

3次元建物モデルの自動生成システムで用いる Straight Skeleton 手法

杉原 健一・沈 振江

Automatic generation of 3-D ancient building models based on non-orthogonal building polygons

Kenichi SUGIHARA and Zhen-jiang SHEN

Abstract: 3D urban models are important in several fields, such as urban planning and landscape evaluation. However, enormous time and labor has to be consumed to create these 3D models, using a 3D modeling software such as 3ds Max or SketchUp. In order to automate laborious steps, a GIS and CG integrated system is proposed for automatically generating 3D building models, based on building polygons (building footprints) on digital maps. Digital maps shows most building polygons' edges meet at right angles (orthogonal polygon). In the digital map, however, not all building polygons are orthogonal. In either orthogonal or non-orthogonal polygons, the new system is proposed for automatically generating 3D building models with general shaped roofs by straight skeleton computation which partitions a simple polygon into a set of monotone polygons. In this paper, the methodology for shrinking a polygon and forming monotone polygons are clarified.

Keywords: 自動生成 (Automatic generation), 3次元モデル(3D model), C G (Computer Graphics), 建物ポリゴン (building polygons), Straight Skelton, 非直角ポリゴン (non-orthogonal polygon)

1. はじめに

3次元CG(コンピュータ・グラフィックス)で作る「3次元都市モデル」(図-1右 参照)は、都市計画、景観や防災まちづくり等のアカデミックな分野から公共事業の情報公開、「高台への集団移転」等のまちづくりの計画案に対して合意形成を図るための住民参加の場として利活用が期待される重要な「情報基盤」である。特に、社会資本整備において、構想段階から住民参加の機会を確保し、関心の醸成と計画・設計への寄与を促し、整備案の検討プロセスの「透明性」や「公平性」を高めることで、社会的合意の形成に取り組むことが重要である。

社会資本整備に関わる社会的な合意形成を円滑に実現するためには、住民参加業務の担当者だけでなく、市民や関係者がそれぞれの立場から、実践上の課題を踏まえ改善に向けた議論を継続的に行うことが不可欠であるとされる(国土技術政策総合研究所, 2008)。

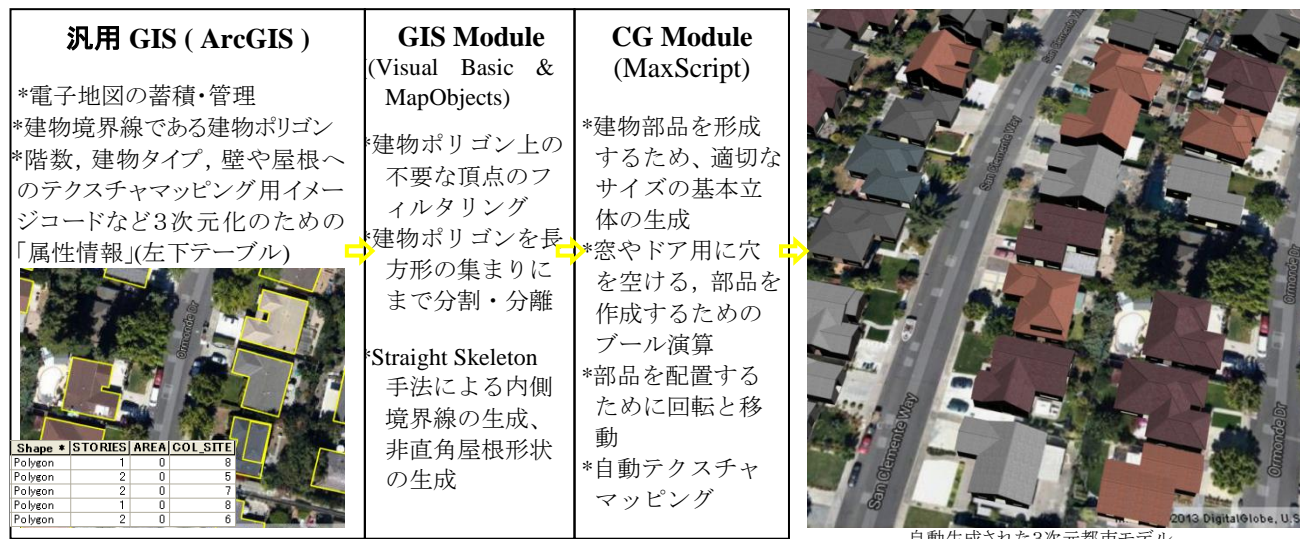
そこで、計画の構想段階から住民などの関係者に参加してもらい、行政、住民、地権者、デザイナー等の専門家で、整備案の出来上りのイメージを共有し、整備案を検討していくことができれば、円滑に社会的な合意形成を実現することができる。そのために、「実際に出来上がる整備事業」に近いであろう「整備案の3次元モデル」が重要となる。例えば、津波対策のための「高台への集団移転の案」を3Dモデル化するには、デザイナーが描く計画案の地図情報に基づき、主に3次元CG作成ソフトを用いて、膨大な手作業にて、街並みの3Dモデルを製作する。例えば、建物の3DモデルをCSG (Constructive Solid Geometry) で

