

전역 변형을 갖는 활성곡면을 사용한 모델 적합

김 동 근[†] · 최 증 원^{††} · 황 치 정^{†††}

요 약

본 논문에서는 전역 변형을 갖는 활성 곡면을 사용하여 잡음으로 오염된 데이터를 곡면으로 적합하는 알고리즘을 제안하였다. 이것은 2차원 곡선 모델에서 이전에 연구[11, 12]된 알고리즘의 3차원 곡면으로의 확장이다. 제안된 방법에서는 유한 차분을 사용하며, 각 노드점에서 주위의 외부힘을 사용하여 부분적으로 수축 또는 팽창을 허용하는 balloon 모델[2, 3]에 기반으로 진행되는 동안 곡면의 모양을 전역 변환으로 표현한다. 먼저 balloon 모델에 의하여 국부 변형을 일으키고, 다음으로 변형 전의 곡면에서 변형 후의 곡면으로의 전역 변환이 결정적 최소 자승법에 의하여 계산되고, 마지막으로 전역 변환을 변형 전의 곡면에 적용한다. 실험에서 아핀변형을 갖는 활성 곡면을 사용하여 잡음으로 오염된 데이터를 곡면(타원체, B-스플라인)으로 적합하였다.

Model Fitting using an Active Surface with Global Deformations

Dong-Keun Kim[†] · Jeung-Won Choi^{††} · Chi-Jung Hwang^{†††}

ABSTRACT

In this paper we propose an algorithm which fits a surface to noise-corrupted data points using an active surface with global deformations. It is 3-dimensional surface extension of our previous works on 2-dimensional curve model[11, 12]. We use finite differences, and represent shapes of surface as global transformation during evolution based on the balloon model[2, 3] which allows partial inflation or deflation by using neighborhood's external forces on each node points. At first, we make local deformations based on the balloon model, and then the global transformation from the surface before deformations to the deformed surface is calculated by the deterministic least square method, finally we apply the global transformation to the surface before deformations. In experiments we fit a surface(ellipsoid, B-spline) to noise-corrupted 3D data points using the active surface with affine deformations.

1. 서 론

활성모델은 Kass[1] 등에 의해 소개된 이후, 물체의 경계선 분할, 모델 근사 및 물체 추적 방법으로 널리 사용되고 있는 에너지 최소화 모델이다. 활성모델에

서 에너지를 최소화하는 방법으로는 변분법(variational method)에 의한 유한차분법[1], 유한요소법[3, 6], 동적 프로그래밍[4, 5] 등 대부분의 방법이 전역해(global solution)를 구하지 않고 원하는 해의 근처에서 국부해(local solution)를 반복적으로 구하는 방법을 사용하고 있다.

활성 모델을 이용한 2차원 영상에서의 물체의 경계선 분할 문제에서는, 초기 곡선을 물체의 경계선 근처에 위치시키고 그라디언트에 의해 정의된 에지 정

† 정 회 원: 서남대학교 전산정보학과

†† 준 회 원: 충남대학교 컴퓨터과학과

††† 정 회 원: 충남대학교 컴퓨터과학과

논문접수: 1996년 11월 20일, 심사완료: 1997년 3월 5일

보인 외부 에너지와 에너지를 최소화하는 동안 곡선을 부드럽게 유지시키기 위한 제약조건인 내부 에너지의 합을 최소로 하는 해를 반복적으로 구하는 방법으로 경계선을 찾는다. 이러한 반복적인 에너지 최소화 특성으로 인하여 연속된 프레임의 영상에서 물체의 움직임이 크지 않을 경우에, 이전 프레임에서 구한 경계선을 다음 프레임의 영상에서 초기 곡선으로 초기화하여 에너지를 최소화하는 방법으로 물체의 경계선 움직임을 추적한다[1, 2, 3]. 경계선 분할 및 물체 추적에 사용되는 활성 모델은 에너지를 최소화하는 동안 주어진 초기 모델의 형태를 반복적으로 변형시켜 간다.

대부분의 물체의 형태를 이용하는 인식 및 처리 문제에서 경계선을 분할한 다음에 처리하기 간단한 형태(예를 들면, 원, 타원, 스플라인 등)로 표현하기 위하여 모델 적합(model fitting)을 사용한다. Terzopoulos 등[6]은 활성 곡면 모델을 적합(fitting) 문제에 적용시키기 위하여 superquadrics 곡면을 파라메타로 표현하고 파라메타의 변화에 따른 에너지의 변화를 계산하여, 에너지가 감소하는 방향으로 파라메타를 움직여 가는 방법을 유한요소법(finite element method)을 사용하여 공식화하였다. 이러한 방법은 형상 함수를 사용하여 복잡한 형태를 표현할 수 있는 장점이 있으나, 유한 차분법을 사용한 방법에 비해 공식화하기가 어렵고, 잡음에 의한 파라메타의 영향이 크고, 랜덤 잡음을 처리하기에 어려운 단점이 있다. 다른 방법으로는 물체의 움직임을 전역 변환을 사용하여 표현하고 에너지가 감소하는 방향으로 변환을 계산하여 움직여 가는 방법으로 유한 차분법을 사용하여 비교적 단순한 장점이 있다[9, 10, 11, 12]. 논문 [11, 12]에서는 파라메타에 따른 에너지의 변화를 계산하여 움직이는 대신에 아핀(affine) 변환을 사용하여 2차원 곡선의 움직임을 표현한 활성곡선 모델을 제안하여 2차원 영상에서 경계선 분할 및 모델 적합에 적용하였다.

