

# 항공라이다 데이터의 건물 곡선경계 추출 및 모델링

## Extraction and Modeling of Curved Building Boundaries from Airborne Lidar Data

이정호\* · 김용일\*\*  
Lee, Jeong Ho · Kim, Yong Il

### 要 旨

항공라이다 데이터를 이용한 건물 추출 연구가 많이 진행되어 오고 있으나 대부분의 연구는 건물경계를 직선으로 가정하기 때문에 곡선경계가 포함된 건물의 경계를 올바르게 모델링하지 못하는 한계가 있다. 본 논문은 곡선경계를 포함하는 건물을 항공라이다 데이터로부터 직선과 곡선이 혼합된 경계로 모델링하는 것을 목적으로 한다. 건물 점들에 대하여 적응적 컨벡스헐 알고리즘과 큰 반경의 국지적 컨벡스헐 알고리즘을 적용하여 두 세트의 경계점을 추출한다. 경계점들의 평균 점 간격 및 수직이등분선의 교차 비율에 의하여 곡선 세그먼트를 판별한 후, 직선과 곡선 세그먼트에 대하여 각각 다른 정규화 방법을 적용하여 건물경계를 모델링한다. 실험결과, 곡선 세그먼트의 추출 완전성과 정확성이 각각 69%, 100%로서 본 연구의 방법을 통해 대부분의 곡선경계를 올바르게 추출 및 모델링할 수 있었다. 본 연구의 결과는 수치지도 제작기준을 만족하는 건물경계를 자동으로 생성하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

핵심어 : 건물 추출, 건물 경계, 곡선 경계, 곡선 탐지, 항공라이다

### Abstract

Although many studies have been conducted to extract buildings from airborne lidar data, most of them assume that all the boundaries of a building are straight line segments. This makes it difficult to model building boundaries containing curved segments correctly. This paper aims to model buildings containing curved segments as combination of straight lines and arcs. First, two sets of boundary points are extracted by adaptive convex hull algorithm and local convex hull algorithm with a larger radius. Then, arc segments are determined by average spacing of boundary points and intersection ratio of perpendicular lines. Finally, building boundary is modeled through regularization of least squares line or circle fitting. The experimental results showed that the proposed method can model the curved building boundaries as arc segments correctly by completeness of 69% and correctness of 100%. The approach will be utilized effectively to create automatically digital map that meets the conditions of the Korean digital mapping.

Keywords : Building extraction, Building boundaries, Curved boundaries, Arc detection, Airborne lidar

## 1. 서 론

공간정보 기반 서비스의 활용은 최근 들어 인터넷과 스마트폰의 보급 및 활용과 더불어 더욱 증대되고 있다. 지형, 건물, 도로 등의 여러 공간정보 중에서 가장 핵심적인 요소 중 하나는 건물이다. 건물정보를 효과적으로 취득할 수 있는 원격탐사 기법으로는 항공사진, 고해상도 위성영상, 항공라이다 등이 있는데, 항공라이다

다는 광역 공간에 대해 2차원 또는 3차원 건물 정보를 효과적으로 제공해주는 수단이다. 특히 복잡한 특성을 나타내는 도시 지역에서 건물정보를 자동으로 추출할 수 있다는 장점이 있다.

항공라이다 데이터로부터 건물 경계를 추출하기 위해서는 우선 필터링 또는 분할(Zhang et al., 2003; Shan and Sampath, 2005; Kim and Lee, 2010; Choi et. al., 2011)을 통해 지면이나 수목 등을 제외한 건물

2012년 11월 14일 접수, 2012년 12월 11일 수정, 2012년 12월 13일 채택

\* 정희원 · 서울대학교 공학연구소 선임연구원(Member, Senior Researcher, Engineering Research Institute, Seoul National University, [ilome79@snu.ac.kr](mailto:ilome79@snu.ac.kr))

\*\* 교신저자 · 정희원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수(Corresponding author, Member, Professor, Dept. of Construction and Environmental Eng., Seoul National University, [yik@snu.ac.kr](mailto:yik@snu.ac.kr))

점들만을 추출한다. 건물점들로부터 건물의 경계를 이루는 건물 경계점을 추출하기 위해서 TIN 구조를 이용하거나(Oh, 2001; Xu et al., 2010, Kim, 2009) 가상격자 구조를 활용할 수 있다(Cho et. al., 2003). 불규칙하게 분포하는 포인트 데이터로부터 직접적으로 건물 경계점을 추출하기 위하여 Jarvis(1977)가 제안한 국지적 컨벡스헬 알고리즘을 적용하거나(Sampath and Shan, 2007; Lee et al., 2011; Habib et al., 2010), Edelsbrunner et al.(1983)이 제안한 알파쉐입 알고리즘을 적용할 수 있다(Lach and Kerekes, 2008; Dorninger and Pfeifer, 2008; Shen, 2008).

항공라이다 자료로부터 건물 경계를 모델링하는데 있어서 가장 큰 단점은 어느 정도의 간격으로 취득되는 항공라이다 자료의 특성으로 인하여 포인트들이 건물 경계에서 정확하게 반사되지 못한다는 점이다. 따라서 보다 정확한 건물 경계를 재구성하기 위하여 선형화 또는 정규화가 필요하다. Kim(2001)은 Jenk's 알고리즘을 변형하여 특징점을 추출함으로써 건물 경계를 선형화하였다. 많은 연구자들은 실제 건물 형상을 더 잘 묘사하기 위하여 건물이 직각으로 이루어져 있다는 가정하에 직사각형 형태의 모델을 이용하거나(Fu and Shan, 2004; Shen, 2008), 세그먼트들의 방향각을 분석하고 건물의 주된 방향을 계산한 후 세그먼트들을 이와 평행 또는 수직 방향으로 조정하였다(Alharthy and Bethel, 2002; Ma, 2004; Sampath and Shan, 2007).

