 확대, 축소, 회전시킨 결과와 네 개의 단면으로 슬라이싱한 결과를 디스플레이 한 것이다.

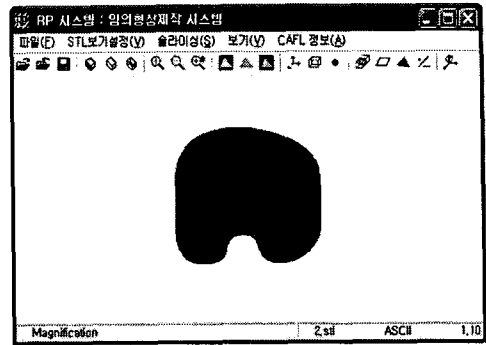


그림 6 3D 뷰어 디스플레이
Fig. 6 3D Viewer Display

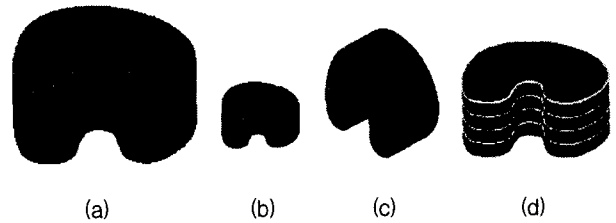


그림 7 뷰어의 기본 조작 (a) 확대 (b) 축소 (c) 회전 (d) 슬라이싱
Fig. 7 Viewer Basic Manipulation (a) Enlargement (b) Shrinking (c) Rotation (d) Slicing

3. 경사절단선분 탐색 알고리즘

두께를 가진 층 단위 적층 RP 시스템은 세라믹, 폴리머, 금속 등 다양한 재료를 사용하고, 조형시간을 단축하기 위해 레이저를 사용하여 두꺼운 층의 재료를 절단하여 적층한다. 두께를 가진 층들을 수직 절단하여 적층하게 되면 층과 층 사이에 계단형의 표면 왜곡이 발생하게 된다. 이러한 문제는 재료를 절단할 때 수직으로 절단하지 않고 경사면을 따라 절단하면 적층된 층의 경계면이 부드럽게 연결되어 표면 왜곡 문제를 해결할 수 있다.

층 표면을 여러 개의 삼각형으로 구성하는 방법은 층 표면이 타일 형태가 되어 3D 형상의 표면을 원형에 가깝게 근사화하는데 한계가 있을 뿐만 아니라, 삼각형으로 구성된 층 표면은 레이저 구동부가 움직이기에 부적절한 객체가 된다. 본 논문에서는 3D 형상의 표면을 보다 근접하게 재구성하고 레이저의 움직임을 부드럽게 하기 위해 층의 표면을 경사절단 선분의 집합으로 재구성하였다. 그림 2(b)와 같이 층 표면을 마치 기차 레일의 침목처럼 위·아래 단면을 연결하는 선분으로 나열함으로써 3D 형상의 표면을 충실히 근사화하고, 레이저의 구동에 적합한 객체를 생성하고자 하였다.

3D 형상의 표면을 경사선분의 집합으로 재구성하기 위한 효과적인 경사선분 탐색 알고리즘은 다음과 같다. 먼저, 경사절단 선분으로 층 표면을 보다 충실하게 근사화하기 위해서, 경사절단선분의 길이와 중간단면에서 얻어지는 중간지점과의

거리로 에너지 함수를 정의하였다. 그림 8은 하나의 층에서 경사절단선분의 길이와 중간단면의 점과의 관계를 나타낸 것이다. 두 선분 $\overline{P_i Q_i}$, $\overline{M_i a_i}$ 의 길이로 정의된 에너지 함수는 층 표면에 대한 경사절단선분의 근사화 정도를 반영하게 되며, 효과적인 경사절단선분은 이 에너지를 최소화하는 알고리즘에 의하여 구할 수 있다. 그림 8에서 사용한 변수들은 다음과 같다.

- P_i : 위 단면 윤곽의 i 번째 좌표 (x, y)
- Q_i : 아래 단면 윤곽의 i 번째 좌표 (x, y)
- M_i : 중간 단면 윤곽의 i 번째 좌표 (x, y)
- U_i : P_i 와 Q_i 를 연결한 경사절단 선분의 길이
- V_i : 경사절단선분의 중간점과 M_i 사이의 거리

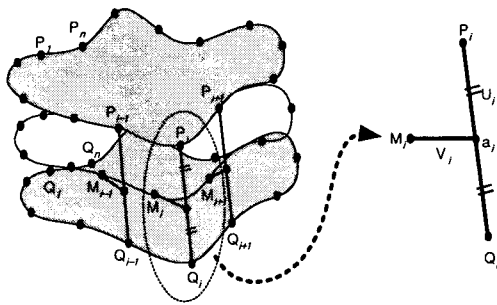


그림 8 한 층에서의 경사절단선분
Fig. 8 Tangential-cut Lines in a layer

그림 8에서 P_i 와 Q_i 를 연결한 i 번째 경사절단선분의 에너지는

$$E_i(P_i, Q_i) = \frac{1}{2} (K_V V_i^2 + K_U U_i^2) \quad (2)$$

로 정의된다. 여기서

$$V_i = \sqrt{\left(x_{M_i} - \frac{x_{P_i} + x_{Q_i}}{2}\right)^2 + \left(y_{M_i} - \frac{y_{P_i} + y_{Q_i}}{2}\right)^2} \quad (3)$$