본 논문에서는 경계선 분할 및 모델 적합을 위한 2차원 활성 곡선 모델[11, 12]을 아핀 변환과 다항식 변환에 의해 전역 변형되는 3차원 활성 곡면 모델로의 확장하였으며 랜덤 잡음으로 오염된 3차원 데이터를 타원체와 B-스플라인 곡면으로 적합하는 실험을 하였다. 제안된 방법은 유한 차분법을 사용하여 유한요소법을 사용한 방법에 비해 알고리즘이 단순하며, 각

노드 점에서 팽창 및 수축 가능한 곡면 모델을 사용하여 초기 곡면의 위치에 영향을 적게 받으며, 반복적으로 변형 전후의 변형 오차의 제곱을 최소로 하는 방법으로 전역 변환을 계산하여 변형하므로 잡음에 영향을 적게 받는 장점이 있다.

본 논문의 구성은 2장에서 활성 곡면 모델의 에너지 식과 최소화 방법을 간단히 설명하고, 3장에서는 전역 변환에 의해 변형되는 제안된 활성 곡면 모델을 설명하며, 4장에서는 타원체 적합 및 스플라인 곡면 적합의 실험 결과를 보이고, 끝으로 5장에서는 본 논문의 결론과 앞으로의 연구 방향을 기술한다.

2. 활성 곡면 모델

본 장에서는 활성 곡면 모델의 에너지 식과 에너지 최소화 방법을 설명한다. 에너지 최소화는 변분법에 의한 오일러-라그랑지 방정식으로 활성 곡면의 운동 방정식을 유도한 후 유한 차분법을 사용하여 미분 방정식의 해를 구한다.

2.1 활성 곡면 모델의 에너지 식

활성 곡면 모델은 활성 곡선과 같이 곡면을 부드럽게 유지시키기 위한 제약조건인 내부 에너지와 찾고자 하는 영상의 특징인 외부 에너지의 합을 적분으로 표현된다.

$$E = \int_0^1 \int_0^1 (E_{\text{internal}}(v(s, r)) + E_{\text{external}}(v(s, r))) ds dr \quad (1)$$

$$\begin{aligned} E_{\text{internal}} = & w_{10}(s, r) \left| \frac{\partial v(s, r)}{\partial s} \right|^2 \\ & + w_{01}(s, r) \left| \frac{\partial v(s, r)}{\partial r} \right|^2 \\ & + 2w_{11}(s, r) \left| \frac{\partial^2 v(s, r)}{\partial s \partial r} \right|^2 \\ & + w_{20}(s, r) \left| \frac{\partial^2 v(s, r)}{\partial s^2} \right|^2 \\ & + w_{02}(s, r) \left| \frac{\partial^2 v(s, r)}{\partial r^2} \right|^2 \end{aligned} \quad (2)$$

활성 곡면 $v(s, r) = (x(s, r), y(s, r), z(s, r))$ 는 공간 변수 $s \in [0, 1]$ 와 $r \in [0, 1]$ 로 매개변수화된 곡면이다. 외부에너지 $E_{\text{external}}(v(s, r))$ 는 영상에서 경계면을 검출

할 때는 에지 연산자를 이용한 $E_{external}(v(s, r)) = -|\nabla I(v(s, r))|$ 를 사용하고, 점 데이터에서는 곡면까지의 거리를 에너지로 사용할 수 있다. $w_{10}(s, r)$ 와 $w_{01}(s, r)$ 는 탄성(elasticity)을 $w_{20}(s, r)$ 와 $w_{02}(s, r)$ 는 강성(rigidity)을 $w_{11}(s, r)$ 은 비틀림(twisting)을 방지하기 위한 가중치 함수(weighting function)이다.

2.2 에너지 최소화

식 (1)의 에너지 E 의 지역 극값(local minima), $v(s, r)$ 을 구하기 위하여 변분법에 의한 오일러-라그랑지 방정식을 적용한 다음, 시간 변수 t 를 추가한 운동 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial v(t, s, r)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial s} (w_{10}(s, r) \frac{\partial v(t, s, r)}{\partial s}) \\ - \frac{\partial}{\partial r} (w_{01}(s, r) \frac{\partial v(t, s, r)}{\partial r}) \\ + 2 \frac{\partial^2}{\partial s \partial r} (w_{11}(s, r) \frac{\partial^2 v(t, s, r)}{\partial s \partial r}) \\ + \frac{\partial^2}{\partial s^2} (w_{20}(s, r) \frac{\partial^2 v(t, s, r)}{\partial s^2}) \\ + \frac{\partial^2}{\partial r^2} (w_{02}(s, r) \frac{\partial^2 v(t, s, r)}{\partial r^2}) \\ + \nabla E_{external}(v(t, s, r)) = 0 \end{aligned} \tag{3}$$

식 (3)에서 경계 조건이 식 (4a)과 같으면 한 면이 열린 실린더 구조가 되고, 식 (4b)과 같으면 곡면이 완전히 닫힌 구(sphere) 또는 타원체(ellipsoid) 같은 곡면 구조가 된다.

$$v(t, s, 0) = v(t, s, 1) \quad \text{xor} \quad v(t, 0, r) = v(t, 1, r) \tag{4a}$$

$$v(t, s, 0) = v(t, s, 1) \quad \text{and} \quad v(t, 0, r) = v(t, 1, r) \tag{4b}$$

초기 곡면 $v(0, s, r)$ 를 찾고자 하는 해(solution)의 근처에 위치시키고 해를 구하면 t 가 ∞ 로 감에 따라 식 (3)은 식 (1)의 해로 수렴한다. 편미분 방정식 (3)의 수치해를 구하기 위해 팔성 곡선 모델과 유사하게 시간 변수 t 와 공간 변수 s, r 에 유한 차분법을 사용하여 구할 수 있다. 유한 차분법으로 풀기 위하여 공간 변수에 대해 식 (5)과 같이 차분을 정의한다.

