

단일 위성 영상 기반의 반자동 건물 모델링 시스템

오 선 호[†] · 장 경 호^{**} · 정 순 기^{***}

요 약

최근 고해상도 위성 영상의 보급에 따라 이를 활용한 서비스가 증가하고 있다. 특히, Google Earth™와 Virtual Earth™와 같은 전 지구 차원의 3차원 가시화 서비스나 최근 일부 도시에 대하여 제공되고 있는 3차원 GIS 서비스는 지형과 지물에 대한 사실적인 기하정보를 제공하고 있다. 이러한 서비스들은 도시 개발 계획의 수립, 도로망의 개선, 엔터테인먼트 사업, 군사 시뮬레이션, 재난 및 재해 관리 등의 다양한 분야에 활용이 가능하다. 이러한 활용을 위해서는 고해상도 위성 영상을 이용하여 지형 및 지물 정보를 효과적으로 추출하는 연구가 요구된다. 본 논문에서는 단일 위성 영상으로부터 건물의 3차원 모델을 추출하기 위한 요구사항을 살펴본 뒤 이를 기반으로 효과적인 모델 추출을 위한 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 영상의 특징 정보와 건물, 위성, 태양의 기하 관계를 이용하여 최소한의 사용자 조작으로 건물의 3차원 모델을 추출한다. 마지막으로 실제 위성 영상으로부터 건물의 3차원 모델 추출을 수행하고 효과적으로 3차원 모델을 획득할 수 있음을 보인다.

키워드 : 건물모델링, 사용자 인터페이스, 사용자 인터랙션, 위성영상분석

A Semi-Automatic Building Modeling System Using a Single Satellite Image

Seon Ho Oh[†] · Kyung Ho Jang^{**} · Soon Ki Jung^{***}

ABSTRACT

The spread of satellite image increases various services using it. Especially, 3D visualization services of the whole earth such as Google Earth™ and Visual Earth™ or 3D GIS services for several cities provide realistic geometry information of buildings and terrain of wide areas. These service can be used in the various fields such as urban planning, improvement of roads, entertainment, military simulation and emergency response. The research about extracting the building and terrain information effectively from the high-resolution satellite image is required. In this paper, presents a system for effective extraction of the building model from a single high-resolution satellite image, after examine requirements for building model extraction. The proposed system utilizes geometric features of satellite image and the geometric relationship among the building, the shadow of the building, the positions of the sun and the satellite to minimize user interaction. Finally, after extracting the 3D building, the fact that effective extraction of the model from single high-resolution satellite will be show.

Keywords : Building Modeling, User Interaction, User Interface, Satellite Image Analysis

1. 서 론

최근 고해상도 위성영상의 보급에 따라 이를 활용한 서비스가 증가하고 있다. 특히, Google Earth™와 Virtual Earth™와 같은 전 지구 차원의 3차원 가시화 서비스나 최근 일부 도시에 대하여 제공되고 있는 3차원 GIS 서비스는 위성영상을 활용한 대표적인 예이다. 위성 영상을 이용한 3차원

서비스는 지형과 지물에 대한 사실적인 기하정보를 제공하며, 도시 개발 계획 수립, 도로망 개선, 엔터테인먼트 사업, 군사 시뮬레이션, 재난 및 재해 관리 등의 다양한 분야에 활용이 가능하다. 이러한 활용을 위해서는 우선 고해상도 위성영상을 이용하여 지형 및 지물 정보를 효과적으로 추출하는 연구가 요구된다.

영상으로부터 대상의 3차원 기하정보를 추출하는 연구는 컴퓨터 비전 분야와 사진측량(Photogrammetry) 분야에서 오랫동안 연구되어온 주제이며 현재에도 활발하게 연구가 진행되고 있다. 현재 위성영상으로부터 물체의 3차원 기하 정보, 그 중에서도 건물을 추출하는 연구는 사용자의 개입 여부와 입력으로 활용하는 데이터의 종류에 따라 다음과 같

※ 이 논문은 2008학년도 경북대학교 연구교수 연구비에 의하여 연구되었음.

† 준 회 원 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 박사과정

** 정 회 원 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 연구교수

*** 총신회원 : 경북대학교 컴퓨터공학과 교수

논문접수 : 2009년 5월 27일

수 정 일 : 1차 2009년 7월 31일, 2차 2009년 8월 13일

심사완료 : 2009년 9월 11일

이 분류된다.

먼저 사용자의 개입 여부에 따라 두 가지로 분류된다. 첫 번째는 위성영상으로부터 자동으로 3차원 건물 모델을 추출하는 방법이다[1-4]. 이러한 방법들은 도시나 근교 지역의 지붕 형태의 복잡성과 주변 사물에 의한 가려짐, 세그멘테이션 등의 어려움으로 인해 추출된 모델의 정확도 오차가 커지는 문제점이 있다. 두 번째는 사용자의 조작을 활용하여 건물의 3차원 모델을 추출하는 반자동 방법이다[5-8]. 반자동 방법은 자동 추출 방법과 함께 사용자의 조작을 이용하여 3차원의 건물 모델을 추출한다. 하지만, 많은 양의 조작이 요구된다.

입력으로 활용하는 데이터의 종류에 따라서는 세 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째는 단영상을 이용하는 방법이다[9-11]. 단영상 기반의 방법들은 다른 방법들에 비하여 주어지는 정보가 상대적으로 부족하므로 사용자의 조작이 필수적이다. 두 번째는 복수의 영상을 이용하는 방법이다[12-14]. 복수의 위성 영상을 이용하는 경우, 일반적으로 스테레오 알고리즘을 기반으로 3차원의 모델을 추출한다. 그러나 실제 스테레오 영상을 취득하기 위해서는 단영상에 비해 데이터 취득의 어려움과 비용의 문제가 있다. 세 번째는 단영상 혹은 복수의 영상과 DEM(Digital Elevation Model)이나 레이저 센서 정보, 2차원 지도 등의 부가적인 정보를 활용하는 방법이다[15, 16]. 이들 방법의 경우, 앞서 방법들에 비해 상대적으로 정확한 정보를 추출하거나 활용할 수 있으나, 앞서 방법들에 비해 요구되는 정보가 많으므로 마찬가지로 데이터 취득의 어려움과 비용 상의 문제가 있다.

최근 고해상도 위성영상의 보급에도 불구하고 가용한 자원이 단영상으로 제한되는 경우는 여전히 존재한다. 이는 기존의 다중 영상을 이용한 기법이나 DEM과 같은 부가적인 센서 정보를 이용한 기법들을 적용하기 어려움을 의미한다. 본 논문은 앞서 살펴본 방법 중 고해상도 위성 단영상에서 반자동으로 건물의 3차원 모델을 추출하는 것에 중점을 둔다.

일반적으로 위성영상으로부터 건물의 3차원 모델을 추출하기 위해서는 우선 건물의 지붕에 대한 추출이 선행되어야 한다. 그러나 건물 지붕의 추출은 다양한 시도[4, 9]에도 불구하고 지역에 따른 형태의 다양성과 복잡성으로 인해 자동적인 추출에 어려움이 있다. 건물의 지붕을 획득한 후에는 건물의 높이를 추정해야 하는데, 위성 단영상을 이용한 기존 연구[9-11]들은 건물의 지붕점과 그에 상응하는 바닥점을 이용하거나 건물의 그림자 길이를 이용하여 건물의 높이를 추정하였다. 그러나 도시지역과 같이 건물이 밀집된 지역은 바닥점의 관측이 어려우므로 이태운[17]의 연구에서는 가상 그림자 투영을 이용하여 건물의 높이를 추정하였다. 또한 건물의 그림자 끝이 식별되지 않는 문제점이 있어 김혜진[18]의 연구에서는 삼각 백터구조 기반의 높이 추정 방법을 제안하였다. 한편, 기존의 단영상에서 사용자 이용한 건물 모델 추출에 관한 연구들[7-11]에서는 사용자가 건물을 이루는 몇 개의 점들을 사용자가 입력하고 미리 정의된 몇 가지 연산을 이용하여 건물의 모델을 추출하였다. 그러나 이

러한 연구들은 추출가능한 건물의 형태에 제약이 존재하였으며 경우에 따라 많은 사용자 조작이 요구된다. 이에 본 논문에서는 위성 단영상에서 반자동으로 3차원 건물 모델을 추출하기 위한 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 건물의 높이 추정에 그치는 것이 아니라 상세한 건물 모델을 획득하기 위한 과정을 포함한다. 제안하는 시스템은 건물의 지붕 추출, 높이 추정, 상세 모델 편집 등의 전반적인 과정에서 사용자의 조작을 활용한다. 건물의 높이 추정에서는 사용자의 조작을 최소화하기 위하여 위성영상의 특징 정보, 그리고 건물과 그림자, 위성, 태양 간의 기하관계를 이용한 자동화 기법을 적용하여 사용자의 조작을 최소화하며, 자동화 기법의 적용이 어려운 경우 간단한 조작을 이용하여 건물의 높이를 추정한다. 또한 오일러 연산자 기반의 모델 편집 연산자를 정의하여 상세한 모델의 추출을 위한 사용자 조작을 최소화한다.