최근 연구에서는 보다 더 다양한 형태의 건물을 묘사하기 위하여 건물의 주방향과 수직방향을 계산한 후, 이와 유사한 방향각을 갖는 세그먼트들은 강제적으로 조정하고 나머지 세그먼트들은 독립적으로 계산하는 방법을 많이 이용한다(Dorninger and Pfeifer, 2008; Lach and Kerekes, 2008; Lee et al., 2011). 한편, 에너지 함수나 스코어 함수를 활용하여 직각에 가까운 부분에 높은 가중치를 부여하거나(Weidner and Förstner, 1995; Shon et. al., 2007) 직각 또는 45도의 각에 높은 점수를 부여하여 특징점을 조정하기도 한다(Lee, 2008).

이상의 연구들은 건물 경계가 직선 세그먼트들로 구성되어있다는 가정하에 건물의 모든 경계를 직선 형태로 선형화하거나 정규화한다. 따라서 곡선 세그먼트와 직선 세그먼트가 함께 존재하는 건물에서는 왜곡이 발생하며 정확한 건물 모델을 생성할 수 없다는 한계가 있다. 특히, 국내 수치지도 제작 규칙에 명시되어있는 곡선 데이터에 대한 작업 규정을 만족시킬 수 없기 때문에 항공라이다를 수치지도 건물레이어 자동제작에 활용하는데 한계가 존재한다. Jung et. al.(2008)의 연구와 Lee and Lee(2010)의 연구에서는 곡면 지붕을 모

델링하였으나 돛형과 아치형으로 제한하고 있기 때문에 직사각형 또는 원형의 경계에만 적용할 수 있다. Lee et. at.(2011)은 곡선 세그먼트와 직선 세그먼트가 혼합된 건물 경계를 정규화하였으나, 실험 건물의 개수가 3개뿐이며 그들의 형상이 비슷하였다.

이에 본 연구에서는 곡선경계를 포함하는 다양한 건물을 항공라이다 데이터로부터 직선과 곡선이 혼합된 경계로 모델링하는 것을 목적으로 한다. 오목한 형태의 건물을 고려하여 적응적 컨벡스헬 알고리즘을 적용하여 경계점 I을 추출하고, 곡선의 특성을 잘 나타내는 경계점들을 추출하기 위하여 큰 반경의 국지적 컨벡스헬 알고리즘을 적용하여 경계점 II를 추출한다. 추출된 경계점들에 일반화 알고리즘을 적용하여 초기 그룹화를 한 후, 경계점들의 평균 점간격과 현의 수직이등분선 간의 교차 비율에 의하여 곡선 세그먼트를 판별한다. 직선 세그먼트와 곡선 세그먼트에 대하여 각각 최소제곱 직선 적합과 원 적합에 의한 정규화를 통해 최종 건물 경계를 모델링한다. 곡선 구간에 대해서는 원의 중심과 반지름을 이용하여 원하는 간격으로 점을 생성함으로써 목적에 맞는 모델링이 가능하도록 한다.

## 2. 건물 경계 추출

항공라이다 포인트 원시 데이터로부터 건물점을 추출하기 위하여 우선 스캔라인기반의 인접관계를 이용한 필터링(Lee et. al., 2011)을 적용하여 비지면점을 추출한다. 비지면점들에 대하여 점들의 밀도와 거리를 고려한 클러스터링을 통해 개별 건물점들로 분리하고, 최소 건물 높이 및 크기 조건에 의하여 수목, 자동차와 같은 비건물점을 제거한다.

### 2.1 경계점 추출

건물점들로부터 건물경계를 추출 및 모델링하는 전체과정은 Figure 1과 같다. 건물점들로부터 건물의 경계에 해당하는 경계점들을 추출할 때, 오목한 부분이 포함된 건물의 경계점을 추추하기 위하여 작은 반경(평균 점 간격의 2배 정도)의 국지적 컨벡스헬 알고리즘이나 알파쉐입 알고리즘을 많이 이용한다. 본 연구에서는 스캔라인 특성에 기반하여 국지적 컨벡스헬 알고리즘을 수정한 적응적 컨벡스헬 알고리즘(Lee and Kim, 2012)을 적용하여 경계점 I을 추출한다. 적응적 컨벡스헬 알고리즘은 경계점을 찾을 때마다 이웃점들과의 거리를 기반으로 탐색반경을 적응적으로 변화시킴으로써 오차나 폐색에 강건하면서 조밀하게 경계점을 추출할 수 있는 장점이 있다.