은 U_i 의 중간점과 중간단면의 점 M_i 와의 거리이다. 그리고

$$U_i = \sqrt{(x_{P_i} - x_{Q_i})^2 + (y_{P_i} - y_{Q_i})^2} \quad (4)$$

는 위·아래 단면을 연결하는 경사절단선분의 거리이다. 상수 K_V 와 K_U 는 에너지 함수의 수렴률을 결정하기 위한 가중치이다.

식 (3)과 (4)를 식(2)에 대입하면, i 번째 경사절단선분의 에너지

$$E_i(P_i, Q_i) = \frac{1}{2} K_V \left[\sqrt{\left(x_{M_i} - \frac{x_{P_i} + x_{Q_i}}{2}\right)^2 + \left(y_{M_i} - \frac{y_{P_i} + y_{Q_i}}{2}\right)^2} \right]^2 + \frac{1}{2} K_U \left[\sqrt{(x_{P_i} - x_{Q_i})^2 + (y_{P_i} - y_{Q_i})^2} \right]^2 \quad (5)$$

가 되고, 모든 경사절단선분의 에너지 합

$$E = \sum_{i=1}^n E_i(P_i, Q_i) \quad (6)$$

가 된다. 여기서 n 은 경사절단선분의 수이다.

총 에너지 E 가 최소화된다는 것은 모든 경사절단선분이 최대한 짧아지고, 중간단면에 최대한 근접하게 됨을 의미한다.

다. 총 에너지 E 의 최소화는 급강하법 (Gradient Descent Method)에 의해 추구되는데, 점 Q_i 에 대한 E_i 의 편미분은 다음의 ΔQ_i 에 의한 근사식으로 표현된다.

$$\frac{\partial E_i}{\partial Q_i} \approx \frac{\Delta E_i}{\Delta Q_i} = \left[\frac{E_i(P_i, Q_i + \Delta Q_i) - E_i(P_i, Q_i)}{\Delta Q_i} \right]. \quad (7)$$

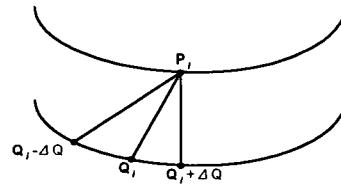


그림 9 경사선분 탐색
Fig. 9 Tangential-cut Line Search

그림 9와 같이 위 단면의 점 P_i 에서 i 번째 경사절단선분을 탐색하기 위해서, 아래 단면에서 초기 연결 선분의 점 Q_i 와 인접한 두 점 $Q_i + \Delta Q$, $Q_i - \Delta Q$ 에서 각각의 에너지를 식 (5)로 구한다. 세 점에서 구한 에너지를 이용하여 점 Q_i 에서 각 두 지점과의 에너지 차이를 식 (7)로 계산하고, 두 개의 에너지 차이를 비교하여 그 차이가 작아지는 방향으로 ΔQ 만큼 점 Q_i 를 이동시킨다. 이 과정을 n 개의 점에 대하여 각각 반복적으로 적용한다. 표 1에 급강하법을 적용한 경사절단선분 추출 알고리즘을 요약하였다.

표 1 급강하법에 의한 경사절단선분 탐색 알고리즘
Table 1 Tangential-cut Line Search by Gradient Descent Method

1. 위, 아래, 중간단면을 n 개의 점으로 일정한 간격으로 나눈다.
2. 점 P_i 와 Q_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)를 일대일로 연결하여 n 개의 초기 경사절단선분을 구성한다.
3. i 번째 점 Q_i 와 이동 가능한 변위 점 $Q_i + \Delta Q$, $Q_i - \Delta Q$ 에서 각각 식 (5)를 이용하여 에너지 차이를 구한다.
4. 에너지 차이가 작은 위치로 점 Q_i 를 ΔQ 만큼 이동한다.
5. 단계 3과 4를 모든 n 개의 점에 대하여 반복한다.
6. 에너지 값의 변화가 특정 임계치 이하가 될 때까지 단계 3, 4, 5를 반복한다.