본 논문의 전체적인 구성은 다음과 같다. 우선 2절에서 건물의 3차원 모델을 반자동으로 추출하기 위한 요구사항들을 분석하고 이를 토대로 시스템을 설계한다. 3절에서는 전처리 과정을 기술한다. 4절에서는 사용자 조작과 더불어 건물의 3차원 모델 생성에 대한 내용을 상세히 설명한다. 5절에서는 제안하는 시스템의 프로토타입을 이용한 실험 결과를 분석하고 마지막으로 6절에서 결론과 함께 향후 연구에 대하여 논의한다.

2. 시스템 설계

본 절에서는 위성 단영상에서 반자동으로 건물의 3차원 모델을 추출하기 위한 시스템의 요구사항을 분석하고, 이러한 요구사항을 만족하기 위한 시스템의 설계에 대한 내용을 기술한다.

2.1 요구사항

본 논문에서는 관련 연구를 토대로 위성 단영상에서 건물의 3차원 모델을 추출하기 위한 시스템의 요구사항을 다음과 같이 도출하였다.

첫째, 직관적이고 효과적인 조작을 제공하여야 한다. 3DS Max™이나 Maya™와 같은 상용 3차원 모델 편집 툴은 방대한 기능을 제공하는 반면, 일반적인 사용자가 사용하기에 어려움이 있다. 따라서 좀 더 직관적인 사용자 인터페이스와 간단한 학습을 통해 일반적인 사용자가 활용 가능하여야 한다. 또한, 간단한 조작을 통해서 대상의 3차원 모델 추출이 가능하여야 하며, 조작이 용이하여야 한다.

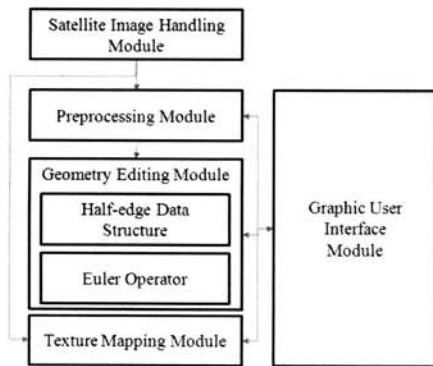
둘째, 상세한 모델 추출이 가능하여야 한다. 즉, 단순한 형태의 모델뿐만 아니라 보다 복잡한 형태의 모델 추출이 가능하여야 한다. 상세한 모델 추출을 위해서는 모델 기하정보의 편집이 자유로워야 한다. 따라서 이를 위해서는 편집에 보다 최적화된 기하정보 관리 모듈이 요구된다.

셋째, 추출된 모델의 수치적 정확도를 만족하여야 한다. 추출한 모델의 기하정보는 활용에 따라 다양한 정확도를 요

구한다. 그러므로 영상에 대한 분석과 함께 사용자의 조작을 더하여 최대한의 정확도를 제공하여야 한다. 본 논문에서는 사용자 조작 오차가 1 화소 이하라고 가정하고 이를 기준으로 건물의 높이 오차의 임계값을 설정하였다. 오차는 사용자의 조작 이외에 GSD(Ground Sampling Distance)에 비례하며, 위성과 태양의 고도각, 방위각 그리고 건물이 영상의 y축과 이루는 각에 의해 결정된다. 실험 영상에서의 높이 오차의 임계값은 약 2m로 설정하였다. 이와 관련된 내용은 3절에서 상세히 기술한다.

2.2 시스템 구성도

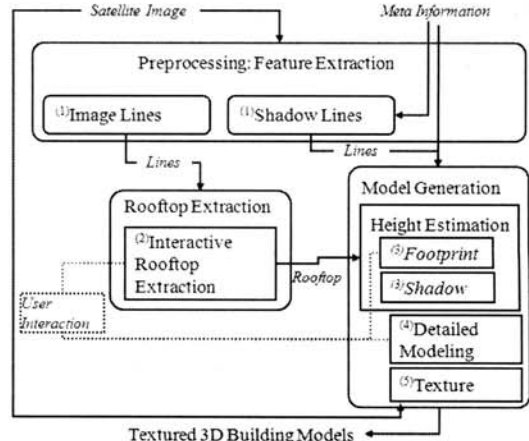
앞서 언급한 요구사항을 중심으로 위성영상에서 건물의 3차원 모델을 추출하기 위한 시스템을 다음과 같이 설계하였다. 제안하는 시스템은 (그림 1)과 같이 다섯 개의 모듈로 구성된다. 위성영상 처리 모듈은 입력으로 주어지는 위성영상과 메타 정보를 읽어 들이고 영상과 메타 정보를 다른 모듈로 전달하는 역할을 한다. 전처리 모듈은 관심 영역의 선택 및 영상에 대한 분석을 수행하고 이후의 활용을 위해 영상에서 획득할 수 있는 특징 정보들을 추출한다. 기하 편집 모듈은 기하정보의 관리 및 편집을 위한 Half-edge 자료 구조(Half-edge data structure, 이하 HDS)와 오일러 연산자(Euler operator)[19]로 구성된다. 텍스처 맵핑 모듈은 모델에 대한 텍스처 적용에 관련된 부분을 담당한다. 마지막으로 사용자 인터페이스 모듈은 사용자의 조작을 처리하여 각 모듈로 전달한다.



(그림 1) 시스템 구성도

2.3 모델 추출 시나리오

모델 추출 시나리오는 (그림 2)와 같다. 위성영상과 메타 정보가 주어지면 우선 관심영역을 정의한다. 일반적으로 위성영상 전체에 대하여 3차원 모델 추출이 요구되지 않으므로, 관심영역을 정의하고 해당 부분에 대하여 이후의 과정을 수행한다. 그림 2에서 숫자는 모델 추출 시나리오의 진행 순서를 나타낸다. 건물의 3차원 모델 추출을 위한 첫 번째 단계는 관심영역에 존재하는 선과 그림자 정보를 추출하는 전처리 단계이다. 두 번째는 건물의 지붕에 대한 윤곽을 추출하는 것이다. 건물의 지붕 윤곽은 사용자의 조작을 통해 추출한다. 세 번째 단계는 건물의 높이 추정이다. 건물의



(그림 2) 모델 추출 시나리오

높이는 앞서 전처리 과정에서의 결과를 이용하여 자동적으로 추정한다. 만약 자동적인 추정이 어려운 경우, 사용자의 조작을 통해 반자동으로 추정한다. 네 번째 단계는 추출된 단순한 건물 모델을 보다 상세하게 다듬는 과정이며, 마지막으로 건물에 텍스처를 적용한다.

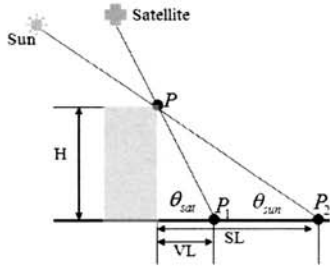
3. 전처리 단계

전처리 단계에서는 관심영역의 영상과 메타 정보로부터 선과 그림자 정보를 추출한다. 추출한 선과 그림자 정보는 이후의 건물 지붕 윤곽 추출뿐만 아니라 높이 추정에도 활용된다. 이 절에서는 메타 정보의 활용과 영상에서의 선과 그림자 정보의 추출에 대한 내용을 기술한다. 구체적인 내용은 아래와 같다.