作成する場合、次に示す手順に従って、モデリングを行う。

(1) 屋根や建物本体など建物の部品となる、適切な大きさの直方体、三角柱、多角柱などの基本立体(プリミティブ)を作成する。(2) 建物本体に窓やドア用に穴を空ける、または、寄棟屋根の台形状の屋根板等の建物部品を形成するためにブール演算を行う。(3) 作成した建物の部品を回転する。(4) 電子地図上の図形情報に基づいて適切な位置にそれらを配置する。(5) それらにテクスチャマッピングを施す。

この手作業を省力化するために、建物の3Dモデルを、製作ルールで自動生成する手続き型モデリング (Procedural modeling) が研究されている (Yoav I. H. Parish et al, 2001; Pascal Müller et al, 2006)。Müllerらは、この手続き型モデリングにおいて、GISが蓄積・管理する電子地図から「建物境界線」を取り込んで、彼らの形状言語 (shape vocabulary) において、基本形 (basic shapes) に分類する。もし、それができない形状であれば、建物ポリゴンの押し出し処理 (extruded footprint) と Straight Skeleton 手法 (O. Aichholzer et al, 1995) を用いて一般形状の屋根を生成するとしている。しかし、彼らの論文において、電子地図上の建物ポリゴンへのStraight Skeletonの適用手法や適用結果などの図や記述はなく、手法は明らかにされていない。

この手作業を省力化し、3次元都市モデルを自動的に作るために、筆者らは、GISとCGを統合化したシステムを提案した (Kenichi SUGIHARA, 2012)。通常、図-1左の電子地図上の建物ポリゴン (建物境界線) が示すように、建物ポリゴンは、その頂角が直角の直角ポリゴン (orthogonal polygon) である。筆者らのこれまでの研究成果で、電子地図上の建物ポリゴンが直角ポリゴンである場



図－１ 自動生成システムの構成と3次元都市モデルの自動生成のプロセス

合、それらを長方形の集まりにまで分割分離して、これら長方形の上に、Box形状の建物本体や上から見て長方形の屋根を配置して、3Dモデリングを行った。しかし、全ての建物ポリゴンが直角ポリゴンとは限らない。本研究では、非直角建物ポリゴン (non-orthogonal) に対して、Straight Skeleton手法を用いて、自動生成する手法を提案する。

本研究では、明らかにされていない建物ポリゴンに対する、Straight Skeleton手法の適用、主に、「Splitイベント」が生じたときの屋根付き建物の3Dモデルを自動生成する手法を明らかにする。

