

3차원 건물모델의 정규화

Regularization of 3D Building Models

김성준*, 이임평**

Seongjoon Kim, Impyeong Lee

서울시립대학교 공간정보공학과 박사과정*, 조교수**

요지

가상현실이나 인터넷 웹지도 서비스와 같이 3차원의 실세계를 시스템 상에 그대로 재현(reconstruction)하기 위해서는 정교하고 세밀한 3차원 도시모델이 필수적이다. 이러한 3차원 도시모델의 자동생성은 원격탐사 및 사진측량 분야에서 많은 연구가 수행되고 있다. 이러한 연구들은 다양한 센서 데이터와 기 구축되어 있는 GIS자료를 이용하여 건물, 도로, 지형 등의 도시모델을 자동으로 생성하고자 한다. 그러나 대부분의 연구에서 추출한 각 기본요소(primitives)-평면패치(planar patches), 에지(edges), 모서리(corners)에 대한 국부적인 정제(refinement)는 수행하였으나, 생성한 건물 모델에 대한 광역적인 조정을 통한 정규화에 대한 연구는 미비한 상태이다. 본 연구에서는 다양한 데이터로부터 생성된 B-rep (boundary representation) 형태의 건물 모델에 대하여 기하학적인 제약요소(constraints)를 이용한 정규화(regularization) 방법론을 제시하고자 한다. 제안하는 방법은 건물의 Domain Knowledge에 기반하여 도출한 건물을 구성하는 기본요소(primitives)간의 인접성, 직교성, 평행성, 교차성 등의 다양한 제약조건을 이용하여 광역적으로 조정한다. 시뮬레이션 데이터에 적용한 결과의 분석을 통해 제안된 정규화 방법을 통해 오차가 포함된 건물모델이 보다 정형화된 형태로 조정되었음을 확인하였다.

1. 서론

3차원 도시모델에 대한 수요가 증가함에 따라 원격탐사 및 사진측량 분야에서는 항공영상이나 라이다데이터와 같은 원격센서 데이터를 이용하여 건물의 세밀한 3차원 모델을 자동으로 생성하는 것에 대한 많은 연구를 수행하고 있다.

현재까지 이루어진 건물 모델링의 방법들을 살펴보면 일반적으로 항공영상이나 라이다데이터와 같은 센서데이터로부터 분할(segmentation)을 수행하여 건물을 구성하는 기본요소(primitives)-평면패치

(planar patches), 에지(edges), 모서리(corners)를 추출하고, 이들을 다시 재구성(reconstruction)함으로써 다면체(B-rep) 구조의 건물모델을 생성하였다 (Vosselman, 1999; Vögtle & Steinle, 2000; Rottensteiner, 2003; Alharty & Bethel, 2004).

그러나 기본요소(primitives)에 대한 국부적인 정제(refinement)는 수행하였으나, 생성한 건물 모델에 대한 정규화(regularization)를 고려한 연구는 미비한 상태이다. 정제(refinement)는 각각의 기본요소가 보다 정형화된 형상이 되도록 개

별적인 조정을 수행하는 과정이다. 그에 반해 정규화(Regularization)는 기본요소의 집합인 객체(건물)가 지나야할 규칙에 기반하여 기본요소를 광역적으로 조정하기 때문에 건물 모델의 품질을 향상시켜줄 수 있다.

본 연구에서는 생성한 3차원 건물 모델의 품질을 높이기 위해 기하학적인 제약요소(constraints)를 이용한 정규화(regularization) 방법을 제시하고 그 효용성을 판단해보고자 한다.

2. 정규화 조정 방법

정규화란 모델을 구성하는 기본요소(primitives)들을 모델이 지켜야할 제약요소-인접성, 직교성, 평행성, 교차성 등을 고려하여 광역적으로 조정(adjustment)하는 과정이다.

본 연구에서 정규화의 대상이 되는 건물의 기하모델은 경계표현(boundary representation, B-rep)방식으로 구성되었다고 가정한다. B-rep은 개별 건물을 하나의 다면체(polyhedral) 모델로 표현하며 이를 구성하는 면(facet), 에지(edge), 점(vertex)의 리스트로 나타내어진다. 그리고 제안하는 정규화 방법을 통해 이러한 다면체 모델의 경계점(vertex)의 3차원 좌표값을 조정하고자 한다.