$$\frac{\partial^2 v(t, s, r)}{\partial s^2} = (v_{i+1, j} - 2v_{i, j} + v_{i-1, j})/h^2$$

$$\frac{\partial^2 v(t, s, r)}{\partial r^2} = (v_{i, j+1} - 2v_{i, j} + v_{i, j-1})/k^2$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^4 v(t, s, r)}{\partial s^2 \partial r^2} = & (v_{i+1, j+1} - 2v_{i+1, j} + v_{i+1, j-1} - 2v_{i, j+1} \\ & + 4v_{i, j} - 2v_{i, j-1} + v_{i-1, j+1} - 2v_{i-1, j} \\ & + v_{i-1, j-1})/(h^2 k^2) \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^4 v(t, s, r)}{\partial s^4} = & (v_{i+2, j} - 4v_{i+1, j} + 6v_{i, j} - 4v_{i-1, j} \\ & + v_{i-2, j})/h^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^4 v(t, s, r)}{\partial r^4} = & (v_{i, j+2} - 4v_{i, j+1} + 6v_{i, j} - 4v_{i, j-1} \\ & + v_{i, j-2})/k^4 \end{aligned}$$

식 (5)에서 $v_i = v(ih, jk)$, $i=0, 1, \dots, m-1$, $j=0, 1, \dots, n-1$ 이고, h 는 구간 $s \in [0, 1]$ 를 m 개의 노드 점으로 등간격으로 하는 노드 간격이고, k 는 $r \in [0, 1]$ 를 n 개의 노드 점으로 등간격으로 하는 노드 간격이다. 연립 방정식을 효과적인 행렬 계산으로 표현하기 위하여 노드 점의 순서를 $l = jm + i$, $l=0, 1, \dots, mn-1$ 로 재분류하여 정리하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} (e)v_{l-2m} + (2c)v_{l-m-1} + (b-4c-4e)v_{l-m} \\ + (2c)v_{l-m+1} + (d)v_{l-2} + (a-4c-4d)v_{l-1} \\ + (-2a-2b+8c+6d+6e)v_l + (a-4c-4d)v_{l+1} \\ + (d)v_{l+2} + (2c)v_{l+m-1} + (b-4c-4e)v_{l+m} \\ + (2c)v_{l+m+1} + (e)v_{l+2m} \\ = (G_x(v_l), G_y(v_l), G_z(v_l)) \end{aligned} \tag{6}$$

식 (6)에서 $a = -\frac{w_{10}}{h^2}$, $b = -\frac{w_{01}}{k^2}$, $c = \frac{w_{11}}{h^2 k^2}$, $d = \frac{w_{20}}{h^4}$, $e = \frac{w_{02}}{k^4}$ 이고, $(G_x(v_l), G_y(v_l), G_z(v_l)) = -\nabla E_{external}(v_l)$ 이다. 식 (6)의 mn 개의 연립 방정식을 행렬로 표현하고, 시간 t 에 대해 차분을 적용하면 식 (7)과 같은 반복식을 얻는다.

$$V_{t+1} = (I + \tau A)^{-1} (V_t + \tau G(V_t)) \tag{7}$$

식 (7)에서 t 는 반복을 나타내고, $V=(v_0, v_1, \dots, v_{mn-1})$ 벡터이고, A 는 $mn \times mn$ 의 13선 대각 행렬이다. 역행렬 $(I + \tau A)^{-1}$ 는 삼각 분해(LU-decomposition)를 사용하여 구한다.

3. 전역 변형을 갖는 활성 곡면

본 장에서는 논문 [11, 12]에서의 전역 변형을 갖는 2차원 활성 곡선 모델을 3차원 활성 곡면으로의 확장에 대하여 설명한다. 식 (1)의 에너지 E 를 최소화하는 곡면 $V(s, r)$ 은 식 (7)에서 초기해, V_0 를 해의 근처에 놓고 반복적으로 곡면의 모양을 변형시켜 가면, 더 이상의 에너지 변화가 없는 곳에서 원하는 해를 얻을 수 있다. 이러한 활성곡면은 지역적인 에너지에 의해 임의로 곡면의 형태를 변형시킨다. 본 논문에서는 반복적으로 변형하는 동안 곡면의 형태를 전역 변환에 의해 변형될 수 있는 형태로 표현하는 방법에 대해 연구한다. 사용된 전역 변환은 아핀 변환과 2차 다항식 변환을 사용하였다.

3.1 에너지 식

활성 곡면 모델의 에너지 식 (1)에서 곡면 $v(s, r)$ 을 아핀 변환에 의해 표현한 에너지 식은 다음과 같다.

$$E = \int_0^1 \int_0^1 (E_{internal}(\tilde{v}(s, r)) + E_{external}(\tilde{v}(s, r))) ds dr \quad (8)$$

식 (8)에서 곡면 위의 점은 $v(s, r)=(x(s, r), y(s, r), z(s, r), 1)$ 와 같이 동차 좌표(homogeneous coordinate system)로 확장해 표현한다. 전역변형을 갖는 곡면 $\tilde{v}(s, r)$ 는 아핀 변환이 사용될 경우는 $\tilde{v}(s, r)=v(s, r)M$ 이고, 다항식 변환이 사용될 경우에는 $\tilde{v}(s, r)=W(v(s, r))P$ 로 표현된다. 여기서 M 과 P 는 식 (9)에 정의된 것과 같이 아핀 변환과 2차 다항식 변환 행렬이다.