4. 시뮬레이티드 어닐링에 의한 경사절단선분 탐색

3장의 경사절단선분 탐색에서는 급강하법을 사용하였다. 급강하법은 층 표면을 근사화하는 과정에서 최적 경사절단선분의 위치를 찾기 위해 에너지가 작아지는 방향으로만 이동하는 간단한 알고리즘이다. 이 방법은 3D 형상의 층 표면이 단순할 경우에는 문제가 발생하지 않지만, 요철이 심한 복잡한 형태일 경우에는 적합하지 않은 위치를 최소해로 판단하

는 지역 최소해 문제가 발생할 수 있다. 그림 10(a)의 예에서 살펴보면, 위 단면의 점 P_i 와 아래 단면의 점 Q_{i+2} 가 서로 연결되는 경우에 경사절단선분의 길이가 가장 짧아지며 가장 적합한 표면의 형태를 구성한다. 그러나 경사절단선분의 초기 연결점이 점 P_i 와 점 Q_i 일 경우 급강하법을 사용하게 되면, 인접한 두 점 Q_{i-1} 과 Q_{i+1} 모두 에너지가 증가하게 되므로 전역 최소해인 Q_{i+2} 에 도달하지 못하고 점 Q_i 에 귀착하게 된다. 즉, 급강하법은 경사선분의 에너지 값이 감소하는 방향으로만 이동하므로 점 Q_i 주변에 위치한 점들의 에너지 값이 증가하면 Q_i 를 최적 위치로 판단하고 알고리즘이 진행되어도 더 이상 위치 이동이 발생하지 않는다. 이는 그림 10(b)의 에너지 공간에서 급강하법이 지역 최소해에 귀착한 경우 전역 최소해로 천이하지 못하는 경우와 같다. 결국 점 Q_i 와 점 P_i 를 연결한 선분이 경사선분으로 결정되어 층 표면을 효과적으로 근사화시키는데 실패한다.

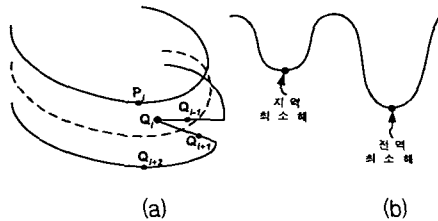


그림 10 (a) 지역 최소해의 발생 예 (b) 지역 최소해 발생시 에너지 공간
Fig. 10 (a) Example of a Local Minima (b) The Energy Space

그림 11은 실제로 3D 형상의 한 층에 급강하법을 적용하여 경사절단선분을 탐색한 결과로서 여러 개의 경사절단선분이 보다 적절한 위치로 이동하지 못하고 지역 최소해에 귀착하였음을 보여준다.

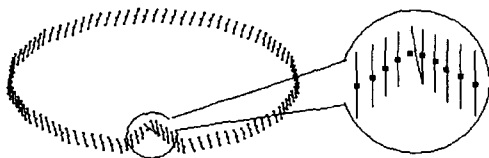


그림 11 경사절단선분의 지역 최소해
Fig. 11 Local Minima of Tangential-cut Lines

3장의 급강하법이 그림 11과 같은 지역 최소해에 귀착하는 문제를 해결하기 위해 시뮬레이티드 어닐링에 의한 에너지 최소화 방법으로 경사절단선분을 최적화하였다. 시뮬레이티드 어닐링은 고체를 고온으로 가열하였다가 서서히 냉각시키면서 고체의 강도나 결정성을 향상시키는 물리적인 과정을 시뮬레이션하는 알고리즘으로 지역적인 최소해에 귀착하는 단점을 개선한 최적화 기법이다. 시뮬레이티드 어닐링은 상태 Q_i 와 온도 T 로부터 시작하여 온도를 낮추면서 상태를 변화시켜 온도가 일정한 값이 되었을 때의 상태를 최적해로 결정한다. 각 온도에서는 연속적으로 이동 가능한 변위의 점

$Q_i + \Delta Q$ (또는 $Q_i - \Delta Q$)를 랜덤하게 생성하여 $Q_i + \Delta Q$ (또는 $Q_i - \Delta Q$)의 에너지가 Q_i 의 에너지보다 작으면 새로운 상태로의 전이를 허용하고, 크면 확률적으로 상태의 전이가 일어날 수 있도록 한다. 높은 온도에서 서서히 식히면서 에너지가 증가할 때에도 확률적으로 상태의 이동을 허용하므로 지역 최소해를 피하여 전역 최소해에 이르게 된다[7]. 본 연구에서 적용한 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘을 요약하면 표 2와 같다.

표 2 시뮬레이티드 어닐링에 의한 경사절단선분 탐색 알고리즘

Table 2 Tangential-cut Line Segment Search by Simulated Annealing

1. 온도 T 를 초기화하고 초기 상태 Q_i 를 설정한다.
2. 다음의 과정을 평형상태에 이를 때까지 반복한다.
 - (a) 초기 상태 Q_i 에서 에너지를 구하고, $Q_i + \Delta Q$ 또는 $Q_i - \Delta Q$ 중 이동 위치를 결정하는 0에서 1사이의 랜덤(Random)값을 발생시킨다.
 - i. 랜덤값 ≥ 0.5 : 이동할 위치는 $Q_i + \Delta Q$
 - ii. 랜덤값 < 0.5 : 이동할 위치는 $Q_i - \Delta Q$
 - (b) 이동 위치가 $Q_i + \Delta Q$ 일 경우, 현재 위치 Q_i 와 에너지 차이값 $\Delta E = E(Q_i) - E(Q_i + \Delta Q)$ 를 구한다.
 - i. $\Delta E \geq 0$: 새로운 위치 $Q_i + \Delta Q$ 로 이동
 - ii. $\Delta E < 0$: $e^{-\frac{\Delta E}{T}}$ 의 확률에 의해 $Q_i + \Delta Q$ 로 이동
 - (c) 이동 위치가 $Q_i - \Delta Q$ 일 경우, 현재 위치 Q_i 와 에너지 차이값 $\Delta E = E(Q_i) - E(Q_i - \Delta Q)$ 를 구한다.
 - i. $\Delta E \geq 0$: 새로운 위치 $Q_i - \Delta Q$ 로 이동
 - ii. $\Delta E < 0$: $e^{-\frac{\Delta E}{T}}$ 의 확률에 의해 $Q_i - \Delta Q$ 로 이동
3. 온도 T 를 감소시킨다.
4. 온도 T 가 임계치 이하가 될 때까지 단계 2와 3을 반복한다.