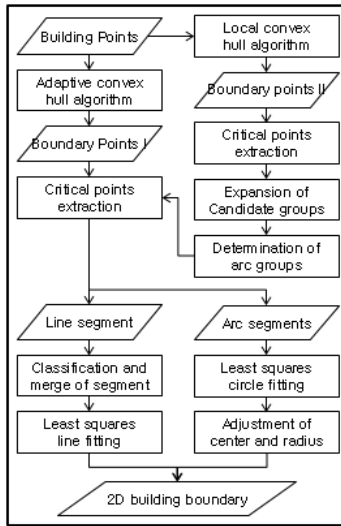


Figure 1. Flowchart of boundary extraction

한편, 곡선 경계가 포함된 건물에 대하여 작은 반경의 국지적 컨벡스헐 알고리즘이나 적응적 컨벡스헐 알고리즘을 적용할 경우, 곡선 구간에서 불필요한 점들이 추출되어 곡선의 성질이 약해질 수 있다. 왜냐하면 곡선 구간은 불룩한 형상을 나타내기 때문이다. 따라서 곡선 부분에서 곡선의 특성을 잘 나타낼 수 있는 점들만을 올바르게 추출하기 위하여 고정된 큰 반경의 국지적 컨벡스헐 알고리즘을 적용하여 경계점 II를 생성한다. 본 연구에서는 모든 건물에 대하여 20m의 반경을 적용하여 경계점 II를 추출하였다.

Figure 2(a)는 오른쪽 윗부분과 아랫부분이 곡선으로 되어있는 건물에서 경계점 I과 경계점 II를 추출한 결과인데, 경계점 II를 보면 큰 반경의 국지적 컨벡스헐 알고리즘을 적용하여 곡선 구간에서 불필요한 점들이 추출되지 않고 불룩한 부분의 점들만 잘 추출된 것을 알 수 있다. 또한 경계점 II의 밀도는 항공라이다 포인트의 분포 특성으로 인하여 건물경계의 직선 부분에서는 낮고 곡선 부분에서는 상대적으로 높다.

2.2 곡선 세그먼트 판별 및 확장

경계점 II에 Douglas and Peucker(DP) 알고리즘을 적용하여 특징점을 추출하고 Figure 2(b)와 같이 동일한 세그먼트에 대응되는 점들의 그룹으로 나눈 후, 두 가지 척도를 이용하여 곡선 세그먼트를 판별한다.

첫 번째 척도는 한 세그먼트를 구성하는 점들의 간격이다. 큰 반경의 국지적 컨벡스헐 알고리즘을 적용하여 건물 경계점을 추출하면 직선으로 이루어진 부분에서는 점들이 상대적으로 넓은 간격으로 추출되는 반면,

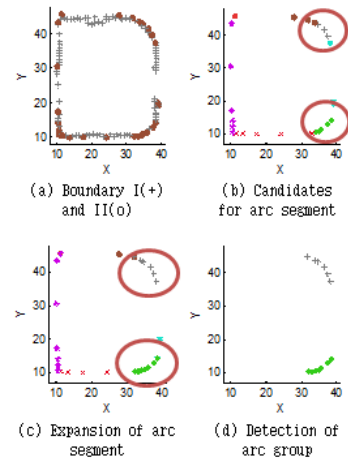


Figure 2. The processes of detection of arc segment groups (the circles indicate curved boundary groups)

곡선으로 이루어진 부분에서는 점들이 조밀하게 추출되는 경향이 있다. 이와 같은 성질을 바탕으로 각 세그먼트를 구성하는 점들에 대하여 이웃하는 점들 간의 평균 점 간격을 계산하여, 평균 점 간격이 임계값보다 작으면 곡선 세그먼트 후보로 선택한다.

Figure 2(b)에서 원으로 표시한 부분이 곡선 후보 그룹으로 선택된 것인데, 특징점이 정확하게 곡선경계 끝에서 추출되지 않아 곡선 그룹이 실제보다 작게 형성된 것을 볼 수 있다. 이를 보완하기 위하여 인접한 점들을 하나씩 포함시키면서 점들 간의 간격 조건을 만족하는지 조사하여, 인접한 점들을 곡선 그룹에 포함시킬지를 결정한다. Figure 2(c)는 이와 같은 과정을 통해 곡선 후보 그룹이 확장된 것을 나타낸다.

두 번째 척도는 ‘한 원이나 호의 중심점은 그 원이나 호 위의 임의의 두 점을 연결한 현의 수직이등분선 위에 존재한다.’는 성질을 바탕으로 한다. 이상적인 호의 경우에는 임의의 두 점을 연결하여 생성되는 선분(현)들의 수직이등분선들은 모두 호의 중심에서 교차한다(Figure 3(a)). 반면에 완전한 직선 세그먼트 위에 존재하는 점들에 대해서는 어떤 두 수직이등분선도 서로 교차하지 않는다(Figure 3(b)).

곡선 세그먼트를 판별하기 위하여 동일한 지점에서 얼마나 많은 개수의 수직이등분선이 교차하는지를 계산한다. 즉, 각 건물의 최소경계사각형(Minimum Bounding Rectangle)보다 조금 더 큰 직사각형 영역을 일정 크기의 셀로 나눈 후, 각 셀에서 수직이등분선이 교차되는 회수를 계산한다. 세그먼트 위에  $n$  개의 점이 존재할 경우, 3점에 의하여 1개의 교점이 결정되므로 최대 교

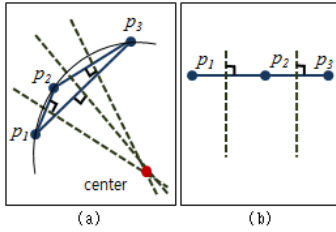


Figure 3. Perpendicular lines(dot lines) passing through the midpoints: (a) arc segment, (b) straight line segment

차점 개수는  $n(n-1)(n-2)/6$ 이다. RI(Ratio of Intersection)를 누적 셀 값이 최대인 셀에서의 교차점 개수와 최대 가능 교차점 개수의 비율로 정의하며, 식 (1)과 같이 계산하여 이 값이 임계값보다 크면 곡선으로 판단한다.

$$RI = \frac{6 \times \max(A(i))}{n(n-1)(n-2)} \quad (1)$$

여기서,  $A(i)$ 는  $i$  번째 셀에서의 누적교차점수이고,  $\max$ 는 최대값을 반환하는 함수이다.