식 (8)의 에너지 E 를 최소화하는 전역 변형을 갖는 곡면 $\tilde{v}(s, r)$ 를 구하는 과정은 3 단계로 이루어진다. 1 단계는 식 (4)을 사용하여 식 (1)의 에너지를 최소화하는 임의의 형태로 변형시킨다. 2 단계는 변형 전과 후의 변형 오차의 제곱을 최소화하는 전역 변형을 계산한다. 3 단계는 계산된 전역 변환을 사용하여 변형 전의 곡면을 변형시킨다.

3.2 전역 변형

곡면에 변형을 일으킬 수 있는 변환으로 아핀 변환과 2차 다항식 변환을 사용하였다. 아핀 변환과 다항식 변환은 영상처리, 컴퓨터 비전, 원격탐사, 그래픽스 등에서 영상의 왜곡을 보정하거나, 동일한 영상의 서로 다른 버전을 등록시키기 위하여 사용되거나, 물체를 변형시키기 위하여 사용하는 변환이다. 곡면 위의 한점 $[x, y, z, 1]$ 는 아핀 변환 M 또는 다항식 변환 P 의 의해 $[\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, 1]$ 로 변환될 수 있다.

$$[\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, 1] = [x, y, z, 1]M \quad (9a)$$

$$[\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, 1] = [1, x, y, z, xy, xz, yz, x^2, y^2, z^2]P \quad (9b)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & 0 \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & 0 \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & 0 \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & 1 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} a_{000} & b_{000} & c_{000} & 1 \\ a_{100} & b_{100} & c_{100} & 0 \\ a_{010} & b_{010} & c_{010} & 0 \\ a_{001} & b_{001} & c_{001} & 0 \\ a_{110} & b_{110} & c_{110} & 0 \\ a_{101} & b_{101} & c_{101} & 0 \\ a_{011} & b_{011} & c_{011} & 0 \\ a_{200} & b_{200} & c_{200} & 0 \\ a_{020} & b_{020} & c_{020} & 0 \\ a_{002} & b_{002} & c_{002} & 0 \end{bmatrix}$$

임의의 한 곡면을 아핀 변환을 적용하여 다른 형태의 곡면으로 변형시킬 때 식 (9a)의 12개의 변환 계수를 알면 가능하다. 역으로 변환 전과 변환 후의 4개의 대응하는 점을 알고 있으면 아핀 변환을 구할 수 있다. 역시 10개의 대응하는 점을 알고 있으면 다항식 변환을 구할 수 있다. 변환 전과 변환 후의 대응하는 점의 개수가 많을 경우 최소자승법을 사용하여 제곱 오차를 최소화하는 변환을 구할 수 있다.

3.3 전역 변형 모델 및 에너지 최소화

식 (8)의 에너지 E 를 최소화하는 곡면 $\tilde{v}(s, r)$ 를 구하기 위하여, 반복식 (7)과 최소자승법(least square method)을 사용한다. 식 (7)의 각 반복 t 에서 변형 전의 곡면 V_t 와 변형된 곡면 \tilde{V}_t 는 전역 변환인 아핀 변환과

다항식 변환을 사용하여 식 (10)과 같이 표현될 수 있다.

$$\hat{V}_i = V_i M_i + e_i \tag{10a}$$

$$\hat{V}_i = W(V_i) P_i + e_i \tag{10b}$$

식 (10)에서 $\hat{V}_i = (I + \tau A)^{-1} (V_i + \tau G(V_i))$ 이고, e_i 은 변형 오차이고, M_i 는 아핀 변환, P_i 는 다항식 변환이다. 변형 전후의 두 곡면 V_i 와 \hat{V}_i 사이의 대응되는 노드 점들을 사용하여, 변형 오차, e_i 의 제곱을 최소로 하는 전역 변환 M_i 또는 P_i 를 pseudo inverse에 의한 최소자승법을 사용하여 계산한 다음, 계산된 전역 변환을 사용하여 변형전의 곡면 V_i 를 전역 변형이 아핀 변형인 경우는 $V_{i+1} = V_i M_i$ 로 다항식 변형인 경우는 $V_{i+1} = W(V_i) M_i$ 로 곡면을 변형 이동시키는 것을 반복하면 식 (8)의 에너지 E 를 최소화하는 곡면 $\hat{v}(s, r)$ 를 구할 수 있다. 식 (10)에서의 변형 오차의 제곱은 식 (11)과 같이 표현된다.

$$e_i^T e_i = (\hat{V}_i - V_i M_i)^T (\hat{V}_i - V_i M_i) \tag{11a}$$

$$e_i^T e_i = (\hat{V}_i - W(V_i) P_i)^T (\hat{V}_i - W(V_i) P_i) \tag{11b}$$

식 (11)에서 변형 오차의 제곱 $e_i^T e_i$ 을 최소화하는 M_i 와 P_i 는 식 (12)와 같다.

$$M_i = (V_i^T V_i)^{-1} V_i^T \hat{V}_i \tag{12a}$$

$$P_i = (W(V_i)^T W(V_i))^{-1} W(V_i)^T \hat{V}_i \tag{12b}$$

$V_i^T V_i$ 는 4×4 행렬이고 역행렬은 삼각분해를 사용하여 구하였고, $W(V_i)^T W(V_i)$ 는 10×10 행렬이고, ill-conditioned 행렬이기 때문에 SVD(singular value decomposition)을 사용하여 구하였다.