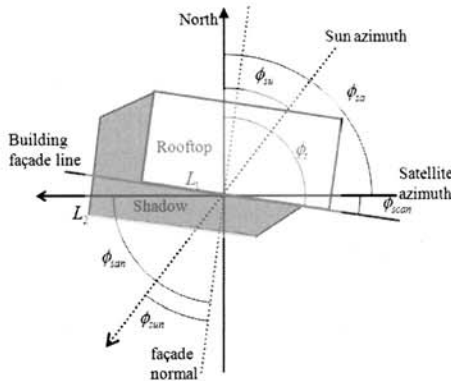
3.1 메타 정보 및 기하 관계

위성영상의 메타 정보는 태양과 위성의 위치, 경위도 좌표, GSD, 영상의 해상도 등 다양한 정보를 포함한다. 이러한 메타 정보를 이용하여 영상과 3차원 모델 좌표간의 관계를 설정하고 건물과 그림자, 위성 그리고 태양 사이의 기하 관계를 정의한다. (그림 3)은 이러한 기하 관계를 나타낸다. 이 때, θ_{sat} 와 ϕ_{sun} 위성과 태양의 고도각을 나타낸다. 건물의 높이 H 는 점 P 에 대응되는 바닥의 한 점에서 점 P 가 위성에 의해 투영된 점 P_1 까지의 거리 VL 과 태양에 의해 투영된 점 P_2 까지의 거리 SL 과 고도각의 식으로 정의될 수 있다. (그림 4)는 (그림 3)을 확장하여 일반적인 경우의 건물과 그림자, 위성 그리고 태양 사이의 기하 관계를 나타낸다. 이 때, ϕ_{sun} 은 위성과 건물이 이루는 각을 나타내고 ϕ_l 는 건물의 옆면과 영상의 y축이 이루는 각을 나타낸다. ϕ_{su} 는 영상의 y축과 태양이 이루는 각을 나타내고 ϕ_{so} 는 영상의 y축과 위성이 이루는 각을 나타낸다. 그리고 ϕ_{sun} 은 건물 옆면에 대한 법선과 위성이 이루는 각, ϕ_{sun} 은 태양과 건물 옆면에 대한 법선이 이루는 각을 나타낸다. (그림 3)의

점 P_1, P_2 는 (그림 4)의 선 L_1, L_2 에 대응된다. 이러한 관계로부터 건물의 높이 H 는 식 (1)과 같이 계산된다. (그림 4)와 식 (1)은 [20]로부터 차용하였다.



(그림 3) 건물과 그림자, 위성 그리고 태양의 기하 관계



(그림 4) 건물과 그림자, 위성 그리고 태양의 평면 기하 관계도

$$\begin{aligned}
 SL &= H / \tan(\theta_{sun}) \\
 VL &= H / \tan(\theta_{sat}) \\
 S_{sun} &= SL \times \cos(\phi_{sun}) \\
 S_{sat} &= VL \times \cos(\phi_{sat}) \\
 \phi_{sun} &= \phi_{su} + 90 - \phi_t \\
 \phi_{sat} &= \phi_{sa} + 90 - \phi_t \\
 S &= S_{sun} - S_{sat} \\
 K_{ot} &= \frac{\sec(\phi_{scm})}{(\cos(\phi_{sun}) / \tan(\theta_{sun})) - (\cos(\phi_{sat}) / \tan(\theta_{sat}))} \\
 H &= S \times K_{ot}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

3.2 선 정보 및 그림자 선 추출

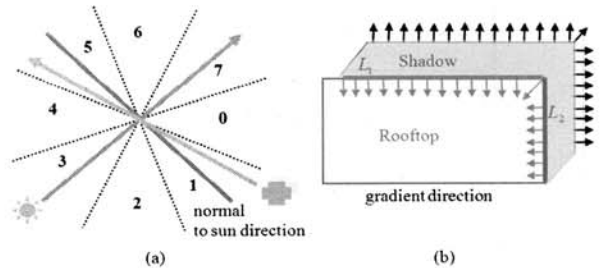
영상에서 선 정보를 추출하기 위하여 본 논문에서는 IHT (Inverse Hough Transform) [21]을 사용하였다.

위성 영상에서의 그림자는 건물의 존재 유무를 나타내는 중요한 단서가 된다. 그림자 선은 건물과 그림자 사이에 존재하며, 이는 건물과 그림자 사이의 관계를 정의하는데 사용된다. 그림자 선을 추출하기에 앞서 우선 그림자 영역의 추출이 선행되어야 한다. 일반적으로 그림자는 주변에 비하여 상대적으로 낮은 밝기(intensity) 값과 큰 색상(hue) 값을 가지며[22], 특히 위성영상에서의 그림자는 대기의 Rayleigh 산란 효과로 인해 강한 blue-violet 파장 성분을 가진다[23].

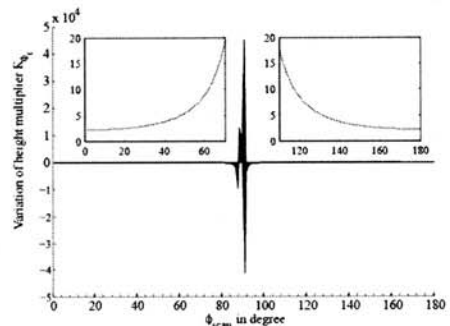
따라서 이러한 특성을 이용하여 그림자 영역은 다음과 같이 추출된다. 우선 입력 영상에 대하여 HSI(Hue-Saturation-Intensity) 색상 변환을 적용하고 SRI(Spectral Ratio Image)를 얻는다[24]. 그리고 SRI에 히스토그램을 이용한 임계값[25]을 적용하여 그림자 영역을 찾는다.

그림자 선을 추출하기 위하여 우선 그림자 영역에서의 에지를 추출한다. 본 논문에서는 추출한 에지의 방향에 따라 8가지로 나누었다. (그림 5)의 (a)는 그림자 에지의 방향에 따른 분류와 위성과 태양의 방향을 나타내고, (b)는 그림자 영역에서의 에지의 방향성을 나타낸다. 태양과 위성의 방향이 (그림 5)에서 보는바와 같이 주어질 때, 에지가 가지는 방향이 2, 3, 4, 5에 해당하는 경우, 이들 에지는 건물의 지붕을 이루는 것으로 간주한다. 그리고 0, 1, 6, 7에 해당하는 경우, 그림자의 경계로 간주한다. 마지막으로 IHT를 적용하여 에지로부터 선을 추출한다.

그림자 에지로부터 그림자 선을 추출하면 두 개 이상의 그림자 경계선과 지붕 윤곽선들이 검출된다. 따라서 적절한 지붕 윤곽선과 그림자 경계선의 선택이 요구된다. 이를 위하여 (그림 4)에서와 같이 건물과 위성이 이루는 각 ϕ_{scm} 이 건물 높이 추정에 미치는 영향을 (그림 6)과 같이 분석하였다. (그림 6)은 영상에서 1 화소에 대하여 ϕ_{scm} 의 변화에 따른 건물 높이의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 ϕ_{scm} 이 이루는 각이 60°에서 120° 사이의 구간에서는 높이 변화율이 급격하게 증가하므로 이 부분을 제외한 나머지 부분에 대하여 검출되는 선들을 선택한다. 그리고 제외 구간외의 나머지 구간에 대하여 높이 변화량의 평균은 약 4m로 나타났으므로, 이보다 작은 2m를 높이 오차로 선택하였다.



(그림 5) 그림자 선의 추출



(그림 6) ϕ_{scm} 과 건물의 높이와의 관계

4. 모델 생성

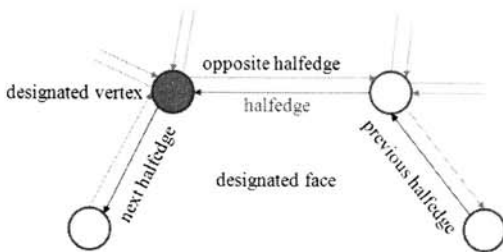
이 절에서는 건물의 지붕 추출 및 기하정보의 편집을 위한 자료 구조와 연산자, 그리고 건물의 높이 추정 및 상세 모델링, 텍스처 맵핑에 대하여 기술한다.