### 2.3 경계점 그룹화

경계점 II에서 곡선으로 판별된 연속된 점들의 첫 점과 끝 점을 각각 특징점으로 하여 하나의 그룹으로 할당하고 잔여점들을 제거하면 Figure 4(a)와 같이 곡선 세그먼트에 대응되는 점들을 얻게 된다.

적용적 컨벡스헬 알고리즘을 적용하여 추출한 경계점 I 중에서 곡선에 해당하는 점들을 임시로 삭제한 후 (b), 나머지 점들에 대해서 DP 알고리즘을 적용하여 직선 경계 부분에 대한 특징점들 (c)와 같이 추출한다. 임시로 삭제했던 곡선에 해당하는 경계점들을 다시 복원하여 (d)와 같이 경계점들을 그룹화한다. 그룹이 정의되면 각각의 그룹은 직선 또는 곡선 세그먼트와 일대일 대응 관계를 갖는다.

### 2.4 경계 정규화

건물경계의 각 세그먼트를 직선과 곡선으로 분리했으므로 각각에 대하여 다른 정규화 방법을 적용할 수 있다. 직선 세그먼트들에 대해서는 건물의 주방향을 계산한 후, 각 세그먼트의 방향과 주방향의 유사성에 의하여 방향에 대한 제약조건을 갖는 최소제곱 직선적합에 의하여 정규화를 수행한다. 이에 대한 자세한 설명은 Lee and Kim(2012)의 연구를 참고한다.

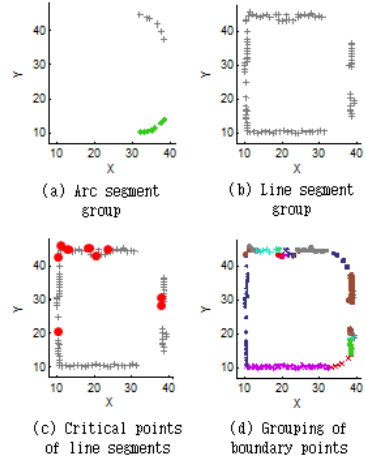


Figure 4. Boundary points grouping considering arc segments

곡선은 원의 일부로 가정하고 곡선 세그먼트의 점들에 대해서 최소제곱 원 적합(least-squares circle fitting)을 적용하여 미지계수를 도출한다. 호의 중심점  $(x_c, y_c)$ 와 반지름의 길이  $R$ 은 세그먼트에 속하는  $n$  개의 점을 이용하여 각각 식 (2), (3), (4)에 의하여 계산한다.

$$x_c = \frac{\sum x_i}{n} + \frac{\sum v_i^2 (\sum u_i^3 + \sum u_i v_i^2)}{2(\sum u_i^2 \sum v_i^2 - \sum u_i v_i \sum u_i v_i)} \quad (2)$$

$$- \frac{\sum u_i v_i (\sum v_i^3 + \sum u_i^2 v_i)}{2(\sum u_i^2 \sum v_i^2 - \sum u_i v_i \sum u_i v_i)}$$

$$y_c = \frac{\sum y_i}{n} - \frac{\sum u_i v_i (\sum u_i^3 + \sum u_i v_i^2)}{2(\sum u_i^2 \sum v_i^2 - \sum u_i v_i \sum u_i v_i)} \quad (3)$$

$$+ \frac{\sum u_i^2 (\sum v_i^3 + \sum u_i^2 v_i)}{2(\sum u_i^2 \sum v_i^2 - \sum u_i v_i \sum u_i v_i)}$$

$$R = \sqrt{\left(x_c - \frac{\sum x_i}{n}\right)^2 + \left(y_c - \frac{\sum y_i}{n}\right)^2 + \frac{\sum (u_i^2 + v_i^2)}{n}} \quad (4)$$

여기서  $(x_i, y_i)$ 는  $i$  번째 점의 좌표이고  $u_i = x_i - \sum x_i/n$ ,  $v_i = y_i - \sum y_i/n$ 이다.

추출된 곡선과 그것의 인접직선이 교차하지 않거나 곡선 세그먼트 양쪽의 두 직선 세그먼트가 곡선의 중심에 대하여 서로 대칭을 이루지 않을 수 있다. 따라서 건

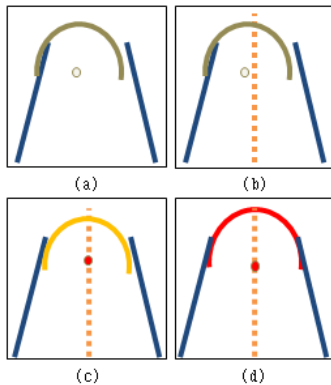


Figure 5. The processes of arc segment fitting and adjustment

물 경계의 대칭성 및 일치성을 향상시키기 위하여 곡선 세그먼트를 다음과 같은 규칙에 의하여 조정한다.

step 1) 곡선 세그먼트의 양 옆에 위치하는 직선 세그먼트들의 각에 대한 이등분선을 생성한다(Figure 5(b)).

step 2) 곡선 세그먼트의 중심점이 이등분선을 지나도록 곡선 세그먼트를 평행이동한다(Figure 5(c)).

step 3) 반지름이 중심에서 인접직선까지의 거리보다 작을 경우, 곡선과 직선 세그먼트가 접하도록 반지름을 확장한다(Figure 5(d)).

