

拡張した straight skeleton 手法による屋根の自動生成

○杉原 健一*¹ 沈 振江*²

キーワード：straight skeleton（直線状骨格）、屋根モデル、自動生成、3次元都市モデル

1. はじめに

建物の3Dモデルを中心とする「街並みの3Dモデル」(図1右)は、都市計画、まちづくり、防災シミュレーション等の学術的な分野から公共事業の情報公開、「住居の高台移転」等の防災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まで利活用が期待される重要な「情報インフラ」である。例えば、津波対策のための「住居の高台移転の案」、あるいは「かつてあった古代の建物の復元」を3Dモデル化するには、それぞれ、デザイナーが描く計画案の地図やコンサルタント企業が提出する発掘調査地図、古地図など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。

この手作業を省力化するために、建物の3Dモデルを、製作ルールのプログラムで自動生成する「手続き型モデリング」が研究されている¹⁾²⁾。Müllerらは、建物境界線である建物ポリゴンの押し出し処理と Aichholzer³⁾らによる straight skeleton 手法を用いて一般形状の屋根を生成する。筆者らのこれまでの研究⁴⁾⁵⁾⁶⁾で、開発したシステムは、電子地図上の直角建物ポリゴンを長方形の集まりまで分割・分離し、各長方形の上に Box 形状の建物本体を配置して3次元建物モデルを自動生成した。しかし、建物の形態は多岐にわたり、全ての建物境界線が直角ポリゴンとは限らない。本研究では、Aichholzer³⁾らの straight skeleton 手法で述べられている辺消失イベントと

分割イベント以外の「第3のイベント」、及び、縮小プロセスの最終段階の「収束の形」として、彼らの手法で述べられている「収束点」だけでなく、同様に面積がなく、これ以上収束しない「収束線分」も最終の収束の形であることを提案する。このように機能を拡張した straight skeleton 手法を用いて、非直角建物ポリゴンを含む、あらゆる形状の建物ポリゴンに対して、数値演算エラーを発生させることなく、現実にはありうる形状の屋根付き建物の3Dモデルを自動生成することができる。

2. 既往の研究

図1右に示すような街並みの3Dモデルは、広範囲で多目的に利活用が期待される情報インフラであるため、建物の3Dモデルを自動的あるいは半自動的で構築する研究が盛んである。現存する街並みの3Dモデルは、ステレオ画像の航空写真や衛星写真からコンピュータビジョン(CV)や写真測量(photogrammetry)、リモートセンシングの技術を用いて、建物をふくむ地物の3次元形状を復元する。

これらの測量法は、正確なサイズの建物概形の3Dモデルを提供するが、これらは窓や玄関、ドア、ベランダといった建物の詳細を持っていない3Dモデルである。これらリモートセンシング技術等によって生成された現状の都市の3Dモデルは、窓や玄関等の建物の詳細を無視した概形モデルの生成に集中しすぎて、現状ある建物