2. 本システムの構成と自動生成のプロセス

本研究における自動生成のシステム構成と3次元都市モデルの自動生成のプロセスを図－1に示す。3次元都市モデル(図－1右)の情報源は、衛星画像に基づいて描いた建物ポリゴンなどの電子地図である。電子地図は、汎用GIS (ArcGIS など)によって、蓄積・管理される。電子地図上の建物ポリゴンは、GISのソフト部品 (MapObjects)を用いてプログラム開発した「GISモジュール」にて、以下の「前処理」を行う。

(1) 直角ポリゴンを「長方形の集まり」にまで、分割・分離する。(2) 建物ポリゴン上の不要な頂点をフィルタリングする。(3) 建物境界線よりセットバックした所にある窓やドアを配置するため内側境界線を生成する。(4) 非直角建物ポリゴンに対して、非直角屋根を生成するため Straight Skeletonを生成する。

前処理したデータを、3次元CGソフト (3ds Max)をコントロールする「CGモジュール」(MaxScript でプログラム開発)が取込み、以下の処理を自動的に行い、3次元建物モデルを自動生成する。

(1) 屋根や建物本体、窓など建物の部品となる、適切な大きさの直方体、三角柱、多角柱などの基本立体 (プリミティブ)を作成する。(2) 建物本体に窓やドア用に穴を空ける、または、寄棟屋根の台形状の屋根板等の建物部品を形成する

ためにブール演算を行う。(3) 作成した建物の部品を回転する。(4) 電子地図上の図形情報に基づいて適切な位置にそれらを配置する。(5) それらにテクスチャマッピングを施す。

このGISモジュールとCGモジュールでの処理は、本研究で開発したプログラムによって、全て自動的に処理される。例えば、図－1右に示すような建物の3Dモデルが約300軒存在する「街の3Dモデル」を自動生成する場合、元になる建物ポリゴンの形状によるが、コンピュータ (CPU: Intel (R) Core (TM) i7 3630QM 2.4GHz)を用いて、GISモジュールでの、処理時間は約30秒、CGモジュールでの処理時間は、3分から5分の間であった。

3. Straight Skeleton 手法の概要

Aichholzer らによって提案された Straight Skeletonは、図-2(e)に示すように、一般的な形状のSimpleポリゴンにおいて、ポリゴンの各辺がポリゴン内部方向に、平行に一定速度で縮小するとき、各頂点の軌跡を辿ることによって得られる「直線状の骨格 (Straight Skeleton)」として定義された。このStraight Skeletonは、図-2(f)に示すような、一般形状の屋根を生成する手法として、適用できることが分かった。

筆者らが開発したシステムは、電子地図上の直角建物ポリゴンに対して、それを長方形の集まりに分割・分離して、3次元建物モデルを自動生成した。このStraight Skeleton手法を用いることによって、建物ポリゴンが、直角ポリゴンか非直角ポリゴンかを問わず、屋根付き3次元建物モデルを自動生成することができる。

Straight Skeletonは、 n 頂点のポリゴンのその内部を n 個の「monotone polygons (単調変化ポリゴン)」に分割するという優れた性質を持つ。