표 2에서 요약한 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘을 간단히 설명하면 다음과 같다. 먼저, 시뮬레이티드 어닐링 과정을 제어하는 변수인 온도 T 를 초기화한다. 현재 위치와 이동하려는 새로운 위치의 에너지를 구하고, 두 위치 사이의 에너지 차이를 구한다. 이동할 새로운 위치의 에너지가 현재 위치의 에너지보다 작을 경우 이동시키고, 그렇지 않을 경우는 볼츠만 확률에 의해 이동시킨다. 볼츠만 확률 m 은 식 (8)과 같다.

$$m = e^{-\frac{\Delta E}{T}} \tag{8}$$

여기서 T 는 온도이고, ΔE 는 Q_i 와 $Q_i + \Delta Q$ (또는 $Q_i - \Delta Q$)의 에너지의 차이로서 다음 식 (9)와 같다.

$$\Delta E = E(Q_i) - E(Q_i + \Delta Q) \tag{9}$$

즉, 온도 T 가 클 때에는 확률 $e^{-\frac{\Delta E}{T}}$ 는 ΔE 의 영향을 많이 받지 않아 새로운 상태의 에너지가 매우 커져도 이동을

허락할 가능성이 크고, 온도 T가 작아지면 $e^{-\frac{\Delta E}{T}}$ 는 ΔE 의 영향을 많이 받게 되어 에너지 증가량이 적은 경우에만 이동을 허락하게 된다. 이와 같은 과정을 정해진 횟수만큼 반복한 후, 온도감소 상수를 이용하여 온도를 서서히 감소시킨다. 온도는 계속 감소되다가 일정 수준 이하가 되면 시뮬레이티드 어닐링을 종료한다. 이때 온도감소 상수는 적절한 범위 (0.95~0.999) 내에서 정해주는 것이 좋다. 만일 온도감소상수가 너무 작으면 시뮬레이티드 어닐링이 너무 빨리 종료되어 좋은 해를 찾지 못하게 되고, 반대로 너무 크면 해를 찾기 위해 많은 계산 시간이 소요된다[8],[9]. 경사절단선분 탐색 시 급강하법과 시뮬레이티드 어닐링의 시간적 효율을 고려해 보면, 시뮬레이티드 어닐링이 급강하법에 비하여 보다 많은 수행 시간을 필요로 한다.

그러나 본 연구에서 경사절단선분 탐색 과정은 오프라인 상태에서 수행되기 때문에 경사절단선분 탐색 시간은 3D 모형의 제작 시간에 영향을 주지 않는다. 따라서 경사절단선분 탐색의 소요시간이 많고 적음보다는 얼마나 경사절단선분이 최적화 되는가가 더 중요하다.

5. 실험 결과

3장에서 제안한 급강하법과 4장에서 제안한 시뮬레이티드 어닐링에 의하여 경사절단 선분을 구하는 일련의 실험을 다양한 3D 형상을 대상으로 수행하였다. 3D 형상을 경사절단선분이 얼마나 충실히 재구성하는가를 세부적으로 살펴보기 위하여 슬라이스된 하나의 층에 대한 상세 실험을 먼저 수행하였다. 이어서, 전체 형상에 대한 종합적 비교 실험하였다. 상세 실험은 그림 12의 예와 같이 이루어졌다. 그림 12(a)의 3D 형상을 그림 12(b)와 같이 여러 개의 층으로 슬라이스하고, 그림 12(c)와 같이 경사선분을 초기화한 후 하나의 층을 분리하였다. 그림 12(d)와 같이 슬라이스된 한 개의 층에 대하여 경사절단선분 탐색의 효과를 실험하였다.

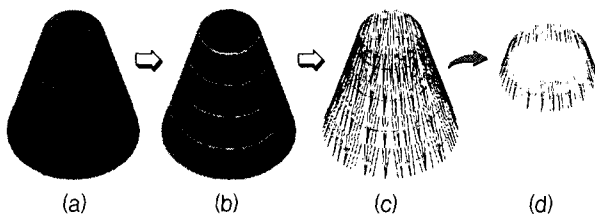


그림 12 상세실험 과정

- (a) 원 형상
- (b) 슬라이스된 층 형상
- (c) 각 층의 초기 경사선분
- (d) 실험 대상 층

Fig. 12 Detailed Experiment Sequences

- (a) Original Object
- (b) Sliced Layers
- (c) Initial Tangential-Lines
- (d) An Experimental Layer

본 실험은 3D 형상의 다양한 특징을 고려하여 그림 13의 같은 네 가지 형태의 모형을 대상으로 하였다. 경사절단선분

탐색 실험은 네 가지 모형에 대하여 급강하법과 시뮬레이티드 어닐링을 적용하고, 그 결과를 에너지의 변화와 최종 생성된 경사절단선분 패턴으로 나타내어 비교 분석하였다.