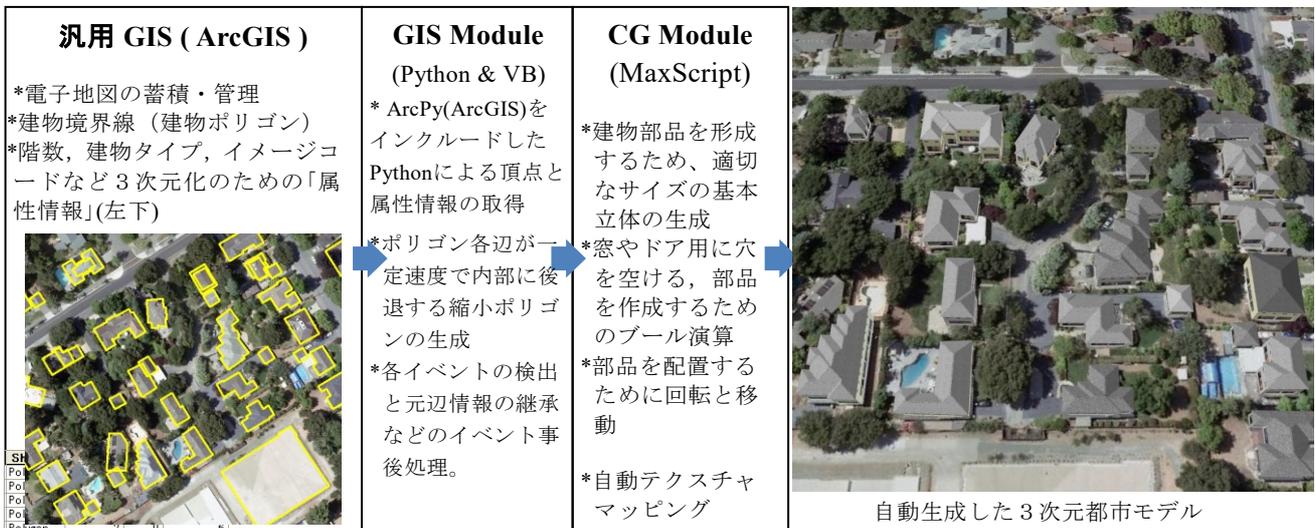


図1 自動生成システムの構成と3Dモデルの自動生成のプロセス

とはかけ離れていると評される。

建物の詳細を有する現状ありうる形状の3次元建物モデルを、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。Müllerら¹⁾²⁾は、この手続き型モデリングにおいて、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³⁾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。

筆者らの論文⁷⁾で執筆当時の手続き型モデリングについて調査したが、最新の研究で Aliaga ら⁸⁾は、逆手続き型モデリング(IPM: inverse procedural modeling)手法、つまり、与えられた3Dモデルの解析と手続き化(proceduralize)を行い、同様の形状の建物を作り出す手法を提案した。即ち、このIPM手法を用いて、現存する3Dモデルに「手続き表現」を見出し、そのモデルに固有の構造を発見し、それらを手続き化する。その明らかになった「手続き表現」に基づいて、自動的に同様の形状の建物を展開・形成することで、アーティストはクリエイティブな仕事に専念できるとする。

Aliaga らは、当初はファサードや建物形状を測定した点群に対して、繰り返しや対称性のあるパターンがないかを調べ、それらの「手続き化」を試みた⁹⁾。但し、手続き化を試みたモデルはセグメント化され、さらにラベル化された構造的な制約のあるものに限られていた。Aliaga ら⁸⁾の今回の研究では、入力モデルからパターンを形成する「階層化された手続き」を把握し、手続きの「分割されたツリー構造」を構築する。そのツリー構造から抽出された「階層のネスト情報を持つ分割ルール」を独立さ

せる。これら「分割ルール」は、同様の3Dモデルを生成拡張するときのシステムのエンジンとしている。この手法は、同様な形状の建物構造が分岐するような形態の建物の3Dモデルの自動生成には有効である。しかし、製作する3Dモデルが、そういう形態の建物でない場合には有効とはいえない。また、この手法は元になる3Dモデルが必要で、それをどう作るかも課題となる。

3. 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建物の3Dモデルの自動生成のプロセスを図1に示す。街の3Dモデルの情報源は、図1左に示すような属性情報を関連付けた建物境界線(建物ポリゴン)を描いた電子地図である。電子地図は、汎用GIS(ArcGIS)によって、蓄積・管理される。電子地図上の建物ポリゴンは、本研究で開発したArcPy(ArcGIS)をインクルードしたPythonプログラムにより、ポリゴン頂点と属性情報などを取得する。Visual Basic.NET で開発したGISモジュールによって、次の前処理を行う。

(1) ポリゴン各辺が自由に平行で、一定速度で内部に後退する縮小ポリゴン群の生成(図2(a)参照)。(2) 縮小処理において、各イベントの検出とノードの生成、イベントでトポロジーが変化する縮小ポリゴンの各頂点において「縮小開始する前の元の辺情報(元辺情報)」の継承(図2(a)参照)。(3) 特に Split イベントが生じた時点のノードの生成と、イベントでトポロジーが変化した縮小ポリゴンにおける「元辺情報」の継承などのイベント事後処理(図2(b)参照)。(4)元のポリゴンの各辺について、ノードの元辺情報を調べ、合致する場合には、その元辺に属するノードとして認識、元辺の方向成分についてソートし、各元辺に対する monotone ポリゴンを生成する。これらは同時にポリゴンの straight skeleton(直線状骨格)となる(図2(c)参照)。