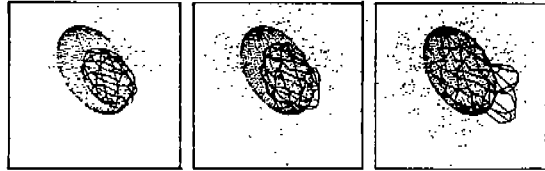
3.4 수축 및 팽창을 갖는 곡면

활성 곡면 모델의 반복식 (7)은 외부 에너지가 $E_{external}(v(s, r)) = 0$ 이면 $G(V_i) = 0$ 이 되어 반복식이 $V_{i+1} = (I + \tau A)^{-1} (V_i)$ 으로 되어, 내부 에너지를 최소화하기 위하여 곡면이 수축하는 방식으로 에너지를 최소화한다. 또한 곡면 위의 모든 노드점에서 외부 에너지에 의한 힘이 서로 다르게 작용하기 때문에 힘이 크게 작용하는 짐을 등으로 인하여 해에서 한 번 떨어지면 원하는 해를 찾을 수 없게 된다. 이러한 단점을

극복하기 위하여 Cohen[2, 3] 등은 외부 에너지의 그라디언트인 힘을 정규화하고, 법선 벡터, $n(\cdot)$ 를 사용하여 정의한 식 (13)과 같은 $G(V_i)$ 를 사용하였다. 이 방법은 초기 해를 찾고자 하는 해의 내부에 위치시키고 팽창하는 방식으로 에너지를 최소화한다.

$$G(V_i) = k_1 n(V_i) - k_2 \frac{\nabla E_{external}(V_i)}{|\nabla E_{external}(V_i)|} \tag{13}$$

본 논문에서는 식 (7)에서 초기 곡면, V_0 를 물체의 경계 근처에 위치시킨 다음, 각 노드 점에서 법선 벡터 $n(\cdot)$ 을 구하고, 각각의 노드 점에서 이웃하는 화소의 외부 에너지를 조사하여 에너지가 작은 쪽 방향으로 향하도록 k_2 의 부호를 결정하여 법선 벡터의 방향을 결정하였다. 이러한 방법은 활성 곡면이 부분적으로 팽창 또는 수축 가능하도록 하여, 초기 곡면의 위치에 덜 민감하게 하였다. (그림 1)은 법선 벡터의 방향을 반복적으로 결정하지 않고 balloon 모델을 적용한 결과로 한번 경계면 외부로 나온 것은 계속하여 팽창하는 결과를 갖는다. 이에 반하여 (그림 2)는 반복적으로 법선 벡터의 방향을 결정하는 방법을 적용하여 곡면의 일부가 경계면 외부에 주어져도 경계면에서 더 이상 팽창하지 않음을 알 수 있다. 그러나 이들 모두 움직이는 동안 극부적인 변형에 의해 변형되므로 곡면의 형태를 유지하지 못하여 주어진 곡면으로 적합하기 어려우며, 잡음으로 인하여 원하는 해에 도달하지 못할 수 있다.



(그림 1) balloons 모델에 의한 활성 곡면 (Fig. 1) An active surface by balloons model



(그림 2) 팽창 및 수축을 갖는 곡면 (Fig. 2) An active surface with partial inflation and deflation

4. 실험 및 결과

전역 변형을 갖는 3차원 활성 곡면 모델의 성능을 보이기 위하여 잡음으로 오염된 3차원 점 데이터를 타원체와 스플라인 곡면으로 적합시키는 실험을 하였다. 일반적으로 랜덤 잡음으로 오염된 데이터를 최소자승법과 같은 방법을 사용하여 타원체로 적합시키는 것은 매우 어렵다.

4.1 타원체 적합

원점을 중심으로 한 x, y, z 축으로의 반경이 각각 a, b, c 인 타원체는 식 (14)과 같다.

$$Q(\theta, \phi) = [a \cos \theta \sin \phi \quad b \sin \theta \sin \phi \quad c \cos \phi] \quad (14)$$

$$0 \leq \theta \leq 2\pi, \quad 0 \leq \phi \leq \pi$$

중심 위치가 (cx, cy, cz) 이고, 주축의 방향을 정의하는 단위 벡터가 $v_1(v_{1x}, v_{1y}, v_{1z}), v_2(v_{2x}, v_{2y}, v_{2z}), v_3(v_{3x}, v_{3y}, v_{3z})$ 이고, 이 축의 각 반경이 a, b, c 인 타원체는 다음과 같이 정의된다. 공간상의 임의의 위치에 있는 타원체 위의 점 $[\hat{x} \hat{y} \hat{z} 1]$ 는 식 (15)의 원점을 중심으로 한 타원체 위의 점 $[x y z 1]$ 를 회전하고 이동시켜 정의한다.

$$[\hat{x} \hat{y} \hat{z} 1] = [x y z 1] R T(cx, cy, cz) \quad (15)$$

$$T(x, y, z) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & y & z & 1 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} v_{1x} & v_{1y} & v_{1z} & 0 \\ v_{2x} & v_{2y} & v_{2z} & 0 \\ v_{3x} & v_{3y} & v_{3z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

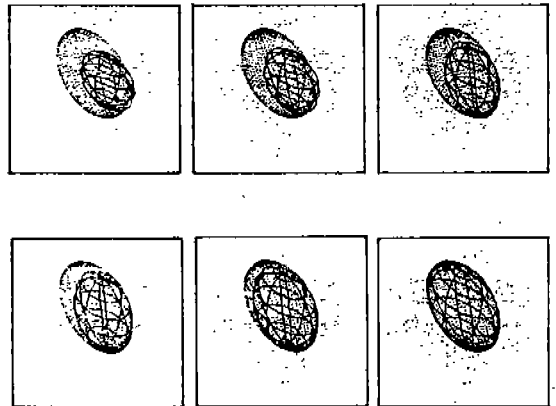
아핀 변환에 의해 변형되는 활성 곡면 V_i 에서 아핀 변환 M_i 에 의해 V_{i+1} 로 변형될 때 타원체의 형태를 유지한다. 그러므로 곡면 V_{i+1} 는 타원체를 정의하는 파라메타 $(a, b, c, cx, cy, cz, v_1, v_2, v_3)$ 로 표현할 수 있으며, 이것은 공분산 행렬(covariance matrix)을 이용한 주성 분석(principal component analysis) 방법에 의해 구할 수 있다. 데이터 점들의 표본 평균이 중심점 (cx, cy, cz) 가 되며, 공분산 행렬에 대한 고유값 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$)과 대응하는 고유벡터 v_1, v_2, v_3 는 타원체의 주축과 축 반경을 정의하는 것으로, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 는 각 축 방향에서의 분산을 나타낸다. 축의 반경 $(a, b,$