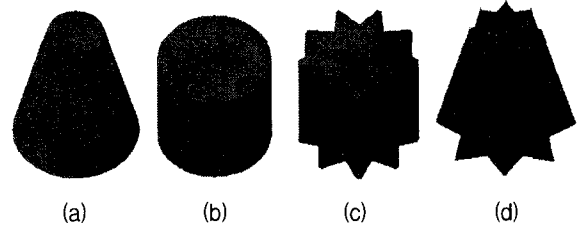


그림 13 실험에 사용한 3D 형상

- (a) 원뿔
- (b) 원기둥
- (c) 톱니형 원기둥
- (d) 톱니형 원뿔

Fig. 13 Experiments on 3D Objects

- (a) Cone
- (b) Cylinder
- (c) Toothed-Cylinder
- (d) Toothed-Cone

그림 14는 그림 13의 실험대상 3D 형상을 그림 12의 과정에 의해 추출된 하나의 층에 대한 경사절단선분의 초기 상태를 나타낸 것이다. 그림 14의 각 층의 초기 상태로부터 급강하법과 시뮬레이티드 어닐링에 의한 경사절단선분의 탐색 과정을 실험하였다.

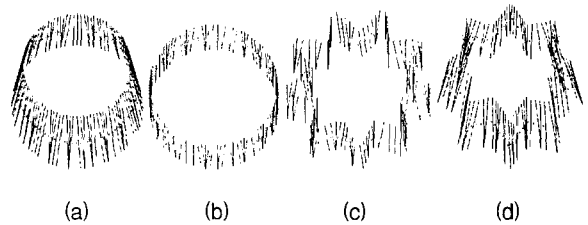


그림 14 경사절단선분의 초기 상태

- (a) 원뿔 층
- (b) 원기둥 층
- (c) 톱니형 원기둥 층
- (d) 톱니형 원뿔 층

Fig. 14 Initial Tangential Lines

- (a) A Layer of Cone
- (b) A Layer of Cylinder
- (c) A Layer of Toothed-Cylinder
- (d) A Layer of Toothed-Cone

그림 15는 그림 14(a)의 원뿔 층에 대하여 급강하법을 적용한 경우와 시뮬레이티드 어닐링을 적용한 경우에 탐색된 경사절단선분 패턴을 비교한 것이다. 그림 15(a)는 원뿔 층에 급강하법을 적용했을 때, 경사절단선분이 중간단면 점과의 거리가 최소화되지 못한 부적합한 지역 최소해에 귀착했음을 보인다. 반면에 시뮬레이티드 어닐링을 적용하였을 때에는 그림 15(b)와 같이 지역 최소해가 대부분 제거되어 경사절단선분이 중간단면 점과의 거리가 최소화된 위치에 있음을 보였다. 두 방법에 의하여 재배치된 경사선분 패턴의 시각적인 차이는 그림 15(c)의 수렴된 에너지 값에서도 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 시뮬레이티드 어닐링에 의해 재구성된 경사절단선분 집합이 층의 표면을 보다 충실하게 근사화 하였음을 보여주는 것이다.

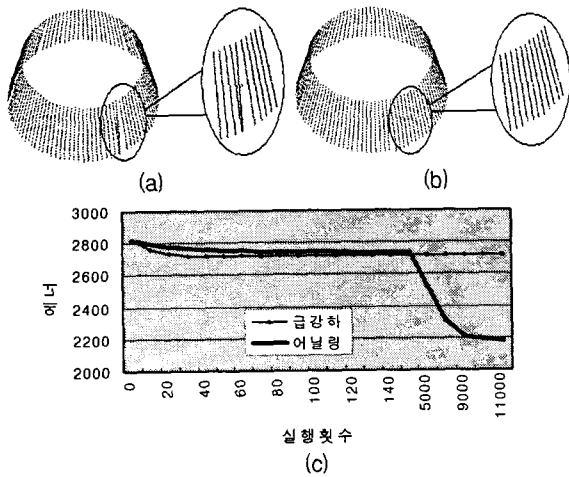


그림 15 원뿔 층의 실험 결과 (a) 급강하법 적용 (b) 시뮬레이티드 어닐링 적용 (c) 에너지 비교
 Fig. 15 Experiment on Cone Layer (a) By Gradient Descent Method (b) By Simulated Annealing (c) Energy Comparison

그림 16은 그림 14(b)의 원기둥, 그림 17은 그림 14(c)의 톱니형 원기둥, 그림 18은 그림 14(d)의 톱니형 원뿔 층에 대하여 각각 급강하법과 시뮬레이티드 어닐링을 적용한 경우의 경사절단선분 탐색 결과와 에너지의 변화값이다. 모든 경우에 시뮬레이티드 어닐링의 적용이 에너지를 크게 감소시켜 지역 최소해가 대부분 해결되었음을 확인할 수 있었다.