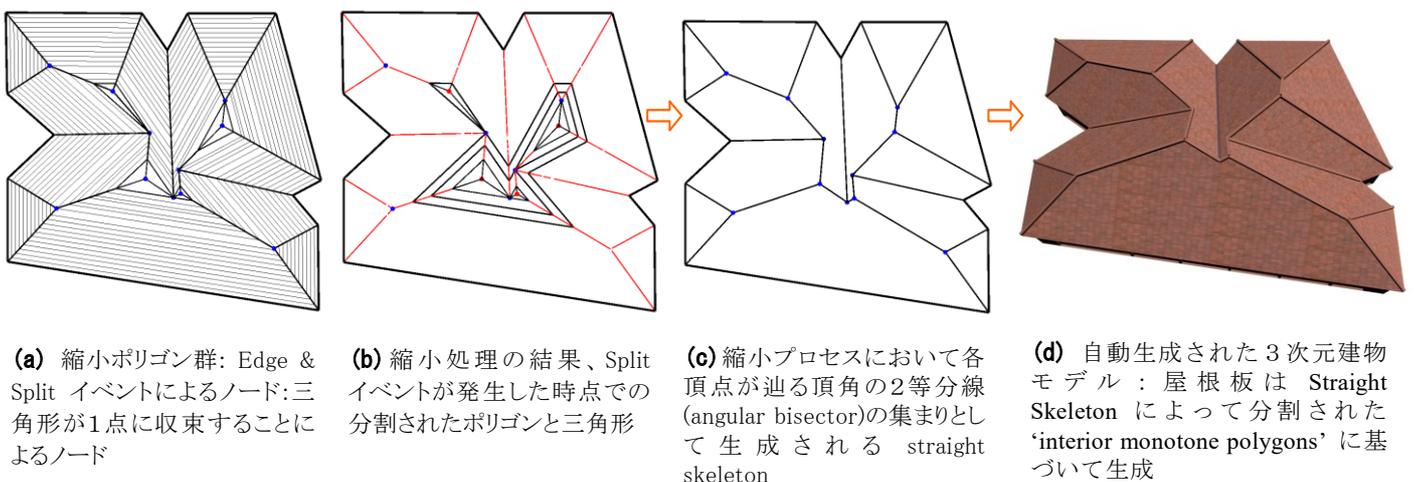


図2 Straight Skeleton 手法による縮小プロセスと自動生成された3次元建物モデル

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)が取り込み、以下の処理を自動的に行い、3D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。特に、複雑な形状の屋根板となる monotone ポリゴンはそれを囲む直方体(bounding box)を作成。(2)これらの基本立体の間で、屋根や窓用に穴を開ける、または、部品を作成するためのブール演算を行う。特に、屋根板生成のため、monotone ポリゴンはそれを押し出し処理(extrude)したものと bounding box との間で論理積をとる。(3)作成した部品を回転する。(4)正しい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。

4. straight skeleton 手法の概要

Aichholzer³⁾らによって提案された straight skeleton は、一般的な形状の建物ポリゴンに対して、図2に示すように、一般的な形状の屋根を生成する手法として、適用で

きる³⁾。straight skeleton はポリゴンの各辺がポリゴン内部に、平行に一定速度で縮小するときの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)」である。縮小するポリゴンの各頂点は、各頂点の頂角を2等分する線(angular bisector)上を移動する。この縮小プロセスは、次のイベントが生じるまで続くとしている。

(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。

(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。

図2(a)では、straight skeleton 処理による等速度で縮小するポリゴン群、Edge イベントと Split イベントによるノード、三角形が1点に収束することによるノードを表示している。図2(b)は、Split イベントが発生した時点での分割されたポリゴンと三角形を表示し、図2(c)は straight skeleton を表示している。straight skeleton は、n 頂点のポリゴンを 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³⁾。図2(d)は、各屋根板をこの「monotone polygons」に基づいて生成した3次元建物モデルである。

