

(52) 改良したstraight skeleton手法による 3次元屋根モデルの自動生成

杉原 健一¹・村瀬 孝宏²

¹正会員 岐阜経済大学教授 経営学部情報メディア学科(〒503-8550 岐阜県大垣市北方町5丁目50番)
E-mail:sugihara@gifu-keizai.ac.jp

²非会員 中京学院大学 短期大学部(〒509-6192 岐阜県瑞浪市土岐町2216)
E-mail:murase@chukyogakuin-u.ac.jp

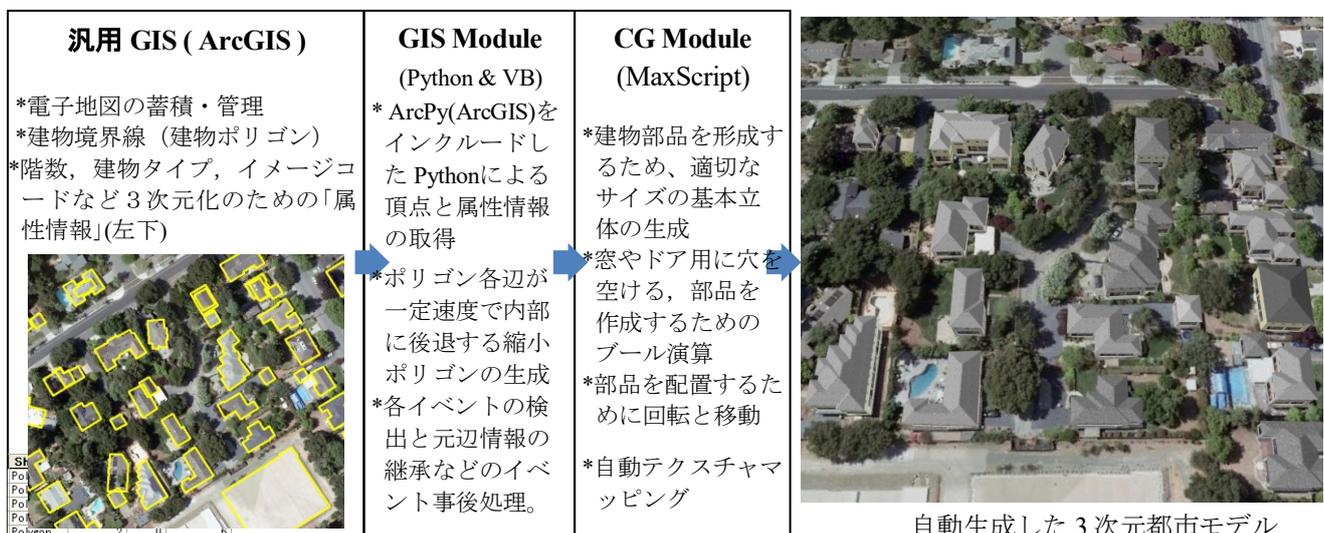
自動生成システムのこれまでの研究で、電子地図上の直角建物境界線(建物ポリゴン)を長方形の集まりまで分割し、各長方形の上にBox形状の建物本体を配置して3次元建物モデルを作成した。しかし、建物の形態は多岐にわたり、全ての建物境界線が直角ポリゴンとは限らない。本研究では、Aichholzerらのstraight skeleton手法(以下、SS法)で述べられている「Edgeイベント」と「Splitイベント」以外の「頂点イベント」の場合分けをすること、及び、monotoneポリゴンにおける頂点のソート法、数値演算エラーを発生させることなく「Splitイベント」を行う手法などSS法を改良した手法を用いて、屋根付き建物の3Dモデルを自動生成する手法を提案する。

Key Words : automatic generation, straight skeleton, 3d roof model, building footprint, 3d urban model

1. はじめに

3次元建物モデルを中心とする「街並みの3Dモデル」(図-1右)は、都市計画などの学術的な分野から公共事業を情報公開し、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。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、専門家が描く計画案の地図や発掘調査地図、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(以下、SS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)}で、開発したシステムは、電子地図上の直角建物境界線(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、



自動生成した3次元都市モデル

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

Aichholzer³⁾らのstraight skeleton手法(SS法)で述べられている「Edgeイベント」と「Splitイベント」以外の収束頂点が重なり合う「頂点イベント」の場合分けをすること、及び、SS法によって形成される「monotoneポリゴン」における頂点のソート法、数値演算エラーを発生させることなく「Splitイベント」を行う「改良したSS手法」を提案する。本手法を用いて、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、現実にあ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。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。また、Aichholzer³⁾らのstraight skeleton手法の論文では、数学的にスケルトンが持つ性質、その証明は記述し