가. 관측방정식

건물 모델의 정규화를 위한 조정의 대상은 다면체 모델을 구성하는 점의 3차원 좌표들이며, 3차원 좌표 점에 대한 관측방정식은 다음과 같이 식(1)으로 나타낸다. Ξ_p 는 조정된 점의 미지수 벡터이며, Ξ_p^o 는 Ξ_p 에 대한 초기치 이다. 여기에 $\xi_p = \Xi_p - \Xi_p^o$ 를 대입하면 식(2)와 같이 표

현할 수 있다.

$$\Xi_p^o = \Xi_p + e_p, e_p \sim (0, \sigma_p^2 I_{3n}) \quad (1)$$

$$0 = \xi_p + e_p, e_p \sim (0, \sigma_p^2 I_{3n}) \quad (2)$$

나. 제약요소의 일반식

건물 모델의 정규화를 수행하기 위해서는 식(2)의 관측방정식에 제약요소를 추가하여 함께 고려해야 한다. 본 연구에서 고려하는 제약조건은 크게 공면조건과 공선조건으로 분류된다. 이러한 제약요소는 식(3)과 같은 형태로 표현할 수 있다. G 는 제약요소를 나타내는 식으로써 좌표값 Ξ_p 와 제약요소로 인하여 추가된 미지수 Ξ_c 의 함수로 표현된다. e_c 는 각 제약요소의 가정된 불확실성으로부터 기인되는 오차를 의미한다. Q_c 는 제약요소들 사이의 여인수 행렬(cofactor matrix)이다. 식(3)을 선형화하면 식(4)와 같이 정리할 수 있다.

$$0 = G(\Xi_p, \Xi_c) + e_c, e_c \sim (0, \sigma_c^2 Q_c) \quad (3)$$

$$z = [K_p \ K_c] \begin{bmatrix} \xi_p \\ \xi_c \end{bmatrix} + e_c, e_c \sim (0, \sigma_c^2 Q_c) \quad (4)$$

다. 광역조정(Global Adjustment)

건물 모델은 다양한 제약조건을 동시에 만족 시켜야 하므로, 정규화 조정은 다양한 제약조건들을 일괄적으로 고려하는 광역조정이 되어야 한다.

식(2)의 관측방정식과 식(4)의 제약요소를 함께 표현하고, 이를 최소제곱법을 적용하여 정리하면 식(7)과 같이 정규방정식(normal equations)이 된다. $\hat{\xi}_p$ 와 $\hat{\xi}_c$ 는 각각 ξ_p 와 ξ_c 에 대한 추정치 이고, $\hat{\lambda}$ 는 더미(dummy) 변수이다.

$$\begin{bmatrix} I_{3n} & 0 & K_p^T \\ 0 & 0 & K_c^T \\ K_p & K_c & -Q_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\xi}_p \\ \hat{\xi}_c \\ \hat{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z \end{bmatrix} \quad (7)$$

3. 제약요소의 수학적 표현

건물모델에 적용할 수 있는 기본적인 제약요소는 다수의 점이 하나의 동일한 평면에 있다는 공면조건, 다수의 점이 하나의 동일한 직선상에 있다는 공선조건이 있으며, 이러한 조건을 수학적으로 표현하고자 한다.

가. 공면조건

다수의 점이 하나의 평면상에 존재한다는 공면조건은 크게 두 가지 경우에 적용된다. 첫째는 하나의 면(facet)을 구성하는 모든 경계점들이 동일한 평면상에 존재해야 하는 경우이고, 2개 이상의 인접한 면(facet)이 존재할 때 인접한 경계점들이 자신의 면과 동시에 인접한 면상에도 존재하는 경우이다.