각각의 직선 세그먼트와 곡선 세그먼트의 모든 미지 계수를 계산했으므로 인접하는 세그먼트들 간의 교차점을 도출하면 정규화된 건물경계를 모델링할 수 있다. 곡선 세그먼트에 대해서는 두 교차점을 결정한 후 곡선을 따라서 두 교차점 사이에 일정 간격(예: 중심각 5° 또는 점들 간의 거리 1m)으로 점을 생성하여 건물 경계를 재구성한다.

### 3. 실험 및 결과

#### 3.1 데이터 및 적용

대전시 둔산동 주변에 위치하는 곡선경계를 포함하는 다양한 형태의 건물 11개를 실험 대상으로 선정하였다(Figure 6, Figure 7의 1열 및 2열). 11개 건물의 크기는 약 500m<sup>2</sup>에서 약 10,000m<sup>2</sup>로 다양하며(Table 1) 직각이 아닌 각이나 오목한 각을 포함한다. 라이다 원시 데이터 포인트의 점간격은 스캔방향으로 약 0.8m, 비행방향으로 약 1.2m로서 점밀도는 약 1개/m<sup>2</sup>이다.

적용적 컨벡스헬 알고리즘을 적용하는 과정에서 탐색반경 결정을 위한 계수는 1.5를 적용하였고, 그룹화를 위한 DP 일반화 알고리즘의 직교거리 임계값은 2m를 적용하였다. 곡선 그룹 후보 추출 및 확장에서 점들

간의 평균 거리는 5m를 이용하였고, 곡선 세그먼트 판별을 위한 RI값에 대한 임계값은 0.3을 적용하였다. 이 값들은 실험을 통해 경험적으로 결정하였다. 큰 반경(20m)의 국지적 컨벡스헬 알고리즘을 통해 추출한 경계점은 Figure 6과 7의 3열과 같고, 곡선판별 및 그룹화를 통해 각각의 직선 세그먼트 및 곡선 세그먼트에 해당하는 점들의 그룹으로 나타난 결과는 Figure 6과 7의 4열과 같다. Figure 6과 7의 5열은 정규화를 통해 최종적으로 건물경계를 모델링한 결과이고, 6열은 건물 경계를 모두 직선으로 가정하고 건물경계를 모델링한 결과이다.

#### 3.2 정성적 분석

Figure 6은 곡선경계가 올바르게 모델링된 건물들을 나타낸다. 곡선경계에 대한 계수를 도출하였기 때문에 곡선구간에 대하여 사용자가 원하는 간격으로 점을 생성할 수 있는데, Figure 6의 결과는 5도의 중심각 간격으로 점을 생성한 것이다. 다수의 건물에서 곡선경계의 양쪽 직선경계가 서로 수직인 형태였으며, 2번 건물과 같이 곡선경계의 양쪽 직선경계가 서로 수직이 아닌 경우에도 올바르게 모델링 된 것을 볼 수 있다. 큰 반경의 국지적 컨벡스헬 알고리즘과 함께 적용적 컨벡스헬 알고리즘을 적용하여 경계점들을 추출함으로써 오목한 형태가 포함된 건물(1번, 2번, 4번, 5번)의 경계도 잘 추출하고 모델링할 수 있었다.

본 연구의 방법은 하나의 곡선 세그먼트가 한 개의 호를 이룬다는 가정하에 한 원의 파라미터로 모델링하였기 때문에 임의의 모양을 나타내는 경계는 모델링할 수 없다는 한계가 있다. 그러나 대부분의 건물들이 위 가정을 만족하므로 올바르게 모델링할 수 있었다. 한편, 건물경계를 모두 직선으로 가정하였을 경우에는 곡선 부분이 1개 또는 2개의 직선으로 표현되었다.

Figure 7은 곡선경계가 잘못 추출된 건물을 나타낸다. 이 건물들은 건물 크기가 500~600m<sup>2</sup>로서 작고 곡선경계의 길이도 5~10m로 작아서 원시 데이터의 점밀도 한계로 인하여 곡선경계가 추출되지 않은 것으로 판단된다. 9번 건물은 곡선경계의 길이가 5m이하로 매우 짧아서 1m의 점간격을 갖는 라이다 포인트 데이터 상에서 곡선의 특성이 잘 나타나지 않았다. 10번 건물은 곡선경계의 길이가 짧으면서 곡선의 양끝 부분이 오목한 형태로 되어있어서 큰 반경의 국지적 컨벡스헬 알고리즘을 통해 곡선경계 상의 점들이 올바르게 추출되지 않았다. 11번 건물의 곡선경계는 곡률이 작은 완만한 형태를 나타내고 있어서 곡선판별 과정에서 RI 값이 작아서 직선으로 판별되었다.