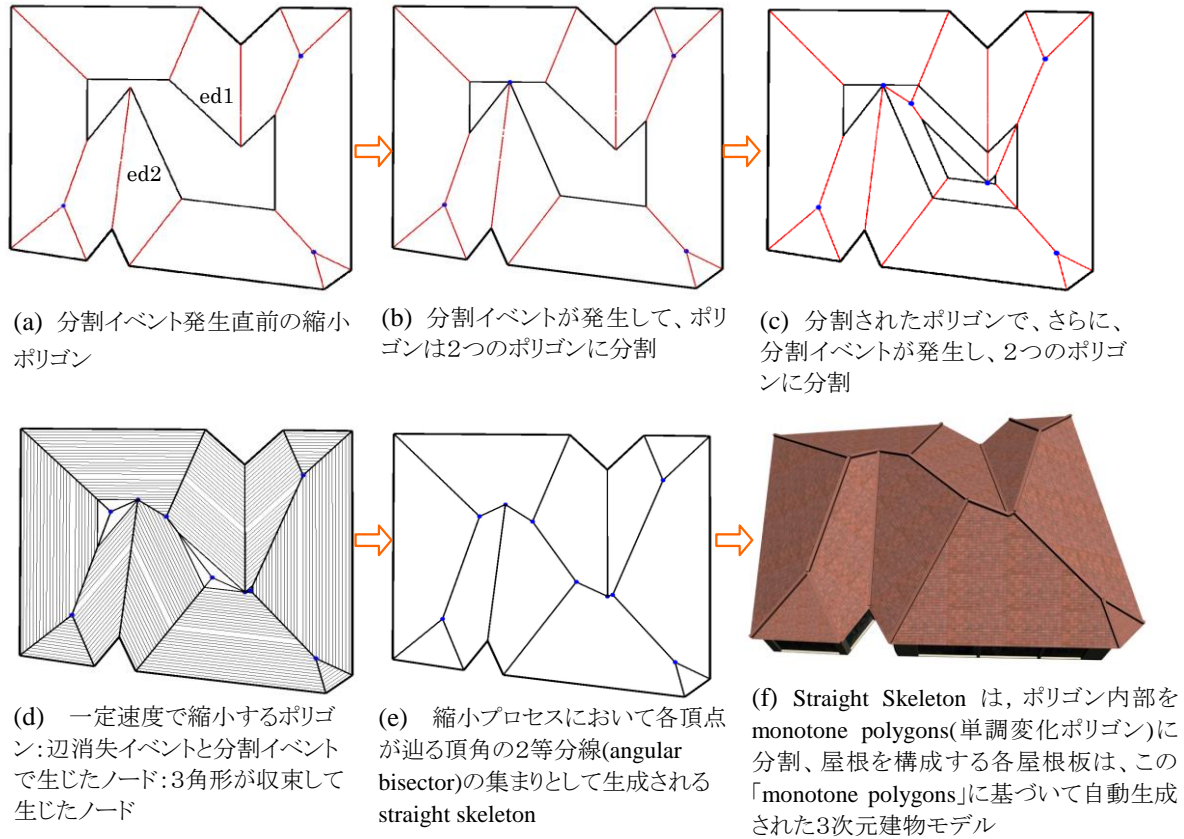


図-2 ポリゴンの縮小プロセス、その結果、生成される straight skeleton、自動生成された3次元建物モデル

図-2(f)に示すような一般形状の屋根を構成する各屋根板はこの「monotone polygons」に基づいて生成する。本論文では、この屋根板となる monotone ポリゴンの形成プロセス、ノード位置の求め方を明らかにする。

Aichholzer らによると、図-2に示すように Straight Skeleton は、一定速度でのポリゴンの縮小プロセスにおいて各頂点が辿る頂角の2等分線(angular bisector)の集まりとして形成される。この縮小プロセスは、次のイベントが生じるまで続く。

- (1) 辺消失イベント (Edge イベント) : 辺が縮小して消失する。消失辺の両側の辺が、以降は接することになる。
- (2) 分割イベント (Split イベント) : Reflex 頂点 (内角が 180 度以上の頂点) が辺に交差して、ポリゴンを分割する。分割されて2本になった辺と Reflex 頂点に付随する辺が、以降は接するという新たな隣接関係が生じる。

4. Straight Skeleton 手法の詳細

縮小プロセスにおいて、ポリゴンの全ての辺の長さが短くなるわけではなく、図-2(a) の Reflex 頂点を端点にもつ辺 ed1 と ed2 のように、縮小処理で、辺長が長くなる辺も存在する。辺の両端の頂点の内角の和が360度以上であれば、その辺の長さは縮小処理で長くなり、そうでなければ、短くなり、分割イベントが起こらないかぎり、「辺消失イベント」でノードに収束する。縮小処理を一意に決めるパラメータは、縮小処理前後の辺間の距離:「縮小距離(=d_{shri})」で