てあるが、スケルトンの構築方法の記述はないため、本論文の構築方法は独自の手法である。

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) ポリゴン各辺が自らに平行で、一定速度で内部に後退する縮小ポリゴン群の生成(図-2(b)(c)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(c)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-3(a)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(d)参照)。

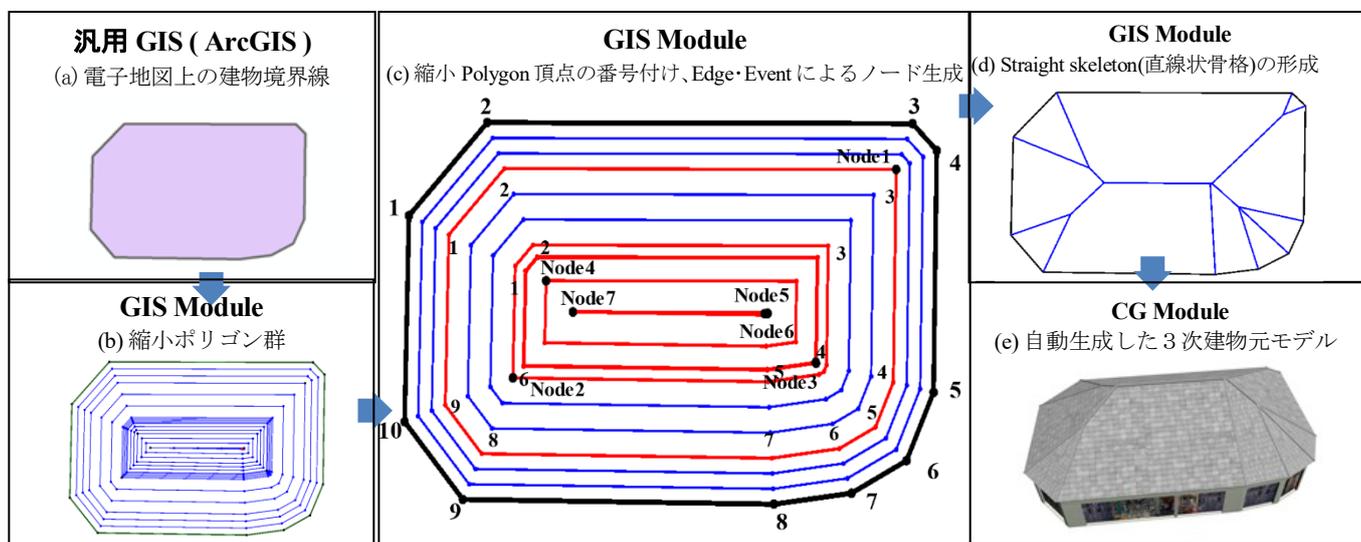


図-2 ストレートスケルトン手法による3D建物モデルの自動生成のプロセス

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実行、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、屋根や窓用に穴を空ける、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. 改良した straight skeleton 手法について

図-2において、Reflex頂点(内角が180度以上の頂点)がない凸包ポリゴン(convex polygon)の縮小処理と直線状骨格を形成するプロセスをしめす。図-3(a)の頂点5及び頂点9が示すように、Reflex頂点は縮小処理で対向する辺と交差し、Splitイベントが生じる。Reflex頂点のない凸包ポリゴンにおいては「Edgeイベント」のみが生じる。この場合、図-2(c)に示すように、縮小処理で「短い辺」から順に辺はノードに収束する。具体的に、縮小処理によるポリゴン内部への辺の伝搬によって、図-2(c)の「Node1」は、「辺3」が消失し、「辺2」「辺4」が交差して出来上がる。ここで、ポリゴン頂点は「時計回りに番号付け」され、「辺の番号」は起点とする頂点の番号と同じとしている。「Node1」のようにノードは、通常、3つの辺が伝搬し形成される。即ち、Edgeイベントでは短い1辺が収束・消失し、消失辺の両側の2辺が交差する。または、Splitイベントでは2辺の間の頂点となるReflex頂点に対向する1辺と交差して、交差点がノードとなる。例えば、図-3(a)のNode4のように辺8及び辺9の間の頂点9が対向する辺5と交差する。このように、3辺が収束・交差して、ノードを形成する。