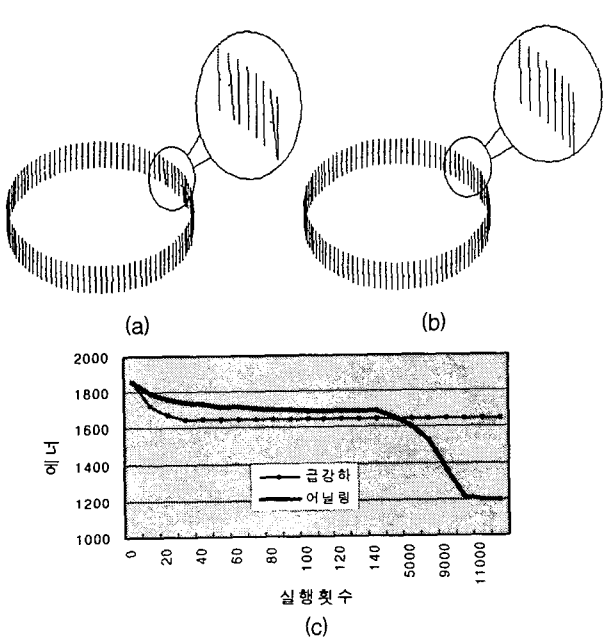


그림 16 원기둥 층의 실험 결과 (a) 급강하법 (b) 시뮬레이티드 어닐링 (c) 에너지 비교
 Fig. 16 Experiment on Cylinder Layer (a) By Gradient Descent Method (b) By Simulated Annealing (c) Energy Comparison

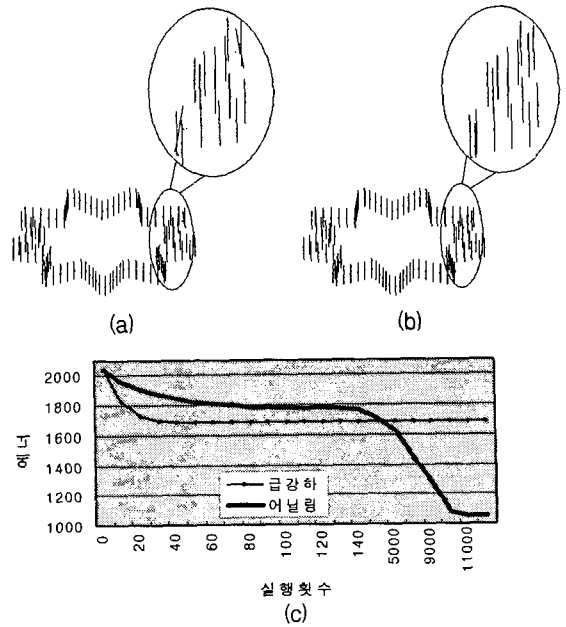


그림 17 톱니형 원기둥 층의 실험 결과 (a) 급강하법 적용 (b) 시뮬레이티드 어닐링 적용 (c) 에너지 비교
 Fig. 17 Experiment on Toothed-Cylinder Layer (a) By Gradient Descent Method (b) By Simulated Annealing (c) Energy Comparison

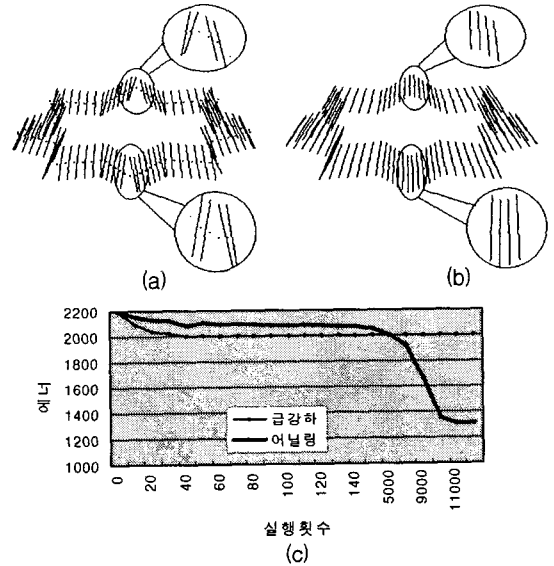


그림 18 톱니형 원뿔 층의 실험 결과 (a) 급강하법 적용 (b) 시뮬레이티드 어닐링 적용 (c) 에너지 비교
 Fig. 18 Experiment on Toothed-Cone Layer (a) By Gradient Descent Method (b) By Simulated Annealing (c) Energy Comparison

표 3은 네 종류의 층 형상에 대하여 최종 에너지를 비교한 것이다. 급강하법에 비해 시뮬레이티드 어닐링을 적용한 경우 원뿔, 원기둥, 톱니형 원기둥, 톱니형 원뿔 각각 25%, 27%, 38%, 34% 에너지가 감소한 것으로 나타났다. 이러한