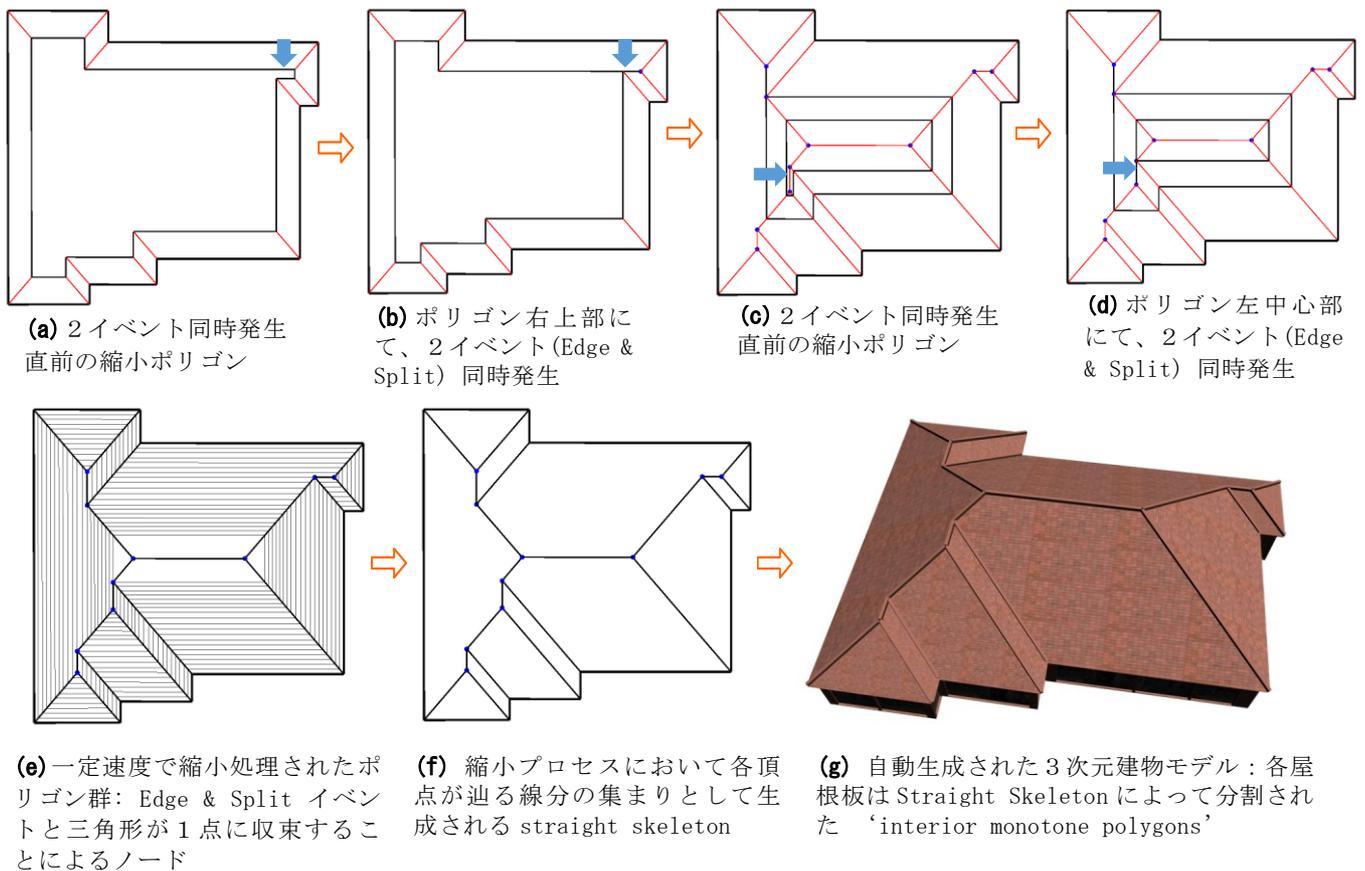


図3 直角ポリゴンの縮小プロセスと2つのイベント同時発生，自動生成された3Dモデル

本研究では、縮小処理では、上記2つのイベントの他に、図3に示すように Edge イベントと Split イベントが同時に起こる「第3のイベント」が生じることを提案する。この第3イベントは、図3(a)~(d)の矢印が指すところで示すように Reflex 頂点からの頂角2等分線が他の辺と交差して Split イベントが起こるが、分割されたポリゴンで、同時に Edge イベントが生じ、辺が消失してしまうイベントである。

5. straight skeleton 手法の詳細とアルゴリズム

straight skeleton 手法を用いる縮小処理において、ポリゴンの各辺は、その元の辺と平行で、かつ一定速度でポリゴン内部へ移動する。このとき、縮小処理前後の各辺の距離：「縮小距離(= d_{shri})」が縮小処理を一意に決める。縮小処理を始めて、初めて、「Edge 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、 $0.5 * \theta_i + 0.5 * \theta_{i+1} < 180^\circ$ 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。これらの d_{shri} の中で最小となる値が、最初に Edge イベントを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、「Split イベント」は、縮小処理において最初に「Edge イベント」が生じるまでの「 e_d_{shri} 」の間において、Split イベントが生じるかどうかを調べ、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 Split イベント処理を行うこととする。