しかし、例外的に図-2(c)の「Node3」は、縮小処理で「辺5」「辺6」の収束点が一致・消失し、「辺4」「辺7」が交差して出来上がる。つまり、4つの辺が当該ノード形成に関わっている。さらに、正多角形(またはその一部)が建物境界線になっている形状では、こ

の場合以上にノードに収束・消失する辺の数が多い。従って、本システムでは、ノードには、データ構造として、その「生成イベント種別」(EdgeイベントかSplitイベントか頂点イベント)、ノードを形成する「辺の数」、ノードを形成する消失しない「先頭辺」(例えば、「Node3」における「辺4」)、同じく消失しない「最後尾辺」(「Node3」における「辺7」と「消失辺」(「Node3」における「辺5」,「辺6」)という属性情報を持たせている。しかし、現実には、「頂点イベント」は起きにくい。これは、ほぼ連続的な仮想空間の中の縮小処理で、倍精度浮動小数点の計算で有効桁が15桁、収束点のx座標もy座標も一致することはほとんどなく、全く同じ点位置に収束することは極めて例外的であると考えられる。そのため、収束点を厳密な点と考えるのではなく、微小な半径の円と仮定し、縮小処理でその範囲に入る点を収束点とすることにした。他の「頂点イベント」が発生した例を図-4(a)の「Node2」に示す。当ノードは頂点4と頂点7が重なり合って生じる。頂点4は辺3と辺4、頂点7は辺6と辺7が頂点の隣接辺として伝搬しており、その重なったノードはこれら4辺が交差して形成されることになる。収束点を微小な収束範囲と考え、頂点4と頂点7はこの収束範囲に入り、「頂点イベント」を引き起こすとする。もし、このように収束点に

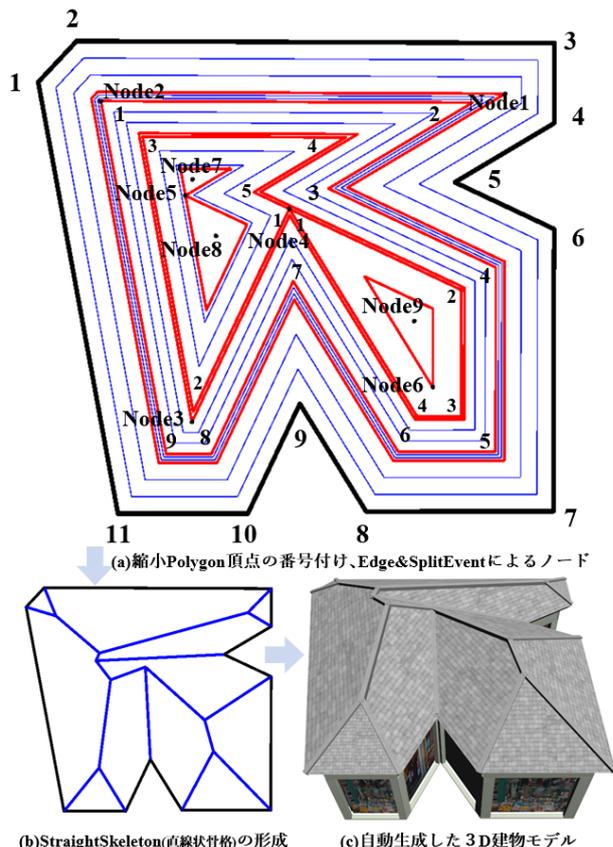


図-3 凹型ポリゴン(Concave)に対してSS手法による3D建物モデルの自動生成のプロセス

範囲をもたせないと, monotoneポリゴンにはすれ違う収束点により髭のような形状が付加され, 屋根板にするには不適切な形状となってしまう。

図-2から図-4のいずれの縮小処理においても, 各イベントが生じ, ポリゴンのトポロジーが変化する。そのとき, 再度, 頂点の番号付け, 内角の計算を行い, ノードに収束するまで, 縮小処理を継続する。ポリゴン各辺は収束・消失しないかぎり, 縮小処理し始める前の元のポリゴンの辺(元辺)の情報を持ち続ける必要がある。これは, 元辺がポリゴン内部に伝搬し, 収束, 交差, 分割されて, ノードを形成するからである。そして, 各元辺がノードに関連付けられた「元辺情報」を拾って, monotoneポリゴンを形成する。