4.1 기하정보 편집 모듈

기하정보 편집 모듈은 자유로운 모델 편집과 효과적인 조작을 제공하기 위하여 Half-edge 자료구조와 오일러 연산자를 이용한다. 각각에 대한 구체적인 내용은 아래와 같다.

4.1.1 Half-edge 자료구조

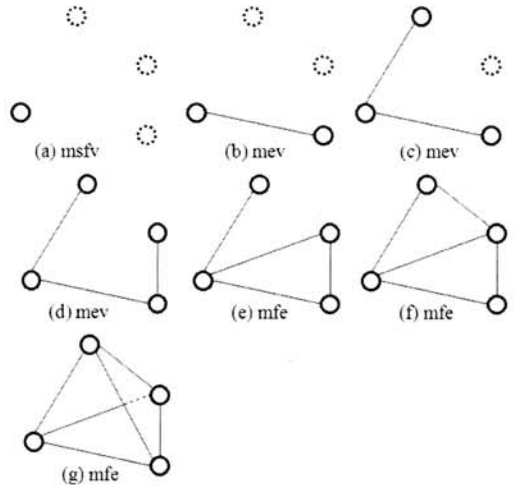
Half-edge 자료구조(HDS: Half-edge Data Structure)는 경계 표현(Boundary representation)을 통해 입체를 나타내는 자료구조[19]이다. (그림 7)은 HDS에 대한 개요를 나타낸다. HDS는 정점과 정점을 연결하는 에지, 에지로 구성된 면의 집합을 통해 입체를 구성하는데, 하나의 에지가 방향성을 가지는 두 개의 half-edge로 구성된다. 각각의 half-edge는 designated vertex(정점)과 자신을 포함하는 designated face(면), 그리고 다음에 연결되는 next half-edge, 그리고 반대 방향으로의 opposite half-edge를 가진다. 각각의 half-edge는 오직 하나의 면에만 포함되며 면은 항상 에지의 왼쪽에 위치하게 된다. 구현에 따라 부가적으로 previous half-edge를 가질 수 있다.



(그림 7) Half-edge 자료구조

4.1.2 오일러 연산자

HDS를 이용하여 3차원 모델을 생성 및 편집하는 경우 생성된 다면체의 기하학적 유효성을 보장하기 위해서는 Euler-Poincaré 공식 (식 (2))을 만족하여야 한다. 본 논문에서는 이러한 오일러 공식의 유효성을 기반으로 건물 모델을 생성 및 편집하기 위하여 오일러 연산자를 사용한다. (그림 8)은 사면체를 대상으로 3차원 모델 생성에서 사용되는 오일러 연산자를 나타낸다. 최초로 정점이 추가될 경우, msfv (makes a vertex, a face and a shell) 연산자를 통해 정점을 생성한다. 그리고 정점을 추가하면서 기존의 정점과 연결하는 과정이 (그림 8)의 (b)-(d)에서 보는 바와 같이 mev (makes a vertex and an edge) 연산자를 통해 수행된다. 두 개의 정점을 연결하고 하나의 면을 생성하는 과정은 (e)-(g)에서 보는 바와 같이 mfe(makes an edge and a face) 연산자를 통해 수행되고 최종적으로 사면체가 완성된다. 사용자



(그림 8) 오일러 연산자의 활용

조작을 최소화하기 위하여 mev, mfe와 같은 기본적인 오일러 연산자들을 조합하여 좀 더 복잡한 기능을 수행하는 새로운 연산자를 정의하여 사용하였다.

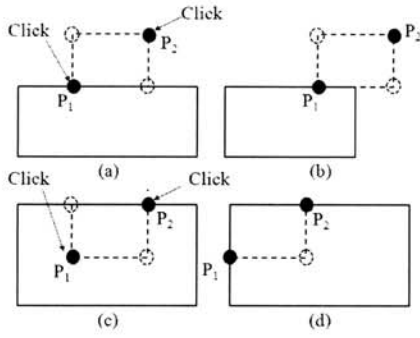
$$F + V - E - L = 2(S - H) \tag{2}$$

여기서 F는 면의 수를 나타내고, V는 정점의 수, E는 모서리의 수, L은 루프(loop)의 수, S는 Shell의 수, 그리고 H는 구멍(hole)의 수를 나타낸다.

4.2 지붕 윤곽 추출

일반적으로 위성영상에서의 건물 추출은 건물이 위치하는 바닥면에 대한 정보가 건물 자신 혹은 다른 물체에 의해 가려지는 경우가 많으므로 건물의 지붕을 기준으로 수행된다. 앞서 언급한 바와 같이 건물 지붕 추출의 다양한 어려움으로 인해 본 논문에서는 건물의 지붕 윤곽은 사용자의 조작을 통해 추출한다. 효과적인 추출을 위하여 간단한 도형(선, 사각형, 원, 호 등)을 기반으로 건물 지붕의 윤곽을 추출한다. 또한 대부분의 건물의 사각형 블록의 조합으로 이루어지므로 현재의 지붕 윤곽 사각형 블록을 추가 혹은 삭제[5]하는 기능을 통해 보다 빠른 추출이 가능하게 하였다. 좀 더 정확한 추출을 위하여 윤곽을 구성하는 선들에 대하여 sobel-zernike moment를 통해 sub-pixel edge를 검출[26]하고 보정을 수행하였다. 그리고 지붕 윤곽 추출 및 상세 모델 편집에서의 편의를 위하여 점, 선, 면에 대한 스냅(snap)과 연결성 정보를 이용하여 평행과 수직에 대한 안내선을 제공하였다.

(그림 9)는 사각형 블록의 추가 및 삭제에 대한 개요를 나타낸다. 점 P_1, P_2 는 사용자의 입력 (click)을 나타낸다. 사각형 블록 추가는 단일 에지에 대한 경우 (a)와 두 개의 에지에 대한 경우 (b)로 나누어진다. 블록 추가 연산자의 경우, (a), (b) 경우에 대해 동일하게 한 번의 kfe(kill a face and an edge), 네 번의 mev, 그리고 한 번의 mfe 연산자로 구성된다. 사각형 블록의 삭제는 단일 에지에 대한 경우 (c)



(그림 9) 사각형 블록의 추가 및 삭제

와 두 개의 에지에 대한 경우 (d)로 나누어진다. 블록 삭제 연산자는 (c)의 경우, 한 번의 kfe와 네 번의 mev, 그리고 한 번의 mfe로 구성된다. (d)의 경우, 한 번의 kfe와 kev (kill an edge and a vertex), 세 번의 mev, 그리고 한 번의 mfe로 구성된다.

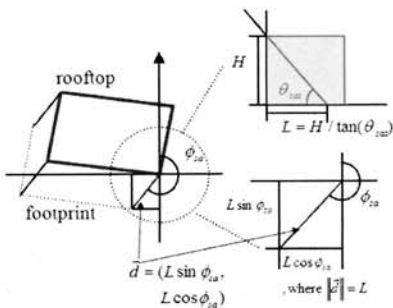
4.3 높이 추정

건물의 높이 추정은 세 가지로 나누어진다. 첫 번째는 건물의 그림자를 이용하여 자동으로 높이를 추정하는 방법이며 두 번째는 건물의 지붕과 바닥 또는 그림자의 기하관계와 사용자의 조작을 이용한 반자동 방법이다. 각각의 구체적인 내용은 아래에서 기술한다.

4.3.1 그림자를 이용한 자동적인 높이 추정

건물의 그림자를 이용하는 경우 건물의 높이 H 는 앞서 3절에서 기술한 바와 같이 자동적으로 계산된다. 그러나 그림자를 이용한 높이 추정은 건물의 실제 위치인 건물 바닥이 있는 곳으로의 위치 보정이 요구된다. 건물의 바닥 위치는 (그림 10)과 같이 나타낼 수 있다. 건물의 위치보정 벡터를 \vec{d} 라고 하면 \vec{d} 의 크기는 건물의 높이 H 가 투영된 길이 L 과 같고 방향은 위성의 방위각 ϕ_{sat} 와 같다. 이 때, L 은 $H/\tan(\phi_{sat})$ 로 나타낼 수 있으므로 건물의 위치보정 벡터 \vec{d} 는 $(H\sin(\phi_{sat})/\tan(\theta_{sat}), H\cos(\phi_{sat})/\tan(\theta_{sat}), 0)$ 과 같다.