具体的には、Split イベントが発生した時点の分割されたポリゴン(図2(b))が示すように、Reflex 頂点を片方の頂点とする頂角の2等分線分が、ポリゴンのどの辺と交差するかを調べる。図4の上から4行目で示す値である一定の刻み幅(e_d_{shri} / n_step)の縮小距離で縮小したとき、1つの辺が、複数の2等分線分と交差する可能性がある。その場合、最も短い d_{shri} での Reflex 頂点について、分割ノードの位置を求める。

ポリゴンは、図2に示すように、複数回、Split イベントが生じて、ポリゴン分割が複数回行われ、複数のポリゴンが生成される場合がある。分割されたポリゴンはさらに分割される可能性もあるので、図4のアルゴリズムに示すように、Split イベント処理ループでは、全てのポリゴンについて、Split イベントが生じるかどうかを調べ、全てのポリゴンが、さらに Split イベントが生じることがなければ、ループを抜ける。次に全ての分割されたポリゴンについて、辺が消失する Edge イベント処理を行い、または、ポリゴン頂点数が3個なら、3頂

点ポリゴン処理に移行するとした。図4は擬似言語で書かれており、ポリゴンがノードの集まりになるまで縮小処理を進めるためのアルゴリズムである。

縮小処理で、いずれかのイベントが生じ、ポリゴンはトポロジ的に変化し、ポリゴンは複数のポリゴンに分割される。分割されたポリゴンが面積を持つかぎり、縮小処理は続き、その頂点数を減らしていき、2点か1点のノードに縮小、集約される。本研究では、2点、即ち、ポリゴンが線分に収束する場合(収束線分)を提案する。縮小処理で線分と線分が重なるとき、本「収束線分」に収束せず、1点にのみ収束すると仮定すると、ほぼ平行な線の交点を求めることになり、数値演算エラーを引き起こす可能性が出てくる。

縮小プロセスが始まると、各辺は、ポリゴン内側へ、長さを変えてスワイプ(移動)する。いずれかのイベントが生じ、分割されたポリゴンの各辺の番号付けが変化しても、分割ポリゴンの各辺には「縮小プロセス前の元の辺(元辺: original edge : o_edge)」の情報を保持させる必要がある。これは、ノードを形成するには少なくとも3つの縮小を開始する前の元ポリゴンの辺の情報が必要だからである。そして、monotone ポリゴンはノードの元辺情報を元辺についてソートすることで形成される。

6. まとめ

本システムを適用した事例を図5に示す。図5の(b)と(c)で示す様に、多くの建物ポリゴンにおいて、また、図5の(f)と(g)で示す1つの複雑な形状の直角建物ポリゴ

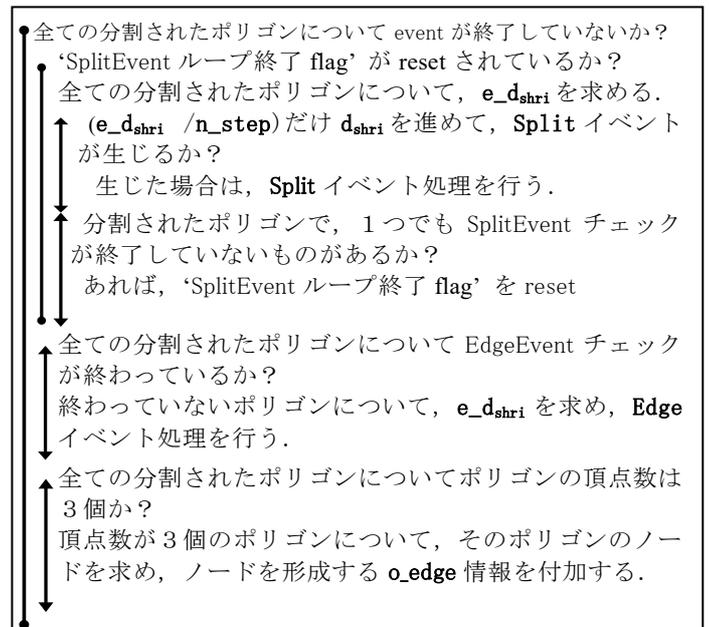


図4 ポリゴン縮小処理で、各イベントを生じさせノードの集まりまで収束させるためのアルゴリズム(擬似言語で書かれている。端点が丸印の縦線は、丸印の横を継続条件とする while 文、端点が三角の縦線は、三角の横を条件とする if 文)