ある。分割イベントが生じないとして、i 番目の辺に対して、「辺消失イベント」が生じる距離(=e_{d_{shri}})は以下の式で与えられる。

$$e_{d_{shri}} = \frac{L_i}{(\cot(0.5 * \theta_i) + \cot(0.5 * \theta_{i+1}))} \quad (1)$$

ここで、L_i は辺長、θ_i、θ_{i+1}は辺両端の内角を表す。

但し、辺両端の頂点の内角を2等分する線がポリゴン内部で交わるために、0.5*θ_i+0.5*θ_{i+1}<180° となる必要がある。この条件を満たす全ての辺について、d_{shri}を式(1)で求める。分割イベントが生じなければ、これらのd_{shri}の中で最小となる値が、最初に辺消失イベントが生じる縮小距離となり、その辺が最初に消失する辺となる。本研究では、「分割イベント」は、縮小処理において最初に「辺消失イベント」が生じるまでの「e_{d_{shri}}」の間において、分割イベントが生じるかどうかを調べ、分割イベントが生じた場合、その結果生じるノード(分割ノード)の位置を求め、ポリゴン分割することで分割イベント処理を行うこととする。

屋根板となる monotone ポリゴンの形成プロセス、ノード位置の求め方を図-3に示す。図-3(a) と(b)では、縮小処理が進み、Reflex 頂点からの2等分線が伸びて、分割イベントが発生する前後の縮小ポリゴン、2等分線と対向する辺が交差して、分割イベントが発生した様子を示す。図-3(c)は、monotone ポリゴンがどのように形成されるかを示す。縮小処理が始まると、各辺は、番号付けされた処理する前の元の辺 (original edge : o_ed_i) からポリゴン内側へ、