건물이 여러 개의 계층으로 구성되는 경우에도 하나의 경우와 마찬가지로 그림자를 이용하여 건물의 높이를 추정할 수 있다. 이 경우에는 지면이 아닌 바로 아래의 계층에 대하여 높이를 구하고 이를 적용한다.



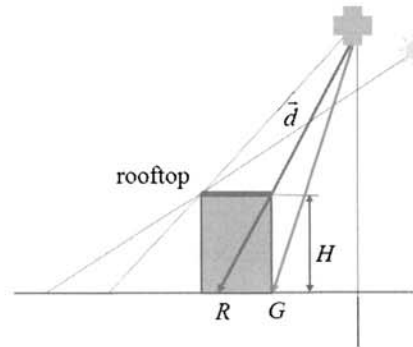
(그림 10) 건물의 위치 보정

4.3.2 사용자 조작을 이용한 반자동 높이 추정

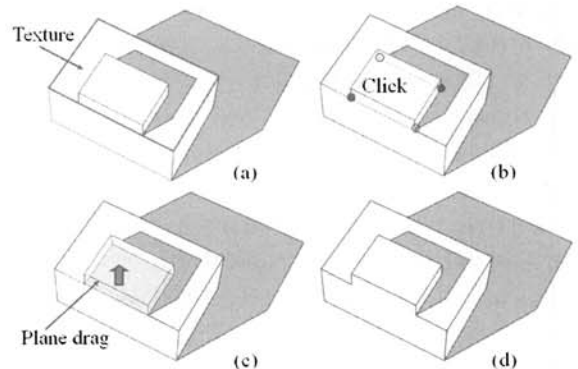
그림자를 이용한 자동적인 높이 추출의 적용이 어려운 경우, 건물의 지붕과 바닥 또는 그림자간의 기하관계와 사용자의 조작을 이용하여 건물의 높이를 추정한다. 이 때, 건물 지붕을 건물 바닥 또는 그림자로 드래그하는 것이 사용자 조작에 해당한다. 사용자 조작과 그림자를 이용하는 경우에는 앞서 4.3.1절에서 기술한 바와 같이 높이를 추정하고 위치를 보정한다. (그림 11)은 건물의 지붕과 바닥의 관계를 이용하는 경우의 기하관계를 나타낸다. 건물 지붕의 한 점이 영상에 투영된 점 R 과 이에 대응되는 바닥의 한 점을 G 라 하고 위성과 점 R 을 지나는 직선의 방향벡터를 \vec{d} 라고 하자. 이 때 건물의 높이 H 는 식 (3)과 같다.

$$H = \begin{cases} \text{if } |d_x| > 0, & (d_z(R_x - G_x))/d_x \\ \text{else} & (d_z(R_y - G_y))/d_y \end{cases} \quad (3)$$

앞서와 마찬가지로 건물이 여러 개의 계층으로 구성되는 경우에도 마찬가지로 그림자 혹은 지붕과 바닥의 기하관계를 이용하여 건물의 높이를 추정할 수 있다. (그림 12)는 여러 개의 계층을 가지는 건물에 대한 높이 추정 과정을 나타낸다. (a)는 텍스처가 적용된 하위 계층 모델이며 (b)는 사용자 조작을 통해 하위 계층 위에 사각형을 생성한 모습을 나타낸다. (c)는 드래그를 통해 상위 계층의 높이를 조절하는 모습이며, (d)는 최종적으로 생성된 건물 모델을 나타낸다.



(그림 11) 건물의 지붕과 바닥의 기하관계

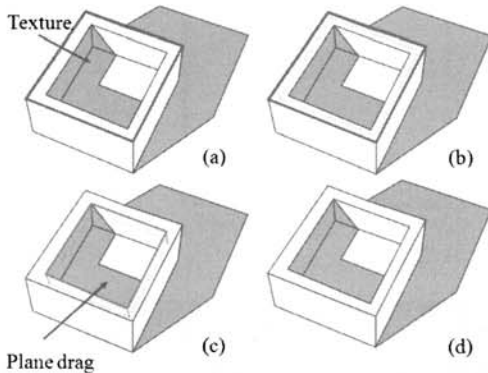


(그림 12) 여러 개의 계층을 가지는 건물에서의 높이 추정

4.4 상세 모델 편집

지금까지의 과정을 통해 건물의 지붕과 높이를 추출하였고 이를 이용하여 건물의 대략적인 형태를 생성하였다. 그러나 건물 지붕의 경우 앞서 추출한 내용은 평면적인 형태의 지붕 윤곽만을 가지고 있어 정교한 모델을 표현하기에는 부족함이 있다. 뿐만 아니라 창문이나 문, 돌출된 구조물 등을 추가하면 좀 더 사실적인 모델을 획득할 수 있다. 이전까지의 과정에서 획득한 단순한 건물 모델에 대하여 상세 모델 편집 과정을 진행한다.

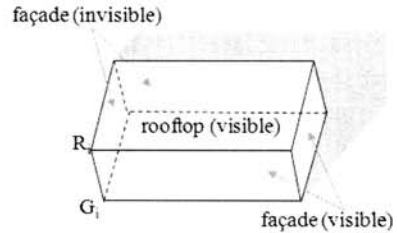
상세 모델 편집에서는 기존의 면과 모서리(에지)에 대한 정점의 추가 및 삭제, 이동 등의 기본적인 모델 편집 연산자 이외에 'push-pull'과 'offset' 연산자를 사용한다. 이 연산자들은 기본적인 오일러 연산자들을 조합하여 좀 더 복잡한 기능을 수행한다. 먼저 'push-pull' 연산자는 면을 밀거나 당겨 밖으로 튀어나오거나 혹은 안으로 들어간 형태의 입체를 생성한다. 'offset' 연산자는 기존의 면을 확장하거나 축소하여 복제한다. (그림 13)은 이 연산자들의 활용 예를 보여준다. (a)는 텍스처가 적용된 단순한 모델이며 (b)는 'offset'을 이용하여 뒷면의 내부에 면을 생성하는 과정이다. (c)는 'push-pull'을 이용하여 내부의 면을 밀어 안으로 들어간 형태의 모델을 생성하는 과정이며 (d)는 최종 결과이다.



(그림 13) push-pull과 offset 연산자의 활용

4.5 텍스처 맵핑

건물의 3차원 모델을 획득한 뒤에는 좀 더 사실적인 가시화를 위해 모델에 대한 텍스처를 적용한다. 텍스처는 해당 면의 가시성과 위치에 따라 다른 방법을 적용한다. 우선 보이는 면의 경우 지붕과 건물 옆면으로 구분할 수 있는데, 지붕에 해당하는 면의 경우 (그림 14)에서 보는 바와 같이 해당 면이 영상에 투영된 영역의 화소들을 텍스처로 사용한다. 건물 옆면의 경우에는 지붕의 한 점 R_i 과 이에 대응되는 바닥의 한 점 G_i 사이의 화소들을 텍스처로 사용한다. 보이지 않는 면의 경우, 인접 혹은 반대편에 존재하는 보이는 면의 텍스처를 적용할 수 있다. 그러나 일반적으로 위성 영상으로부터 획득한 텍스처는 낮은 해상도를 가지고, 특히 옆면의 경우에는 이 현상이 더욱 두드러진다. 따라서 지상에서 촬영한 영상과 같이 해당 면에 대한 다른 영상이 이용



(그림 14) 텍스처 맵핑

가능한 경우 이를 적용한다. 또 다른 방법은 미리 정의된 텍스처 템플릿을 적용하는 방법이다. 벽돌이나 타일과 같이 반복되는 패턴의 경우 텍스처 템플릿을 적용할 수 있다.

5. 실험 결과 및 분석

시스템의 개발 및 실험은 3.0Ghz dual core AMD processor, Nvidia Geforce 8600GT, 그리고 Windows Vista 운영체제에서 진행하였다. 개발은 C++과 OpenGL, OpenCV 라이브러리를 이용하였다. 입력으로는 대학 캠퍼스의 Quickbird™ 위성 영상과 메타 정보를 사용하였으며, 해상도는 10,556 x 11,780 pixel, GSD는 약 60cm이다. 실험에서는 총 22개 건물에 대하여 3차원 모델 추출을 수행하고 이에 대한 높이 정확도 및 사용자 조작 횟수를 측정하였다. 높이 정확도는 건축 도면을 기준자료로 사용하였다.