$c)$ 는 곡면 V_{i+1} 위의 각 점을 주대각선 방향인 고유벡터 v_1, v_2, v_3 위로 각각 투영시켜 중심점으로부터 가장 멀리 투영된 점까지의 길이로, 곡면 위의 각 점들과 각 방향의 고유 벡터의 내적을 구하여 가장 큰 값을 구하면 된다.

중심점 (cx, cy, cz) 가 $(32, 32, 32)$ 이고 축반경 (a, b, c) 가 $(15, 25, 30)$ 이고 x 축에 대해 30° 회전시킨 타원체에 잡음을 추가한 3차원 데이터에 외부 에너지를 최소 거리를 사용하여 타원체 적합을 실험하였다.

(그림 3)은 초기 곡면인 타원체의 일부를 외부에 위치시키고 적합시키는 과정이며, <표 1>은 (그림 3)에서의 타원체의 파라메타이다.

(그림 4)는 초기 곡면인 타원체의 내부에 위치시키고 적합시키는 과정이며, <표 2>은 (그림 4)에서의 타원체의 파라메타이다. 실험 결과 초기 곡면의 위치와 잡음에 영향을 적게 받으며 타원체로 적합해 가는 것을 알 수 있다. (그림 5)은 전역 변환으로 다항식 변환을 사용할 경우, 변형하는 동안 타원체의 형태를 유지하지 않음을 알 수 있다. 그러므로 다항식 변환을 적용할 경우 타원체의 파라메타는 구할 수 없다. 그러나 가능한 변형 형태가 아핀 변환에 비해 훨씬 많으므로 다양한 형태의 곡면을 분할하는데 이용할 수 있다.



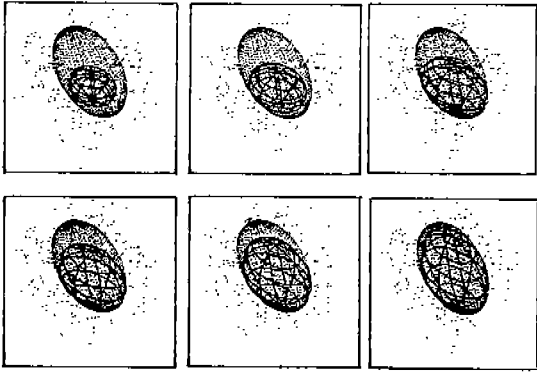
(그림 3) 데이터점의 타원체 적합 (아핀변형)
(Fig. 3) Fitting an ellipsoid to data points (affine deformation).

〈표 1〉 타원체의 파라메타 결과값(그림 3)

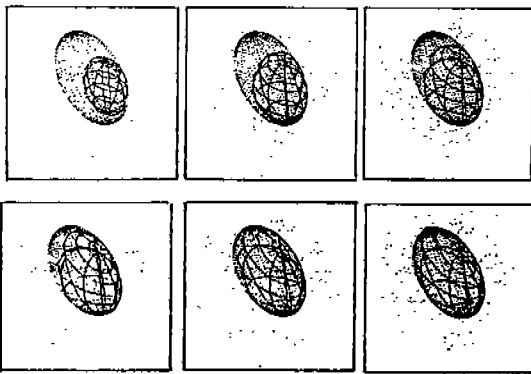
파라메타 반복횟수	중심점 (cx_t, cy_t, cz_t)	축반경 (a_t, b_t, c_t)	축방향 (v_1, v_2, v_3)
(a) t=0(초기 곡면)	(30.0, 28.0, 40.0)	(12.0, 15.0, 10.0)	(1.0, 0.0, 0.0)
			(0.0, 1.0, 0.0)
			(0, 0.0, 1.0)
(b) t = 10	(30.45, 27.84, 39.88)	(15.39, 20.35, 15.34)	(0.9868, 0.1226, -0.1055)
			(-0.0131, 0.9874, -0.0863)
			(0.0936, 0.0991, 0.9906)
(c) t = 30	(31.61, 28.86, 39.88)	(14.02, 23.68, 22.37)	(0.9978, 0.0415, -0.0497)
			(-0.0427, 0.9988, -0.0228)
			(0.0487, 0.0248, 0.9985)
(d) t = 50	(31.79, 29.68, 34.93)	(14.80, 24.37, 26.21)	(0.9989, 0.0302, -0.0329)
			(-0.0289, 0.9987, 0.0405)
			(0.0341, -0.0395, 0.9986)
(e) t = 70	(32.15, 32.10, 31.22)	(14.99, 25.35, 30.47)	(0.9998, -0.0028, -0.0172)
			(0.0057, 0.9849, 0.1726)
			(0.0165, -0.1727, 0.9848)
(f) t = 100	(32.10, 32.13, 31.76)	(14.92, 25.43, 30.50)	(0.9996, 0.0060, -0.0254)
			(-0.0008, 0.9798, 0.1999)
			(0.0261, -0.1998, 0.9794)