결과는 시뮬레이티드 어닐링이 모든 3D 형상에 대하여 급강하법보다 총 표면을 보다 충실하게 근사화함을 나타낸다. 특히, 원뿔이나 원기둥과 같은 간단한 형태의 3D 형상보다는 톱니형의 복잡한 형태의 3D 형상일 경우에 시뮬레이티드 어닐링에 의한 향상률이 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 지역 최소해가 나타나기 쉬운 톱니형 요철 또는 굴곡이 있는 복잡한 3D 형상일수록 시뮬레이티드 어닐링 방법에 의한 최적화가 보다 효과적임을 보여주는 것이다.

표 3 종류별 3D 형상에 대한 최종 에너지 비교
Table 3 Final Energy Comparison on Various 3D Objects

3D 형상	급강하	시뮬레이티드 어닐링	향상률(%)
원뿔	2718.62	2040.83	25%
원기둥	1642.57	1202.38	27%
톱니형 원기둥	1684.25	1052.48	38%
톱니형 원뿔	1998.38	1313.10	34%

그림 19는 경사절단선분 탐색 알고리즘을 4종류의 3D 형상 전체에 적용한 실험 결과로서, 그림 19(a)는 급강하법을 적용한 경우이고 그림 19(b)는 시뮬레이티드 어닐링을 적용한 경우이다. 대응되는 3D 형상의 선분 패턴을 시각적으로 비교해 보면 급강하법에 비해 시뮬레이티드 어닐링이 3D 형상의 표면을 보다 균일하고 연속적으로 재구성하였음을 확인할 수 있다.

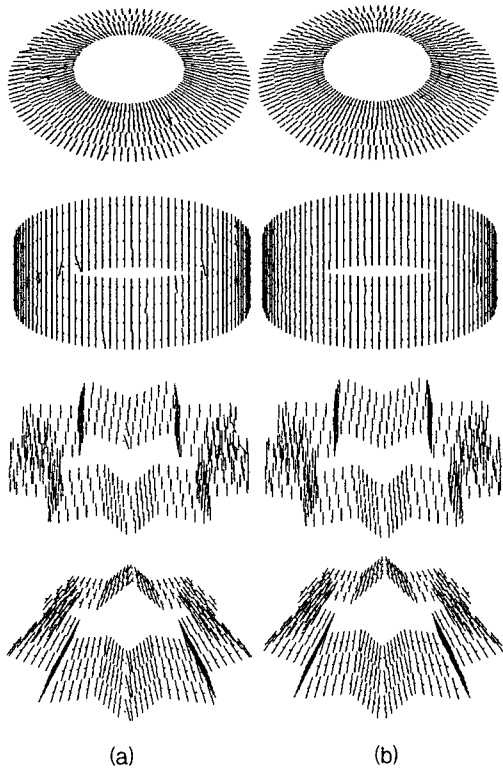


그림 19 3D 형상 전체에 대한 비교 실험 (a) 급강하법 (b) 시뮬레이티드 어닐링
Fig. 19 Comparison Experiment on Entire 3D Objects (a) Gradient Descent Method (b) Simulated Annealing

6. 결 론

두꺼운 층을 레이저로 절단하여 적층하는 RP 시스템은 다양한 재료를 사용하여 물리적인 형상을 신속하게 조형할 수 있다. 반면에 이러한 RP 시스템은 층의 수직절단에 의한 계단형 표면 현상, 삼각형 표면 재구성에 따른 표면 왜곡, 레이저 구동에 부적합한 궤적 문제 등을 해결해야만 한다. 따라서 본 연구는 두께를 가진 3D 형상의 층 표면을 경사지게 절단할 수 있을 뿐만 아니라, 층의 표면을 기차 레일의 침목 형태로 나열함으로써 표면을 충실하고 부드럽게 재구성하는 알고리즘을 제안하였다.

복잡한 3D 형상의 층 표면을 경사선분의 집합으로 효과적으로 재구성하기 위해 층 표면에 대한 경사절단선분의 근사화 정도를 반영하는 에너지를 정의하였고, 이 에너지를 최소화함으로써 경사절단선분 탐색을 수행하였다. 급강하법에 의한 단순한 에너지 최소화 방법은 층의 윤곽이 복잡할 경우 부적절한 위치에 선분이 귀착하는 지역 최소해 가능성이 크므로 시뮬레이티드 어닐링을 경사절단선분 탐색에 적용함으로써 전역 최소해를 추구하였다.