(그림 15)는 GUI (Graphic User Interface) 기반으로 구현한 프로토타입 시스템의 사용자 인터페이스를 나타낸다. 시스템은 드로잉 기능(선, 사각형, 호, 원 등), 편집 기능(push-pull, offset, move), 시점 조작 기능 등을 제공한다.



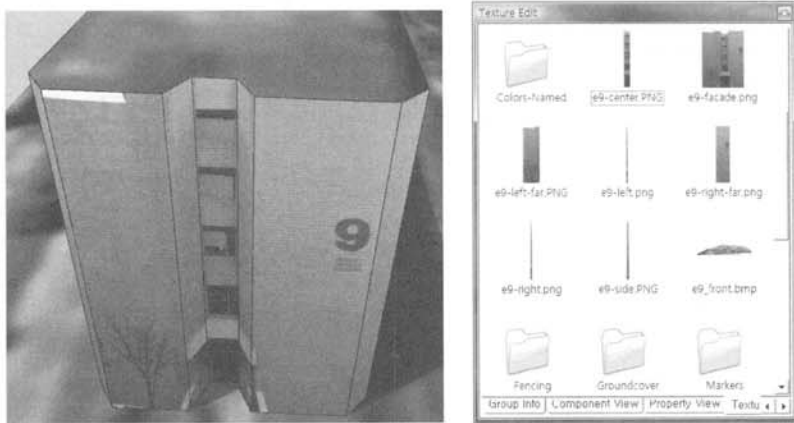
(그림 15) 사용자 인터페이스 (a) 도구바 - 모델 편집을 위한 각종 도구들을 제공. (b) 부가 정보 출력창 - 생성한 모델에 대한 모델에 대한 정보 및 텍스처 정보 등을 제공. (c) 3차원 모델 편집창 - 3차원 모델에 대한 편집 수행

(그림 16)은 텍스처 템플릿 사용자 인터페이스와 활용 예를 나타낸다. 기본적으로 텍스처는 입력으로 주어진 위성영상을 이용하여 추출하며, 추출된 텍스처를 복제하거나 편집할 수 있다. 그리고 텍스처 템플릿을 이용하여 반복적인 패턴이나 혹은 지상 영상 등을 3차원 모델에 적용한다.

(그림 17)은 건물의 지붕 윤곽 추출에서 사각형 블록의 추가 및 삭제 연산의 결과를 나타낸다. 각 이미지에서 점으로 표시된 부분은 사용자 조작 위치를 의미한다. (a)는 사각형 블록의 추가를 나타내고 (b)는 사각형 블록 삭제 연산을 두 번 적용한 결과이다. (c)는 블록 추가 연산을 곡면으로 확장한 경우의 결과이다.

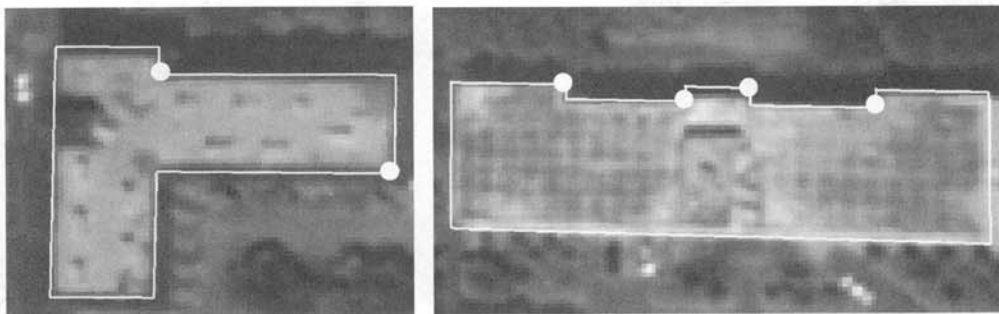
(그림 18)은 건물의 그림자를 이용한 자동적인 높이 추정 과정을 나타내고 (그림 19)는 건물 지붕과 바닥의 관계를 이용한 높이 추정 과정을 나타낸다. <표 1>은 그림자, 건물의 지붕과 바닥의 관계를 이용하여 건물의 높이를 추정한

결과이다. 그림자를 이용한 경우, 다른 건물들에 비해 E-5와 E-6은 상대적으로 큰 오차를 나타냈으며 이는 주변의 초목에 의한 영향과 경사진 지형의 영향으로 보인다. 건물의 지붕과 바닥의 관계를 이용하여 높이를 추정할 경우, 그림자에서와 마찬가지로 E-5는 다른 건물들에 비해 큰 오차를 나타냈다. 그림자를 이용한 높이 추정의 경우, 전체 22개 건물에 대하여 평균 오차는 2m 이하로 앞서 정의한 오차범위를 만족하였다. 그러나 E-5, E-6과 같은 일부 건물에 대해서는 그림자 추출의 한계로 인해 상대적으로 높은 오차를 보이기도 하였다. 건물의 지붕과 바닥의 기하관계를 이용한 경우에는 평균 1m이하의 오차를 나타냈다. 본 논문에서 건물의 높이 추출은 기본적으로 그림자를 이용한 자동적인 높이 추정을 이용하며, 그림자 추출이 용이하지 않거나 추출된 결과의 오차가 크다고 판단되는 경우 사용자의 조작을 이용한다. 건물의 높이가 추정되면 (그림 18)의 (c)에서 보



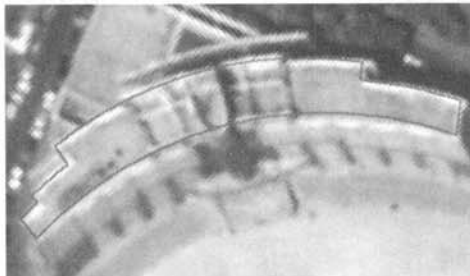
(a) 지상 영상의 적용 (b) 텍스처 템플릿 사용자 인터페이스

(그림 16) 텍스처 맵핑 예와 텍스처 템플릿



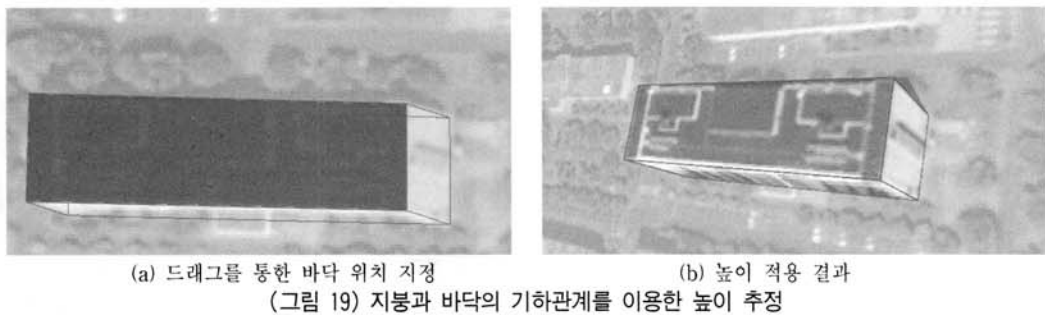
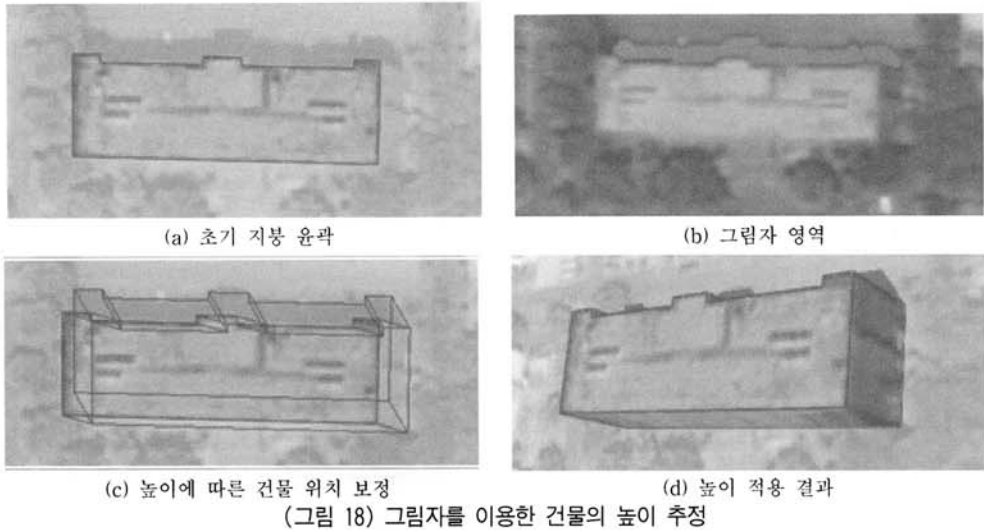
(a) 사각형 블록의 추가