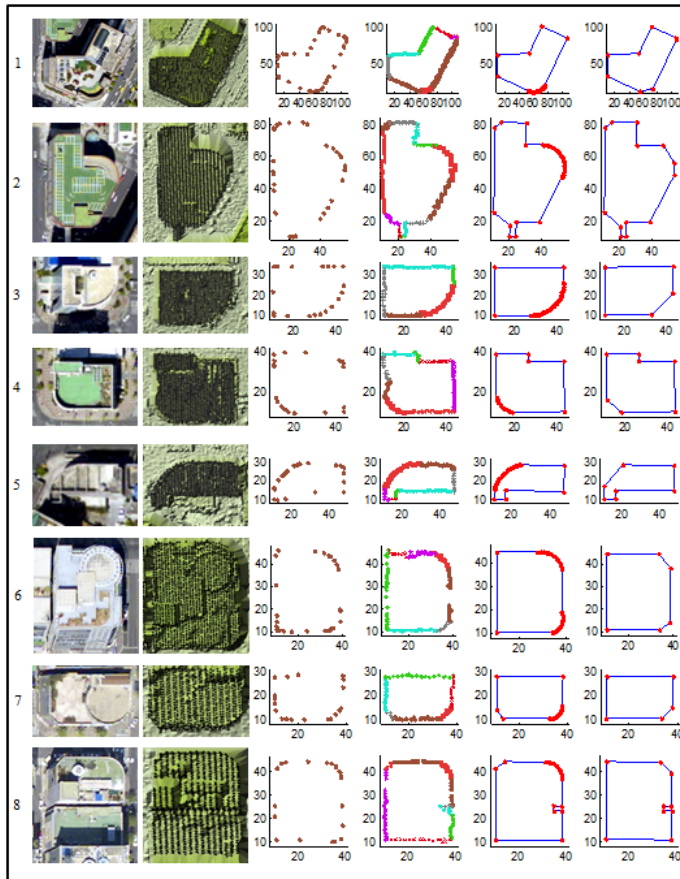


Figure 6. The results of building boundary extraction (from left, pictures of each column refer to building points, boundary points II, boundary points I after grouping, regularized boundaries by the proposed method, regularized boundaries by straight line assumption, and aerial photos)

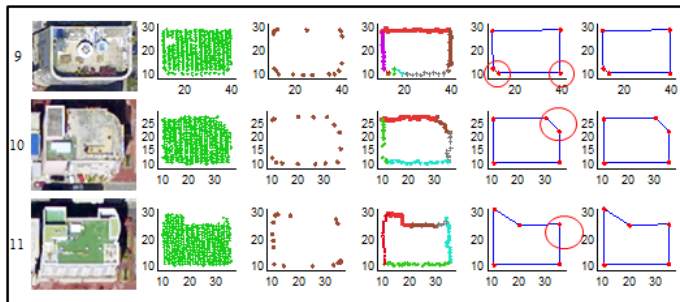


Figure 7. Bad results of building boundary extraction (from left, pictures of each column refer to boundary points I after grouping, regularized boundaries by the proposed method, and aerial photos)

수치지도 작성작업내규에서는 수치도화 시에 곡선 데이터를 축척에 따라 다른 간격으로 도화하도록 규정하고 있다). 곡선경계를 직선으로 가정하고 건물경계

를 추출 및 모델링할 경우, 곡선 부분이 2~3개의 점으로 표현되어(Figure 6과 7의 6열) 수치지도 작업내규를 만족하지 못한다. 그러나 본 연구의 제안방법은 건물경

계의 곡선 부분을 원의 일부로 모델링하며 계수(중심과 반지름)를 갖고 있으므로, 수치지도 작성내규를 만족하도록 자동으로 건물경계를 모델링할 수 있다. Figure 8은 수치지도의 축척에 따라 곡선경계 부분의 점 간격 및 편각 조건을 만족하도록 자동으로 모델링한 결과이다. 좌측부터 각각 1:1,000, 1:5,000, 1:25,000 축척 기준을 만족하도록 곡선경계 부분에 점을 생성한 것이다.

3.3 정량적 평가

건물 추출 결과에 대한 정량적 평가 방법으로는 실험 결과와 참조자료 간의 건물면적, 모서리점의 좌표, 모양유사성, 주방향, 점의 개수 등이 있다(손건호 등, 2007). 본 연구에서는 곡선경계를 직선으로 가정하지 않고 곡선으로 모델링하는 것이 주목적이므로 위와 같은 평가척도를 이용하지 않고 직선세그먼트와 곡선세그먼트가 각각 직선 및 곡선 세그먼트로 잘 추출되었는지를 항공사진 및 라이다 원시 데이터와 시각적으로 비교하여 평가하였다.