(a, b, c) 가 평면의 계수이고, 평면상에 하나의 점 (x_i, y_i, z_i) 이 존재한다는 제약요소를 선형화하여 정리하면 식(8)과 같이 나타난다. 여기서 (a_0, b_0, c_0) 와 (x_i^o, y_i^o, z_i^o) 는 각각 평면계수와 좌표 값의 초기치를 의미하고, $(\Delta a, \Delta b, \Delta c)$ 와 $(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$ 는 조정량을 뜻한다.

$$z_i^o - a_0 x_i^o - b_0 y_i^o - c_0 = [a_0 \ b_0 \ -1 \ x_i^o \ y_i^o \ 1] \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \\ \Delta a \\ \Delta b \\ \Delta c \end{bmatrix} \quad (8)$$

그리고 동일한 평면상에 존재하는 m 개의 점에 대한 제약요소를 식(4)에 대응하면 각 변수는 다음과 같이 표현할 수 있

다.

$$z \equiv \begin{bmatrix} z_1^o - a_0 x_1^o - b_0 y_1^o - c_0 \\ z_2^o - a_0 x_2^o - b_0 y_2^o - c_0 \\ \vdots \\ z_m^o - a_0 x_m^o - b_0 y_m^o - c_0 \end{bmatrix}$$

$$K_p \equiv \begin{bmatrix} a_0 & b_0 & -1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_0 & b_0 & -1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_0 & b_0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$K_c \equiv \begin{bmatrix} x_1^o & y_1^o & 1 \\ x_2^o & y_2^o & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m^o & y_m^o & 1 \end{bmatrix}$$

$$\xi_p \equiv [\Delta x_1 \ \Delta y_1 \ \Delta z_1 \ \Delta x_2 \ \Delta y_2 \ \Delta z_2 \ \cdots \ \Delta x_m \ \Delta y_m \ \Delta z_m]^T$$

$$\xi_c \equiv [\Delta a \ \Delta b \ \Delta c]^T \quad (12)$$

나. 공선조건

건물 모델의 경우에 다수의 점이 하나의 직선상에 존재한다는 공선조건은 주로 벽면에서 발견되며 대부분 수평면에 평행하거나 수직인 직선이 고려된다.

(a, b) 는 직선의 계수이고, (x, y) 이 직선상의 한 점의 좌표라고 할 때, 직선의 방정식을 공면조건과 같이 수식을 전개하면 수평선의 경우에는 식(15), 수직선의 경우에는 식(16)과 같이 정리할 수 있다.

$$z \equiv \begin{bmatrix} z_1^o - a_0 x_1^o - b_0 \\ z_2^o - a_0 x_2^o - b_0 \\ \vdots \\ z_m^o - a_0 x_m^o - b_0 \end{bmatrix}$$

$$K_p \equiv \begin{bmatrix} a_0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_0 & -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad K_c \equiv \begin{bmatrix} x_1^o & 1 \\ x_2^o & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_m^o & 1 \end{bmatrix}$$

$$\xi_p \equiv [\Delta x_1 \ \Delta y_1 \ \Delta z_1 \ \Delta x_2 \ \Delta y_2 \ \Delta z_2 \ \cdots \ \Delta x_m \ \Delta y_m \ \Delta z_m]^T$$

$$\xi_c \equiv [\Delta a \ \Delta b]^T \quad (15)$$

$$z \equiv \begin{bmatrix} x_1^o - x_2^o \\ y_1^o - y_2^o \\ x_2^o - x_3^o \\ y_2^o - y_3^o \\ \vdots \\ x_{m-1}^o - x_m^o \\ y_{m-1}^o - y_m^o \end{bmatrix}$$

$$K_p \equiv \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\xi_p \equiv [\Delta x_1 \Delta y_1 \Delta z_1 \Delta x_2 \Delta y_2 \Delta z_2 \cdots \Delta x_m \Delta y_m \Delta z_m]^T$$

(16)

4. 실험

본 연구에서 제안하는 정규화 방법을 검증하기 위하여, 건물 모델의 위상학적 구조를 알고 있는 정규화된 샘플 데이터를 생성한 후 평균이 0이고 분산이 1인 정규분포를 따르는 오차를 삽입시킴으로써 비정규화된 모델데이터를 만들어 제안한 정규화 방법을 적용하여 보았다. 아래의 그림 1은 실험에서 사용할 정규화된 3차원 건물 모델이다.