(b) 사각형 블록의 삭제



(c) 곡면을 가지는 건물에 대한 지붕 윤곽 추출

(그림 17) 지붕 윤곽 추출 결과



는 바와 같이 추정된 높이에 따라 건물의 바닥면과 그림자의 경계가 가시화되고 사용자는 이를 이용하여 자동 혹은 반자동으로 추출된 건물의 높이를 적용한다. E-5와 E-6은 지형의 영향과 초목에 의한 그림자의 식별이 용이하지 않아 건물 지붕과 바닥의 기하관계를 이용하였고, 나머지 건물들은 그림자를 이용하였다. 최종적으로 채택된 건물의 높이는 <표 1>에서 음영으로 표시하였다.

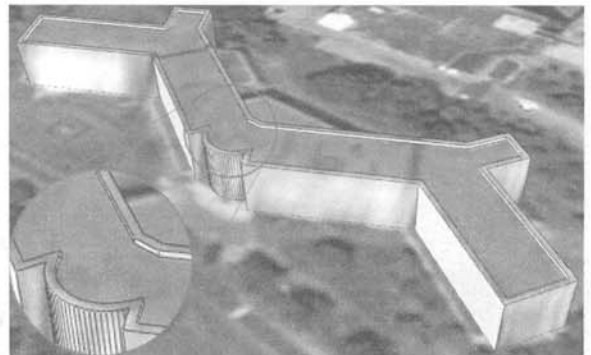
(그림 20)은 상세 모델 편집의 예를 나타낸다. 지붕 추출 시 대략적인 형태를 그리고, 사각형 블록의 추가를 이용하여 좀 더 간편하게 건물의 지붕을 추출하였으며, 높이 추정 후에는 'offset'과 'push-pull' 연산자를 이용하여 건물 지붕

의 구조물을 생성하였다.

시스템의 사용자 조작에 대한 분석을 위해 건물 모델 생성에서의 조작 횟수를 Google Sketchup™과 비교하였다. Sketchup은 간편한 인터페이스로 쉽게 모델링 할 수 있는 것이 특징인 무료 3차원 모델링 소프트웨어이다. 기존의 단 영상에서 사용자 조작을 이용하여 건물의 모델을 추출하는 연구들[6-11]은 앞서 언급한 바와 같이 건물을 이루는 몇 개의 점들을 사용자가 입력하고 미리 정의된 몇 가지 연산을 이용하여 건물의 모델을 추출하였다. 그러나 이러한 방법들은 추출가능한 건물의 형태에 제약이 존재하였으며 경우에 따라서는 많은 사용자 조작을 요구하였다. 또한 건물의 대략적인 모델을 추출하는 것에 그쳐 비교가 용이하지

<표 1> 그림자와 footprint를 이용한 건물의 높이 추정 결과 및 오차

건물	실제값 (m)	그림자		Footprint	
		추정값 (m)	오차 (m)	추정값 (m)	오차 (m)
E-1	18.50	18.86	0.35	18.45	-0.05
E-2	20.00	18.64	-1.36	20.46	0.46
E-3	17.00	16.34	-0.66	17.98	0.98
E-5	21.00	15.46	-5.54	18.49	-2.51
E-6	23.20	14.36	-8.84	23.81	0.61
E-7	16.00	15.30	-0.70	15.26	-0.74
E-8	13.50	13.66	0.16	14.65	1.15
E-9	20.60	21.04	0.44	20.75	0.15

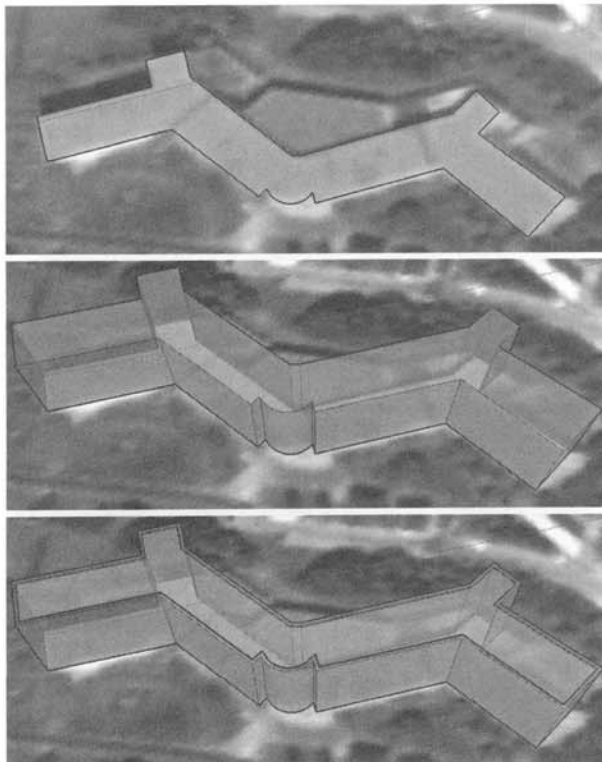


(그림 20) 상세 모델 편집의 예 (Mus)

<표 2> 사용자 조작 횟수의 비교

건물	Task	Our System	Sketchup
Dom-A	지붕 윤곽 추출	4	8
	높이 추정	0	1
	합계	4	9
E-7	지붕 윤곽 추출	6	12
	높이 추정	0	1
	합계	6	13
Mus (그림 20)	지붕 윤곽 추출	19	20
	높이 추정	0	1
	지붕 수정	2	2
	합계	21	23

않다. 따라서 본 논문에서는 접근이 용이한 Sketchup과 사용자 조작의 효율을 비교하였다. Sketchup과의 조작 횟수를 비교한 결과는 <표 2>와 같다. Sketchup을 이용하여 (그림 20)과 동일한 건물을 모델링하는 과정은 (그림 21)과 같다. 건물 지붕의 경우 형태의 복잡도에 따라 차이가 있겠으나, 제안하는 시스템은 Sketchup에 비하여 동일하거나 혹은 보다 적은 횟수의 조작을 요구하였다. (그림 20)과 (그림 21)의 경우 Sketchup에서는 건물의 지붕을 구성하는 각 점을 직접 연결하여 추출하는 반면, 제안하는 시스템은 앞서 언급한 블록 연산자를 이용하여 지붕의 윤곽을 추출하였다. 그리고 건물의 높이 추정 경우, 그림자를 이용한 자동 방법을 적용하는 경우에는 별도의 조작이 필요하지 않으며 사용자의 조작을 이용하는 경우에는 건물 지붕에 대응되는 바닥



(그림 21) Sketchup을 이용한 건물 모델링

이나 또는 그림자로의 한 번의 드래그만이 필요하다. Sketchup의 경우, 건물의 높이는 임의로 부여하였다. 그 외에 건물 모델의 상세 편집에서는 대부분 유사한 조작이 사용되었다.

(그림 22)는 시스템을 이용하여 대학 캠퍼스 내의 22개 건물에 대하여 3차원 모델 추출을 수행한 최종 결과를 나타낸다.