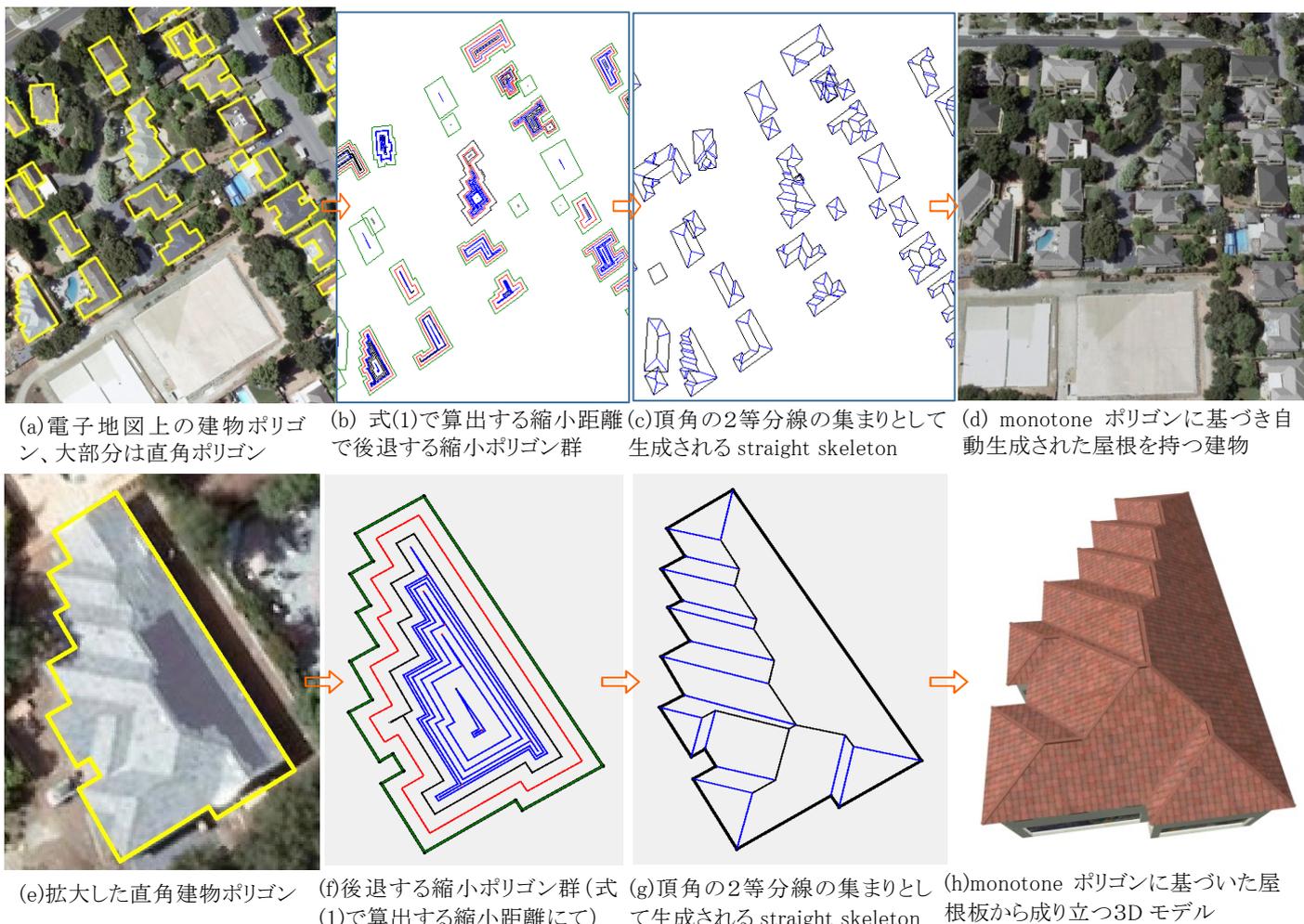


図5 Straight Skeleton 手法による縮小プロセスと自動生成された3次元建物モデル

ンにおいても、「第3のイベント」及び「収束線分」を定義し、プログラム中でそれらの場合を場合分けし、その場合に対応することで、縮小処理及び straight skeleton の形成が正しく行われることを示す。もし、これらの場合を「場合分けしない場合」は数値演算エラーを生じるか、不要なノードを生成することになる。