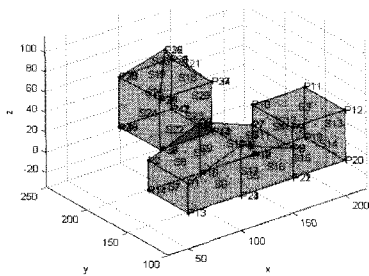


그림 1. 건물모델(참값)

그림 2는 오차가 포함된 건물 모델 데이터이다. 그림을 자세히 살펴보면 건물을 이루는 각 면들은 이웃하는 면과 공통의 점을 공유하기도 하지만, 사각뿔형태의 건

물의 경우에는 서로 인접한 면에 소속된 두 점이 동일한 지점임에도 불구하고 서로 다른 위치의 좌표값을 가지고 있음을 알 수 있다. 건물모델링 과정에서 이러한 현상은 기본요소들이 완벽하게 추출되지 못하기 때문이다.

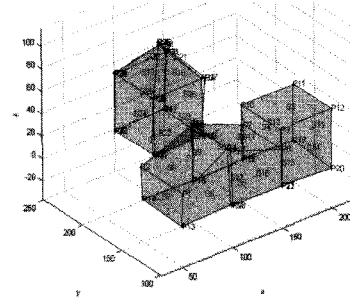


그림 2. 오차가 삽입된 건물모델

생성한 오차가 포함된 모델데이터를 이용하여 정규화 과정을 수행한 결과, 그림 3과 같이 오차가 포함되었던 건물의 모델데이터가 제약조건을 만족함으로써 위상학적 오류가 제거되었음을 알 수 있다.

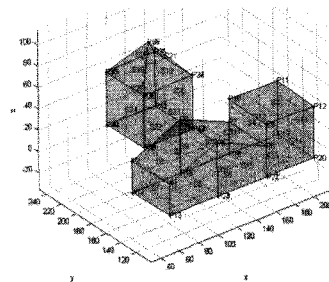


그림 3. 정규화가 수행된 건물모델

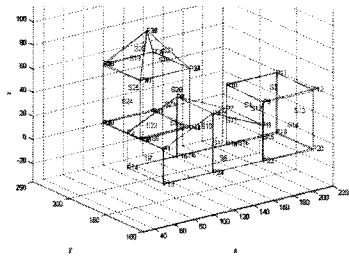


그림 4. 건물모델의 비교

그림 4는 실험을 수행하기 위해 생성한 원래의 건물 모델 데이터와 노이즈를 삽입한 후 정제과정을 수행한 후의 모델 데이터를 가시화한 것이다. 원래의 모델 데이터상의 건물 점 좌표값과 실험결과의 좌표값 간에는 다소 차이가 존재하지만, 오차가 포함되어 있는 데이터로부터 정제과정을 통해 위상학적인 오류가 없는 건물 모델이 생성되었음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 3차원 건물모델에 대한 정규화 방법을 제안하였다. 그리고 샘플데이터에 제안한 방법론을 적용한 결과 모델의 위상학적인 오류가 제거되어 정형화된 건물 모델이 생성되었음을 확인하였다. 정규화는 3차원 건물모델링의 중요한 프로세스로서, 더욱 세밀한 건물모델 구축연구 분야에 많은 도움이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단 신진교수 지원사업(기초과학분야)의 “항공라이데이터와 수치지도를 융합한 3차원 건물모델의 자동생성”과제의 일환으로 수행되었습니다.(과제번호: KRF-2007-331-D00485)

참고문헌

Alharty, A., Bethel, J., 2004. Detailed building reconstruction from airborne laser data using a moving surface method. In: IAPRSIS XXXV - B3, pp. 213-218.

Rottensteiner, F., 2003. Automatic generation of high-quality building models from Lidar data. IEEE CG&A 23(6), pp. 42-51.

Vögtle, T., Steinle, E., 2000. 3D modelling of buildings using laser scanning and spectral information. In: IAPRSIS XXXIIB3, pp. 927-933.

Vosselman, G., 1999. Building reconstruction using planar faces in very high density height data. In: IAPRS XXXII/3-2W5, pp. 87 - 92.