제안한 경사절단선분 탐색 알고리즘에 여러 종류의 3D 형상을 대상으로 실험한 결과, 시뮬레이티드 어닐링이 급강하법에 비하여 25%~38% 보다 충실하게 층의 표면을 재구성하였다. 또한, 시뮬레이티드 어닐링에 의해 최적화된 경사절단선분 패턴을 분석한 결과, 급강하법에서 발생되었던 지역 최소해의 대부분이 제거되었음을 확인할 수 있었다. 특히, 시뮬레이티드 어닐링에 의해 최적화된 경사절단선분은 복잡한 3D 형상의 복원에 보다 효과적이었다. 결과적으로 제안한 경사절단 알고리즘은 복잡한 형태의 3D 표면을 충실하게 복원함과 동시에 레이저가 동역학적으로 구동 가능하도록 층의 경사표면을 부드럽게 재구성할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 순천향대학교 차세대 BIT무선부품연구센터(R12-2002-02-04004-0)의 지원에 의한 연구로써, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 정해도(編譯), 적층조형시스템, 성안당, 1998, pp.12-26.
- [2] Taijoon Um, Youngcheol Joo, Sehyung Park, Sanghyun Min, "Agile Fabrication of a Sample by a Solid Freeform Fabrication System", The 2002 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, Vol.3, pp.1740-1743, Pucket, Thailand, July 16-19, 2002.
- [3] 고민국, 엄태준, 주영철, 공용해, 천인국, 방재철, 김승우, "다중재료용 쾌속 임의형상가공시스템의 개발", 2001년 대한전기학회/대한전자공학회 시스템및제어분야 합동추계학술대회 논문집, pp.311-316, Nov. 24, 2001.
- [4] 이상호, 김태화, 안동규, 양동열, 채희창, "가변 적층 쾌

속 조형 공정 개발을 위한 단위형상조각 자동 생성 소프트웨어 개발 및 적용 예”, 한국정밀공학회지, 제18권, 제8호, pp.64-70, 2001.

- [5] Stephen J. ZRock, Michael J. Wozny, "A Flexible File Format for Solid Freeform Fabrication", Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, H. L. Marcus, et. al. (eds.), pp.1-12, 1991.
- [6] Stephen J. ZRock, Michael J. Wozny, "Generating Topological Information from a "Bucket of Facets", Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, H. L. Marcus, et. al. (eds.), pp.251-259, 1992.
- [7] 김명호, "선형 연결 부류 병렬 컴퓨터상에서 TSP를 위한 병렬 시뮬레이션 어닐링", Journal of the Industrial Technology Research Institute, Soong Sil Univ., 제26권, 제1호, pp.179-186, 1996.
- [8] 김대수, "시뮬레이티드 어닐링과 볼츠만 머신", http://www.aistudy.co.kr/neural/supervised/simul_kim.htm, 1992.
- [9] 김영분, 김명원, "시뮬레이티드 어닐링의 생성 메커니즘이 최적화 성능에 미치는 영향의 실험적 분석", Journal of the Industrial Technology Research Institute Soong Sil Univ., 제25권, 제2호, pp.107-114, 1995.

저 자 소 개



김 명 숙 (金 明 淑)

1972년 8월 12일생. 1991년 순천향대학교 전산학과 졸업. 1997년~1999년 동 대학원 전산학과 졸업(석사). 2002년~현재 동 대학원 전산학과 박사과정. 주관심분야 : 영상 처리, 신경 회로망
 Tel : 041-544-1366
 E-mail : krhkms@sch.ac.kr



엄 태 준 (嚴 泰 俊)

1954년 4월 9일생. 1977년 서울대학교 기계설계학과 졸업. 1979년 과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 1989년 미국 오클라호마주립대 기계공학과 졸업(공학박사). 1991년~현재 순천향대학교 기계공학과 교수. 주관심분야 : 유압제어 시스템개발, 메카트로닉스 응용, 자동화 시스템 개발, 차세대 자동차 기술 개발
 Tel : 041-530-1368
 E-mail : tjoonum@sch.ac.kr



김 승 우 (金 承 禹)

1961년 10월 15일생. 1987년 연세대학교 전자공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1989-1990년 삼성종합기술원 근무. 1994년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1994년~현재 순천향대학교 정보기술공학부 부교수. 1998년~1999년 미국 Case Western Reserve University 방문교수. 주관심분야 : 로봇 시스템, 퍼지 제어 시스템, 자동화 기술, RP 머신 개발 및 응용
 Tel : 041-530-1369
 E-mail : seungwo@sch.ac.kr



천 인 국 (千 仁 國)

1960년 4월 29일생. 1983년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1985년 KAIST 전기및전자공학과 졸업(석사). 1993년 KAIST 전기및전자공학과 졸업(공학박사). 1993년~현재 순천향대학교 정보기술공학과 부교수. 주관심분야 : 영상 처리, 인공 지능, 컴퓨터 그래픽
 Tel : 041-530-1278
 E-mail : chunik@sch.ac.kr



공 용 해 (孔 容 海)

1957년 4월 30일생. 1982년 연세대학교 전자공학과 졸업. 1986년 미국 Polytechnic University 전산학과 졸업(석사). 1991년 미국 Polytechnic University 전산학과 졸업(공학박사). 1982년 한진중공업 연구원. 1983년 삼성전자 연구원. 1991년~현재 순천향대학교 정보기술공학부 교수. 주관심분야 : 지능 에이전트, 신경회로망, 멀티미디어 응용
 Tel : 041-530-1320
 E-mail : yhkong@sch.ac.kr