〈표 2〉 타원체의 파라메타 결과값(그림 4)

파라메타 반복횟수	중심점 (cx_t, cy_t, cz_t)	축반경 (a_t, b_t, c_t)	축방향 (v_1, v_2, v_3)
(a) t=0(초기 곡면)	(32.0, 20.0, 30.0)	(10.0, 20.0, 20.0)	(1.0, 0.0, 0.0)
			(0.0, 1.0, 0.0)
			(0, 0.0, 1.0)
(b) t = 10	(31.94, 21.18, 30.11)	(11.81, 20.19, 32.20)	(0.9999, 0.0058, 0.0018)
			(-0.0059, 0.9968, 0.0794)
			(-0.0013, -0.0794, 0.9968)
(c) t = 30	(31.98, 24.49, 31.42)	(13.84, 17.28, 28.26)	(0.9960, 0.0880, 0.0119)
			(-0.0888, 0.9874, 0.1303)
			(-0.0003, -0.1309, 0.9913)
(d) t = 50	(32.11, 27.09, 31.60)	(14.64, 19.58, 29.60)	(0.9987, 0.0488, 0.0047)
			(-0.0490, 0.9910, 0.1239)
			(0.0013, -0.1240, 0.9922)
(e) t = 70	(32.17, 29.69, 31.54)	(14.91, 22.64, 30.33)	(0.9998, 0.0173, -0.0010)
			(-0.0170, 0.9913, 0.1303)
			(0.0033, -0.1303, 0.9914)
(f) t = 100	(32.23, 32.25, 31.24)	(14.91, 25.72, 30.44)	(0.9999, 0.0003, -0.0083)
			(0.0009, 0.9878, 0.1553)
			(0.0083, -0.1553, 0.9878)



(그림 4) 데이터점의 타원체 적합 (아핀변형)
(Fig. 4) Fitting an ellipsoid to data points (affine deformation)

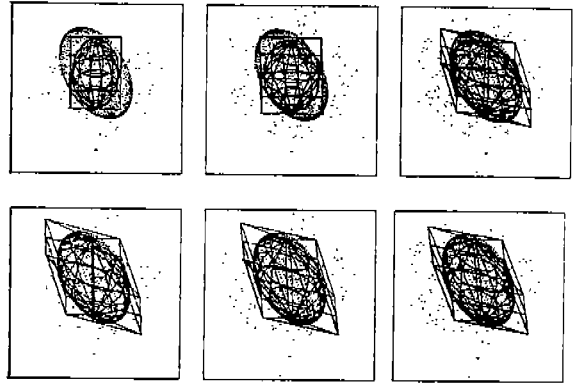


(그림 5) 데이터점의 타원체 분할 (다항식 변형)
(Fig. 5) Fitting an ellipsoid to data points (polynomial deformation)

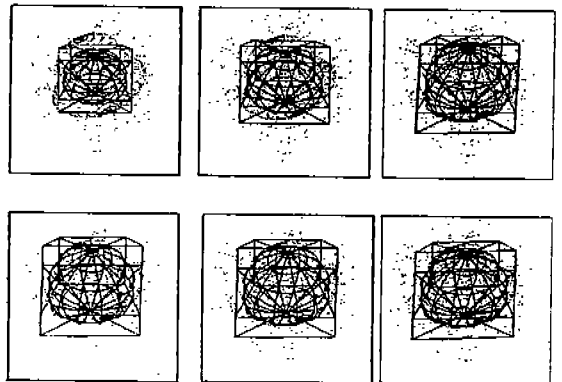
4.2 스플라인 곡면 적합

스플라인 곡면은 제어점에 의해 부드러운 곡면을 정의하기 위하여 사용된다. 전역 변형을 갖는 곡면의 초기 곡면을 생성하기 위하여 16(4×4)개의 제어점에 의해 정의되는 양방향 3차 B-스플라인 곡면을 구간별로 반복하여 사용하였으며, 제어점을 추가하여 닫힌 곡면을 생성하였다[13]. B-스플라인은 아핀 변환에 불변하여 B-스플라인 곡면에 아핀 변환을 적용한 것은 제어점으로 이루어진 다면체에 아핀 변환하여 생성된 다면체에 의해 정의되는 곡선과 같다. (그림 6)은 60(5×12)개의 제어점에 의해 정의된 B-스플라인 곡면을 초기 곡면으로 하여 잡음이 추가된 타원체 데이

터를 적합하는 실험 결과이며, 제어점에 의해 이루어진 다면체를, 곡면과 함께 표시하였다. (그림 7)은 타원체가 아닌 데이터를 84(7×12)개의 제어점에 의해 정의된 B-스플라인 곡면을 초기 곡면으로 하여 실험한 결과이다.



(그림 6) 데이터점의 스플라인 적합 (아핀변형)
(Fig. 6) Fitting a spline to data points (affine deformation)



(그림 7) 데이터점의 스플라인 적합 (아핀변형)
(Fig. 7) Fitting a spline to data points (affine deformation)

제안된 알고리즘의 수행 시간 및 성능은 노드 간격 h , k 와 시간 간격 τ 에 의존한다. 동간격인 h , k 는 노드 점의 수에 따라 결정되며, 노드 점이 커지면 h , k 는 감소하게 된다. 편미분 방정식의 수치해를 구하기 위하여 유한 차분을 사용할 때 h , k 가 작으면 차분에 의