11개의 건물에 대한 실험결과와 항공사진 건물의 직선 및 곡선 세그먼트 개수는 Table 1과 같다. 총 11개의 건물에서 66개의 직선 세그먼트와 13개의 곡선 세그먼트가 존재하였는데, 제안방법을 통해 67개의 직선 세그먼트와 10개의 곡선 세그먼트가 추출되었다. 각 건물에 대한 결과를 보면, 직선세그먼트는 실험결과와 참조자료가 정확히 1:1 대응을 나타내지는 않는 것을 알 수 있다. 2개 이상의 직선세그먼트가 1개로 모델링된

Table 1. Sizes of the buildings and the number of straight line and arc segments of each building

#	Size (m)		Segments (unit)			
	Width	Height	Modelled		Aerial photos	
			Line	Arc	Line	Arc
1	98	93	8	1	7	1
2	45	72	11	1	11	1
3	34	24	4	1	4	1
4	34	30	6	1	4	1
5	38	19	6	1	8	1
6	29	36	4	2	4	2
7	29	19	5	1	5	1
8	29	35	8	1	5	1
9	30	19	5	0	4	2
10	26	18	5	0	6	1
11	26	20	5	0	8	1

경우도 있었고, 반대의 경우도 있었다. 직선세그먼트의 오차 원인 중 가장 큰 원인은 6번 건물의 위쪽 부분이나 9번 건물의 우측 상단 부분과 같이 원시 데이터의 점밀도에 비하여 길이가 매우 짧은 직선 세그먼트가 제대로 표현되지 못하였기 때문이었다. 이와 같은 한계는 알고리즘의 개선보다는 다른 데이터와의 융합을 통해 해결이 가능할 것이다.

곡선 세그먼트는 실험결과와 참조자료가 1:1 대응이 되었으며, 추출 결과의 완전성은 69.2%(9개/13개), 정확성은 100%(9개/9개)였다. 추출된 10개의 곡선 세그먼트 중에서 7번 건물의 우측 하단 세그먼트는 실제로 4m 정도 더 길게 모델링 되었다. 즉, 곡선 세그먼트와 그 우측 직선 세그먼트가 교차하는 모서리점의 위치 오차가 4m 정도로 나타났다. 그러나 나머지 9개는 곡선 세그먼트 위의 점들과 모델링된 곡선경계 사이의 평균 거리가 2m이내로 비교적 양호하게 모델링 되었다. 추출되지 않은 3개의 곡선 세그먼트는 실험에 이용한 데이터보다 점밀도가 더 높은 데이터를 이용하거나 항공사진을 함께 이용하면 추출할 수 있을 것으로 판단된다. 정확성이 100%라는 것은 직선 세그먼트가 곡선 세그먼트로 잘못 추출된 경우가 없는 것을 의미한다. 이는 본 연구에서 적응적 컨벡스헬 알고리즘과 국지적 컨벡스헬 알고리즘을 함께 적용한 후 경계점 II의 평균 점간격을 기반으로 곡선경계 후보를 추출하였기 때문으로 판단된다.

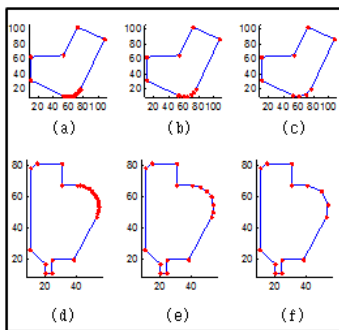


Figure 8. Building boundaries modelled automatically by the conditions of point spacing and deflection angle depending on digital map scales of Korea: (a) and (d) 1:1,000, (b) and (e) 1:5,000, and (c) and (f) 1:25,000

1) 곡선 데이터의 축척간격은 축척 1/1,000은 1m, 1/5,000은 5m, 1/25,000은 10m로 하고 중간점을 생략 할 수 있는 각도는 1/1,000과 1/5,000은 6°, 1/25,000은 10°를 기준으로 하는 것을 원칙으로 한다.

## 5. 결론

본 논문에서는 직선경계와 곡선경계가 혼재하는 건물의 경계를 각각 직선과 곡선으로 모델링하기 위한 방법을 제안하였다. 적응적 컨벡스헬 알고리즘과 큰 반경의 국지적 컨벡스헬 알고리즘을 적용하여 두 가지 경계점을 추출하고, 경계점들의 평균 점간격과 수직이등분선의 교차점 비율을 통해 곡선 세그먼트를 판별하였다. 마지막으로 직선과 곡선에 대하여 각각 다른 방법으로 정규화를 수행하여 건물경계를 직선과 곡선의 조합으로 모델링하였다. 이를 다양한 크기와 형태를 나타내는 11개의 건물에 적용한 결과, 곡선 세그먼트의 추출 정확도의 완전성과 정확성은 각각 69%, 100%로 양호하였다. 매우 짧은 길이의 곡선 세그먼트를 제외하고는 대부분의 곡선 세그먼트를 올바르게 추출하였으며 특히 직선경계를 곡선경계로 잘못 추출하는 오류가 없었다.

본 연구의 결과는 수치지도의 곡선 데이터 도화기준을 만족시키는 건물경계를 자동으로 생성할 수 있으므로 항공라이다 데이터를 수치지도 자동제작에 활용하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것이다. 그러나 길이가 매우 짧은 곡선경계나 양끝이 오목한 형태를 나타내는 곡선경계는 추출하지 못하는 한계가 있었다. 이와 같은 건물들을 올바르게 모델링하기 위하여 향후에는 항공사진과 융합하는 연구가 필요할 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012R1A6A3A01011127).