図5(a)に示すような地域の建物群については、straight skeleton 手法によって、ほぼ現実に近い建物モデルを自動生成できたが、図5(h)の一部の屋根が現実の建物では切妻屋根になっており違いがある。これは、現実の建物の形態は多岐にわたり、この手法のみでは生成できない建物も数多く存在することによる。その場合はこれまでの研究で建物ポリゴンを長方形の集まりまで分割し、各長方形に独自の屋根を形成する等の手法で自動生成する。

謝辞:本研究は、JSPS 科研費の研究課題番号:15K06260と15K06354、16K01045 の助成を受けて遂行された。ここに謝意を表する。

【参考文献】

1) Yoav I. H. Parish, and Pascal Müller: Procedural modeling of cities, Proceedings of ACM SIGGRAPH, ACM Press, E. Fiume, Ed., New

York, pp.301-308, 2001.
 2) Pascal Müller, Peter Wonka, Simon Haegler, Andreas Ulmer, Luc Van Gool : Procedural modeling of buildings, ACM Transactions on Graphics 25, Vol. 3, pp.614-623, 2006.
 3) O. Aichholzer, F. Aurenhammer, and D. Alberts, B. Gärtner : A novel type of skeleton for polygons, Journal of Universal Computer Science, Vol.1 (12), pp.752-761, 1995.
 4) K.Sugihara, Y.Hayashi: "Automatic Generation of 3-D Building Models with Multiple Roofs ", Journal: Tsinghua Science & Technology (清華大學(中国)のジャーナル), vol. 13, pp. 368-374
 5) Kenichi Sugihara and Junne Kikata: "Automatic Generation of 3D Building Models from Complicated Building Polygons", Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE (American Society of Civil Engineers, アメリカ土木学会) January 2012
 6) Kenichi SUGIHARA: "Automatic Generation of 3D Building Models with Various Shapes of Roofs", ACM SIGGRAPH ASIA 2009, Sketches, Visualization, 16-19 DEC, 2009
 7) 杉原健一、沈 振江: "ストレートスケルトン手法による 3 次元地形モデルの自動生成とその活用", 建築学会 第 39 回 情報・システム・利用・技術 シンポジウム 2016.12.8-9
 8) I. Demir, D. Aliaga, B. Benes, "Proceduralization for Editing 3D Architectural Models", International Conference on 3D Vision (3DV), Oct., 2016.
 9) D. G. Aliaga, P. A. Rosen, and D. R. Bekins "Style Grammars for interactive Visualization of Architecture", Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on Volume:13, 786-797, 2007

*1 岐阜経済大学 経営学部 教授 博士(工学)
 *2 金沢大学 環境デザイン学系 教授 博士(工学)

Automatic Generation of Roof Models by Extended straight skeleton Computation

○Kenichi SUGIHARA*¹

Zhenjiang SHEN*²

Keywords: straight skeleton Computation, Roof Model, Automatic Generation, 3D Urban Model, GIS (Geographic Information System)

3D urban models are important in several fields, such as urban planning and gaming industries. 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 show 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. The straight skeleton is defined as the union of the pieces of angular bisectors traced out by polygon vertices during a continuous shrinking process in which edges of the polygon move inward, parallel to themselves at a constant speed. The straight skeleton is unexpectedly applied to constructing general shaped roofs based on any simple building polygon, regardless of their being rectilinear or not. As shrinking process, each vertex of the polygon moves along the angular bisector of its incident edges. This situation continues until the boundary change topologically.

In this paper, the algorithm for shrinking a polygon and forming a straight skeleton are clarified and, the new methodology is proposed for constructing roof models by assuming 'the third event' and, at the end of the shrinking process, the shrinking polygon is converged to 'a line of convergence'. In our research, extended straight skeleton computation is used for automatic generation of roof models. Based on the monotone polygons which straight skeleton computation forms, roof models are automatically generated. For everyone, a 3D urban model is quite effective in understanding what if this alternative plan is realized, what image of a sustainable city will be. Traditionally, urban planners design the city layout for the future by drawing building polygons on a digital map. Depending on the building polygons, the integrated system automatically generates a 3D urban model so instantly that it meets the urgent demand to realize another alternative urban planning for sustainable development or disaster prevention.

*1 Professor, School of Management, Gifu Keizai University

*2 Professor, School of Environment, Kanazawa University