한 미분 값이 정확하여 성능이 향상되는 반면에 노드 점의 갯수가 증가하여, 대부분의 수행 시간을 차지하는 역행렬($(I + \tau A)^{-1}$)을 구하는데 시간이 오래 걸리기 때문에 전체 수행 시간이 증가하게 된다. 반대로 노드 점의 수를 감소하면 계산 시간은 감소하지만 미분값이 정확하지 않게 되어 움직임이 부드럽게 유지되지 않는다. 실험에서 사용한 초기 곡면은 닫힌 곡면을 생성하기 위하여 양쪽 극에서 데이터 점의 수가 다른 곳에 비해 조밀하여, 변형 전후의 곡면의 변형 오차를 최소화할 때 가중치를 갖게 하기 위하여 데이터를 표본추출하여 사용하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 전역 변환에 의해 변형되는 2차원 활성 곡선 모델을 3차원 활성 곡면 모델로 확장하여 잡음으로 오염된 데이터를 곡면 모델로 적합하는 알고리즘을 개발하였다. 제안된 방법은 팽창 및 수축이 가능한 활성 모델을 사용하였으며, 전역 변환을 사용하여 활성 모델의 움직임을 표현하고, 전역 변환에 의해서 표현될 수 있는 가능한 형태 중에서 에너지가 최소가 되는 형태로 움직여가게 최소화 방법을 사용하여 초기 곡면의 위치 및 잡음에 영향을 적게 받게 하였다. 그러나 제안된 방법은 활성 곡면의 모델의 변형을 전역 변환에 의해 제한하였기 때문에 초기 곡면의 모양에 의해 제한을 받을 수 있으나, 다양한 초기 곡면의 형태와 전역 변환을 사용하여 보다 일반적인 형태의 곡면을 표현할 수 있다.

향후 편미분 방정식의 해를 형상함수를 사용하여 근사해를 구하는 유한 요소법을 이용하여 노드의 수를 줄이는 방법과 일반적인 변형에서의 적합 방법에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] M. Kass, A.Witkin, and D.Terzopoulos, "Snakes :Active Contour Models," International Journal of Computer Vision, pp.321-331, 1987.
 [2] L.D.Cohen, "On active contour models and balloons," CVGIP: ImageUnderstanding Vol.53, No.2, Mar., 1991, pp.211-218.

[3] L.D.Cohen and I.Cohen, "Finite-Element Methods for Active Contour Models and Balloons for 2-D and 3-D Images," IEEE Trans. on PAMI, Vol. 15, No.11, pp.617-634, 1993.
 [4] A.Amini, T.Weymouth, and R.Jain, "Using dynamic programming for solving variational problems in vision," IEEE Trans. on PAMI, Vol.12, No.9, pp.855-867, 1990.
 [5] D.Geiger, A.Gupta, L.A.Costa, and J.Vlontzos, "Dynamic Programming for Detecting, Tracking, and Matching Deformable Contours," IEEE Trans. on PAMI, Vol.17, No.3, pp.294-302, 1995.
 [6] D. Terzopoulos, D.Metaxas, "Dynamic 3D Models with Local and Global Deformations: Deformable Superquadrics," IEEE Trans. PAMI, Vol.13, No.7, July, 1991, 703-714.
 [7] B.C.Vemuri and R.Malladi, "Constructing Intrinsic Parameters with Active Models for Invariant Surface Reconstruction," IEEE Trans. PAMI. Vol.15, No.7, July, 1993.
 [8] R.M.Bolle and B.C.Vemuri, "On Three-Dimensional Surface Reccnstruction Methods," IEEE Trans. PAMI, Vol.13, No.1, Jan., 1991.
 [9] Marie-Odile Berger, "How to track efficiently piecewise curved contours with a view to reconstructing 3D objects," ICIIP 94, pp.32-37.
 [10] N.Ueda and K.Mase, "Tracking Moving Contours using Energy Minimizing Elastic Contour Models," ECCV 92, pp.453-457, 1992.
 [11] D.K.Kim and C.J.Hwang, "Boundary Segmentation and Tracking Using an Active Contour Model with Global Deformations," ACCV'95, vol.2, pp.365-369, 1995.
 [12] 김동근, 황치경, "활성모델에 의한 경계선 분할 및 모델 적합," 정보과학회 논문지(B), Vol.23, No.2, pp.210-220, 1996.
 [13] J.D.Foley and A.Van Dam, Fundamentals of Interactive Computer Graphics, Addison-Wesley publishing. Company, 1982.



김 동 근

1989년 충남대학교 계산통계학과(계산학 전공) 졸업(이학사)

1991년 충남대학교 계산통계학과(계산학 전공) 졸업(이학석사)

1996년 충남대학교 컴퓨터과학

과(정보과학 전공) 졸업(이학박사)

1991년~1992년 충남대학교 조교

1996년~현재 서남대학교 전임강사

관심분야: 컴퓨터 그래픽스, 컴퓨터 비전, 의료영상처리, 수치아고리듬 등임



최 증 원

1989년 충남대학교 계산통계학과(계산학 전공) 졸업(이학사)

1993년 8월 충남대학교 계산통계학과(계산학 전공) 졸업(이학석사)

1994년~1997년 충남대학교 전

산학과(정보과학 전공) 박사수료

1994년~현재 우송산업대학교, 충남대학교 시간강사

관심분야: 멀티미디어 시스템, 멀티미디어 통신 등임



황 치 정

1975년 서강대학교 수학과 졸업(학사)

1979년 서강대학교 수학과 졸업(석사)

1981년 미국 SUNY at Albany 수학과 졸업(석사)

1985년 미국 Univ. of Connecticut 전산학과 졸업(석사)

1987년 미국 Univ. of Connecticut 전산학과 졸업(박사)

1988년~1993년 충남대학교 컴퓨터과학과 조교수

1993년~현재 충남대학교 컴퓨터과학과 부교수

관심분야: 컴퓨터 비전, 의료영상처리, 이미지 검색, 멀티미디어 등임