(a) 위에서 본 모습



(b) 다른 각도에서 본 모습

(그림 22) 모델 추출 결과

6. 결 론

본 논문에서는 고해상도의 위성 단영상에서 사용자의 조작을 활용하여 반자동으로 건물의 3차원 모델을 추출하는 시스템을 제안하였다. 제안한 시스템은 건물의 대략적인 형태 추출이나 높이 추정에 그치는 것이 아니라 상세한 건물의 모델을 획득한다. 사용자의 조작을 최소화하기 위하여 건물의 높이 추정에 있어서 영상의 특정 정보와 그림자 정보, 그리고 건물과 그림자, 위성, 태양 간의 기하관계를 이용한 자동화 기법을 적용하였다. 또한 자동화 기법의 적용이 어려운 경우에도 간단한 조작을 통해 건물의 높이를 추정할 수 있다. 그리고 효과적이고 자유로운 모델 생성 및 편집을 위하여 HDS와 오일러 연산자 기반의 연산자들을 정의하여 사용하였다. 또한 센서 모델링이나 부가적인 데이터 없이 위성 단영상과 메타 정보만을 이용하여 효과적으로 건물의 모델을 추출하였다. 그럼에도 불구하고 실험 결과에서 언급한 바와 같이 지형의 영향과 초목 또는 다른 건물 등에 의해 건물의 그림자 경계나 바닥면이 가려지는 경우 건물 모델의 추출에 어려움이 있다. 또한 건물 지붕을 직접 추출하

는 등 사용자의 조작을 줄일 수 있는 여지가 여전히 남아있다. 따라서 향후, 건물의 지붕을 자동적으로 추출하고 또한 건물의 높이 추출 및 상세 모델 편집에서도 사용자 조작을 줄이는 연구를 진행하고자 한다. 그리고 현재의 기하정보 편집 모듈을 기반으로 좀 더 다양한 형태의 모델을 표현하고 편집할 수 있도록 하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] C. Baillard and A. Zisserman, "A plane-sweep strategy for the 3d reconstruction of buildings from multiple images," in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.33(B2), pp. 56-62, 2000.
- [2] Z. Kim and R. Nevatia, "Automatic description of complex buildings from multiple images," *Comput. Vis. Image Underst.*, Vol.96, No.1, pp.60-92, 2004.
- [3] F. Taillandier and R. Deriche, "Automatic building reconstruction from aerial images: a generic bayesian framework," in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXV(B3), pp. 343-348, 2004.
- [4] M. Bredif, D. Boldo, M. Pierrot Deseilligny, and H. Maitre, "3d building reconstruction with parametric roof superstructures," *IEEE Intl. Conf. on Image Processing*, Vol.2, pp. 537-540, 2007.
- [5] S. C. Lee, A. Huertas, and R. Nevatia, "Modeling 3-d complex buildings with user assistance," *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, pp.170-177, 2000.
- [6] P. E. Debevec, C. J. Taylor, and J. Malik, "Modeling and rendering architecture from photographs: a hybrid geometry and image-based approach," in *SIGGRAPH '96: Proc. of the 23rd Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: ACM, pp.11-20, 1996.
- [7] J. Li, R. Nevatia, and S. Normoha, "User assisted modeling of buildings from aerial images," *IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol.2, pp. 274-279, 1999.
- [8] S. C. Lee and R. Nevatia, "Interactive 3d building modeling using a hierarchical representation," in *HLK '03: Proc. of the First IEEE Intl. Workshop on Higher-Level Knowledge in 3D Modeling and Motion Analysis*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, pp.58-65, 2003.
- [9] C. Lin, R. Nevatia, "Building Detection and Description from a Single Intensity Image," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.72, No.2, pp.101-121, 1998.
- [10] A. Croitoru, Y. Hu, V. Tao, Z. Xu, F. Wang, and P. Lenson, "Single and stereo based 3D metrology from high resolution imagery: methodologies and accuracies," *Proceedings of the XXth International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Congress*, Vol.34, pp.1022-1027, Istanbul, Turkey, 2004.
- [11] P. Sarabandi, B. Adams, A. Kiremidjian and R. Eguchi, "Infrastructure Inventory Compilation Using Single High Resolution Satellite Images", 3rd International Workshop on Remote Sensing Technologies and Disaster Response, Chiba, Japan. 2005.
- [12] J. Y. Rau, and L. C. Chen, "Robust Reconstruction of Building Models from Three-Dimensional Line Segment," *Photogrammetric engineering and remote sensing*, pp.181-188, 2003.
- [13] C. Baillard, and H. Maitre, "3-D Reconstruction of Urban Scenes from Aerial Stereo Imagery : A Focusing Strategy," *Computer Vision and Image Understanding*, pp.244-258, 1999.
- [14] K. Karner, G. Hesina, S. Maierhofer and R. F. Tobler, "Improved Reconstruction and Rendering of Cities and Terrains based on Multispectral Digital Aerial Images," *International symposium on Information and Communication Technologies in Urban and Spatial Planning*, pp.299-304, 2006.
- [15] L. C. Chen, T. A. Teo, C. H. Hsieh and J. Y. Rau, "Building Reconstruction From LIDAR Data and Aerial Imagery," *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '05, Proceedings*, pp.431-439, 2005.
- [16] L. C. Chen, T. A. Teo, C. H. Hsieh and J. Y. Rau, "Reconstruction of Building Models with Curvilinear Boundaries from Laser Scanner and Aerial Imagery," *Lecture Notes in Computer Science*, pp.24-33, 2006.
- [17] 이태운, 임영재, 김태정, "단일 고해상도 위성영상으로부터 그림자를 이용한 3차원 건물정보 추출," *한국지형공간정보학회지*, Vol.14, No.2, pp.3-13, 2006.
- [18] 김혜진, 한동엽, 김용일, "삼각백터구조를 이용한 고해상도 위성 단영상에서의 건물 높이 추출," *대한원격탐사학회지*, Vol.22, No.6, pp.621-626, 2006.
- [19] M. Mäntylä, "An introduction to solid modeling," New York, NY, USA:W. H. Freeman & Co., 1988.
- [20] V. Shettigara and G. Sumerling, "Height determination of extended objects using shadows in spot images," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.64, No.1, pp.35-44, Jan., 1998.
- [21] K. H. Jang and S. K. Jung, "Practical Modeling Technique for Large Scale 3D Building Models from Ground Images," *Pattern Recognition Letters*, Vol.30, No.10, pp.861-869, 2009.
- [22] J. Huang, W. Xie, and L. Tang, "Detection of and compensation for shadows in colored urban aerial images," *WCICA 2004*, Vol.4, pp.3098-3100, 2004.
- [23] A. Polidorio, F. Flores, N. Imai, A. Tommaselli, and C. Franco, "Automatic shadow segmentation in aerial color images," *SIBGRAPI 2003*, pp.270-277, 2003.
- [24] V. Tsai, "A comparative study on shadow compensation of

color aerial images in invariant color models," IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol.44, No.6, pp.1661-1671, 2006.

- [25] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetics, Vol.9, No.1, pp.62-66, 1979.
- [26] Y. Qu, C. Cui, S. Chen, and J. Li, "A fast subpixel edge detection method using sobel-zernike moments operator," IVC 2004, Vol.23, No.1, pp.11-17, Jan., 2004.



오 선 호

e-mail : shoh@vr.knu.ac.kr
 2007년 경북대학교 컴퓨터공학과 졸업(학사)
 2009년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부(공학석사)
 2009년~현 재 경북대학교 전자전기컴퓨터 박사 과정

관심분야: Image-Based Modeling, Virtual Reality, Computer Vision



장 경 호

e-mail : khjang@knu.ac.kr
 1998년 경성대학교 전산통계학과 졸업(학사)
 2000년 경북대학교 컴퓨터공학과(공학석사)
 2005년 경북대학교 컴퓨터공학과(공학박사)
 2005년~현 재 경북대학교 연구 교수
 관심분야: Image-Based Modeling and

Rendering, Virtual Reality, Computer Graphics, Computer Vision



정 순 기

e-mail : skjung@knu.ac.kr
 1990년 경북대학교 전자계산학과 졸업(학사)
 1992년 한국과학기술원 전산학과(공학석사)
 1997년 한국과학기술원 전산학과(공학박사)
 1997년~1998년 University of Maryland,

Research Associate

2001년~2002년 IRIS, University of Southern California, Research Associate

1998년~현 재 경북대학교 컴퓨터공학과 교수

1999년~현 재 (주)아이디스 기술고문

관심분야: Virtual Reality, Artificial Intelligence, Computer Vision, Image Processing, Computer Graphics