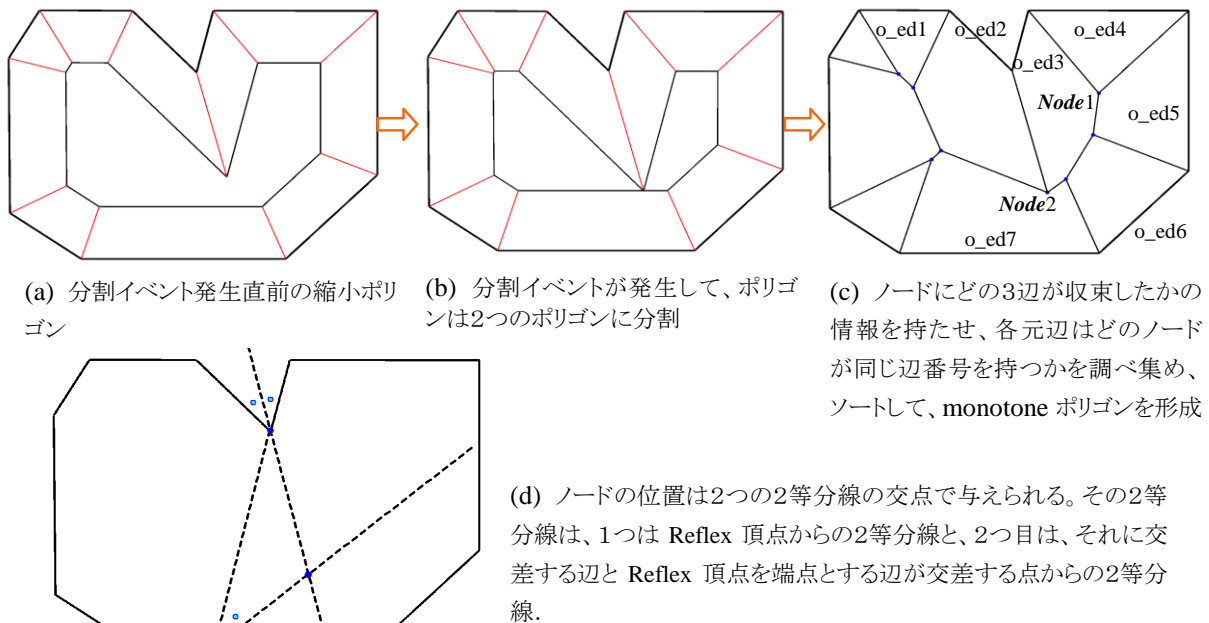


図-3 各 monotone ポリゴンの形成プロセス、ノード位置の求め方

長さを変えてスイープ(移動)する。ノードは、辺消失イベントまたは分割イベントが起こって生じる。

例えば、図-3(c)にて、ノードである *Node1* は「辺消失イベント」で生じ、元の辺である *o_ed3* から *o_ed5* まではポリゴン内側をスイープし、その「収束点」である。システムは、*Node1* に対して、*o_ed3* から *o_ed5* までは、「ノードに収束する元辺 (original edge)」として、それらの辺の番号を関連付ける。一方、*Node2* は「分割イベント」の結果、生じ、2辺 *o_ed2* と *o_ed3* の間の Reflex 頂点からの2等分線とそれに交差する辺 (*o_ed7*) の交点である。同様に、システムは *Node2* に対して、Reflex 頂点を端点とする2辺 (*o_ed2* と *o_ed3*) と交差する辺 (*o_ed7*) を、「ノードを形成する元辺」として関連付ける。このようにノードは、少なくとも3つの元辺がスイープし、イベントが発生・収束して、形成される。システムは、各ノードについて、どの元辺である3辺が収束したかの情報を持たせる必要がある。

そして、monotone ポリゴンを形成するプロセスでは、元辺を順に辿り、各ノードに関連付けられている少なくとも3つの元辺の番号を調べ、自分と同じ番号であれば、その元辺に対する monotone ポリゴンを構成するノードとする。例えば、図-3(c)で示すように、元辺 *o_ed4* は、その同じ辺番号をもつノードはたった1つのみ (*Node1*) だが、元辺 *o_ed3* は、その同じ辺番号をもつノードは4つ (*Node1* と *Node2* も含む) ある。

次に、元辺をベクトルとみなし、また、元辺の起点から、集めた各ノードへ線分もベクトル (ノードベクトル) とみなし、ノードベクトルの元辺ベクトルへの射影を求め、その値についてソートし、順番に並べ、monotone ポリゴンを構成するノード群とする。それらノードと元辺の頂点は、すべて、同一平面上にあり、屋根板を形成することになる。

5. まとめ

本研究では、Straight Skeleton 手法を用いて、一般形状の建物境界線に対して、その上に一般形状の屋根付き3次元建物モデルを自動生成する手法を提案した。この屋根の屋根板となる monotone ポリゴンの形成プロセス、ノード位置の求め方を明らかにした。このような手法で建物の3Dモデルを自動生成する事例は他には見られない。

参考文献

- 国土技術政策総合研究所：社会資本整備における合意形成円滑化のための手引き ～紛争アセスメント及びメディアーション～ 住民参加に関わる紛争解決のあり方に関する検討会 平成20年3月
- Yoav I. H. Parish, and Pascal Müller, 2001. *Procedural modeling of cities, Proceedings of ACM SIGGRAPH*, ACM Press, E. Fiume, Ed., New York, pp. 301-308.
- Pascal Mueller, Peter Wonka, Simon Haegler, Andreas Ulmer, Luc Van Gool, 2006. *Procedural modeling of buildings, ACM Transactions on Graphics* 25, Vol. 3, pp. 614-623.
- O. Aichholzer, F. Aurenhammer, and D. Alberts, B. Gärtner, 1995. *A novel type of skeleton for polygons, Journal of Universal Computer Science*, Vol.1 (12), pp. 752-761.
- Sugihara, K. and Kikata, J. 2012. *Automatic Generation of 3D Building Models from Complicated Building Polygons, Journal of Computing in Civil Engineering*. doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000192.