具体的には, 図-2(c)の「Node2」は, トポロジーが変化する直前の縮小ポリゴンでは, 「辺8」が消失し, 「辺7」, 「辺9」が交差して出来上がるが, 「辺8」の元辺は元ポリゴンの「辺9」であり, 「辺7」, 「辺9」の元辺は, 各々, 元ポリゴンの「辺8」, 「辺10」としなければならない。また, Split イベントが生じる図-3(a)においても, 「Node5」は, 交差される直前の縮小ポリゴンでは, 「辺2」に Reflex 頂点である頂点5が交差して出来上がるが, 「辺2」の元辺は1回目の分割が起こる前の元ポリゴンの「辺11」である。

monotoneポリゴンを形成するには, 元辺について順に, 全てのノードの元辺情報を調べ, 同じ元辺番号を持つノードを拾い出し, 各元辺についてノード

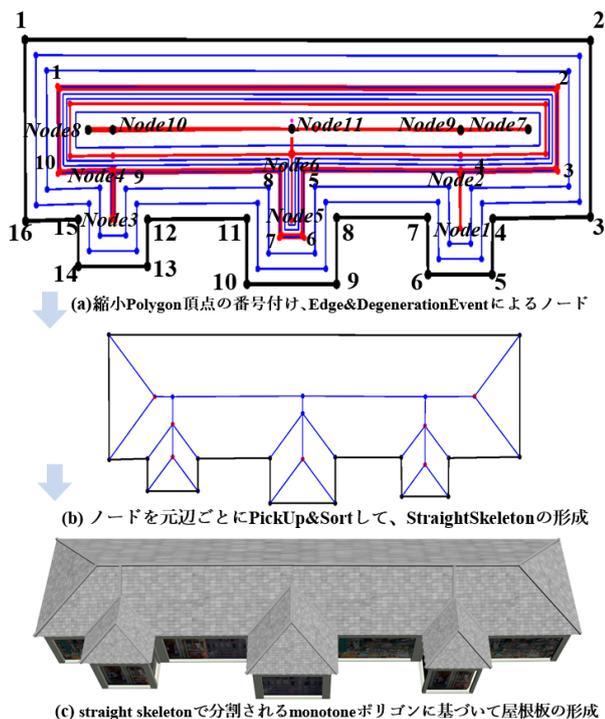


図-4 4辺が収束する縮退したイベントを場合分けし直線状骨格の形成と屋根モデルの自動生成

をソートすることで形成する。本研究では, 同じ元辺に属する全てのノードをベクトルと見なし, 各ベクトルの元辺への射影成分を算出し, それらに基づいて, ソートした。しかし, 図-4の「元辺3」に属するノード:「Node2」, 「Node7」, 「Node9」が示すように, 「Node2」と「Node9」の元辺への射影成分は全く同じであり, 誤差によって, ノードを拾う順番が誤ってしまう可能性があった。そこで, 本システムでは, 単調増加すると考えられる射影成分によるソートと, 元辺中心から各ノードへの方位角(azimuth)についてもソートして, monotoneポリゴンの先頭頂点と最後尾頂点は, 方位角が最大, 最小になるノードを選び, ノードが回り込んで形成されている複雑な monotoneポリゴンでも正しく形成するようにした。

また, 図-4の直角建物ポリゴンにおいて Split イベントが生じる場合に Reflex 頂点に隣接するどちらかの辺と対向する辺の交点を求めなければならないが, 対向辺と隣接辺が平行となる場合がある。この場合, 交点を求めようとすると数値演算エラーを引き起こす。そこで, 本システムでは対向辺に平行でなく, 垂直となる辺を選び, その辺との交差点を求めることで, エラーの発生を防いだ。

本研究では, 収束頂点が重なり合う「頂点イベント」の場合分け, 及び, SS法によって形成される「monotoneポリゴン」における頂点のソート法, 数値演算エラーを発生させることなく「Split イベント」を行う「改良したSS手法」を提案した。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。本手法を用いて, 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, 現実にあ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。

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) Sugihara K., Hayashi Y. : “Automatic Generation of 3-D Building Models with Multiple Roofs” , *Journal: Tsinghua Science & Technology*, vol. 13, pp. 368-374.
- 5) Sugihara K. and Kikata J.: “Automatic Generation of 3D Building Models from Complicated Building Polygons” , *Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE (American Society of Civil Engineers)* January 2012.