## 참고 문헌

- Alharthy, A. and J. Bethel, 2002, Heuristic filtering and 3d feature extraction from LiDAR data, PCV02, ISPRS Commission III Symposium 2002, ISPRS, September9-13, Graz, Austria.
- Cho, W. S, Jwa, Y. S., and Lee, Y. J., 2003, Automatic extraction of buildings from airborne laser scanning data, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Korean Society of Civil Engineers, No. 23, Vol. 5, pp. 591-751.
- Choi, S. P., Cho, J. H., and Kim, J. S., 2011, An filtering automatic technique of LiDAR data by multiple linear regression analysis, Journal of the Korean Society for GeoSpatial Information System, KOGSIS, No. 19, Vol. 4, pp. 109-118.
- Dorninger, P. and N. Pfeifer, 2008, A comprehensive automated 3d approach for building extraction, reconstruction, and regularization from airborne laser scanning point clouds, Sensors, MDPI AG, Vol. 8, pp. 7323-7343.
- Edelsbrunner, H., D. Kirkpatrick, and R. Seidel, 1983, On the shapes of a set of points in the plane, IEEE Transactions on Information Theory, IEEE, IT29(4), pp. 551-559.
- Fu, C.S., and J. Shan, 2004, 3-D building reconstruction from unstructured distinct points, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS, Vol. 35, Part B3, unpaginated.
- Habib, A. F., R. Zhai, and C. Kim, 2010, Generation of complex polyhedral building models by integrating stereo-aerial imagery and lidar data, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, ASPRS, Vol. 76, No. 5, pp. 609-623.
- Jarvis, R. A., 1997, Computing the shape hull of points in the plane, Proceedings of IEEE Computer Society Conference Pattern Recognition and Image Processing, IEEE, pp. 231-241.
- Jung, H. S., Lim, S. B., and Lee, D. C., 2008, Utilizing airborne LiDAR data for building extraction and superstructure analysis for modeling, Korean Journal of Geomatics, KSGPC, No. 26, Vol. 3, pp. 227-239.
- Kim, E. M., 2009, Building boundary extraction of airborne LIDAR data by image-based and point-based data analysis, Journal of the Korean Society for GeoSpatial Information System, KOGSIS, No. 17, Vol. 1, pp. 119-129.
- Kim, H. T., 2001, Fusion of lidar data and photogrammetric imagery for autonomous generation of building layers in GIS, Ph. D. Dissertation, Seoul National University.
- Kim, S. J., and Lee, I. P., 2010, Simulation based performance assessment of a LIDAR data segmentation algorithm, Journal of the Korean Society for GeoSpatial Information System, KOGSIS, No. 18, Vol. 2, pp. 119-129.
- Lach, S. and J. Kerekes, 2008, Robust extraction of exterior building boundaries from topographic lidar Data, IEEE Proc. IGARSS, IEEE, Boston, USA, pp. 85-88.



14. Lee, D. H., 2008, Fusion of DSM and photogrammetric imagery for reliable building extraction, Ph. D. Dissertation, Seoul National University.
15. Lee, J. H., and Lee. D. C., 2010, LiDAR data segmentation using aerial images for building modeling, Korean Journal of Geomatics, KSGPC, No. 28, Vol. 1, pp. 47-56.
16. Lee, J. H., Yeom, J. H., and Kim, Y. I., 2011, Filtering airborne laser scanning data by utilizing adjacency based on scan line, Korean Journal of Geomatics, KSGPC, No. 29, Vol. 4, pp. 221-227.
17. Lee, J. H., and Kim, Y. I., 2012, Building boundary reconstruction from airborne lidar data by adaptive convex hull algorithm, Korean Journal of Geomatics, KSGPC, No. 30, Vol. 3, pp. 305-312.
18. Lee, J., S. Han, Y. Byun, and Y. Kim, 2011, Extraction and regularization of various building boundaries with complex shapes utilizing distribution characteristics of airborne LIDAR points, ETRI Journal, ETRI, Vol. 33, No. 4, pp. 547-557.
19. Ma, R., 2004, Building model reconstruction from lidar data and aerial photographs, Dissertation, The Ohio State University.
20. Oh, J. H., 2001, A study on the extraction of building boundary from laser scanning data, Master's Thesis, Seoul National University.
21. Sampath, A., and J. Shan, 2007, Building boundary tracing and regularization from airborne lidar point clouds, PE&RS, ASPRS, Vol. 73, No. 7, pp. 805-812.
22. Shan, J. and A. Sampath, 2005, Urban DEM generation from raw LIDAR data: a labeling algorithm and its performance, PE&RS, ASPRS, Vol. 71, No. 2, 2005, pp. 217-226.
23. Shen, W., 2008, Building boundary extraction based on lidar point clouds data, International Archives Photogrammetry, Remote Sens., Spatial Info. Sci., Beijing, Vol. 37, part B3b, pp. 157-161.
24. Shon, G., Jwa, Y. S., Tao, V., and Cho, W. S., 2007, Geometric regularization of irregular building polygons: a comparative study, Korean Journal of Geomatics, KSGPC, No. 25, Vol. 6-1, pp. 545-555.
25. Xu, J., Y. Wan, and F. Yao, 2010, A method of 3d building boundary extraction from airborne lidar points cloud, IEEE 2010 Symposium on Photonics and Optoelectronic, IEEE.
26. Weidner, U., and W. Förstner, 1995, Towards automatic building extraction from high-resolution digital elevation models, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS, 50, pp. 38-49.
27. Zhang, K., S. Chen, D. Whitman, M. Shyu, J. Yan, and C. Zhang, 2003, A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data, IEEE Transaction on Geoscience and Remote sensing, IEEE, Vol. 41, No. 4, 2003, pp. 872-882.