(26) 分割四角形の隣接関係を明らかにするポリゴン分割法による屋根モデルの自動生成

杉原　健一[1]・村瀬　孝宏[2]

[1]正会員　岐阜協立大学教授　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

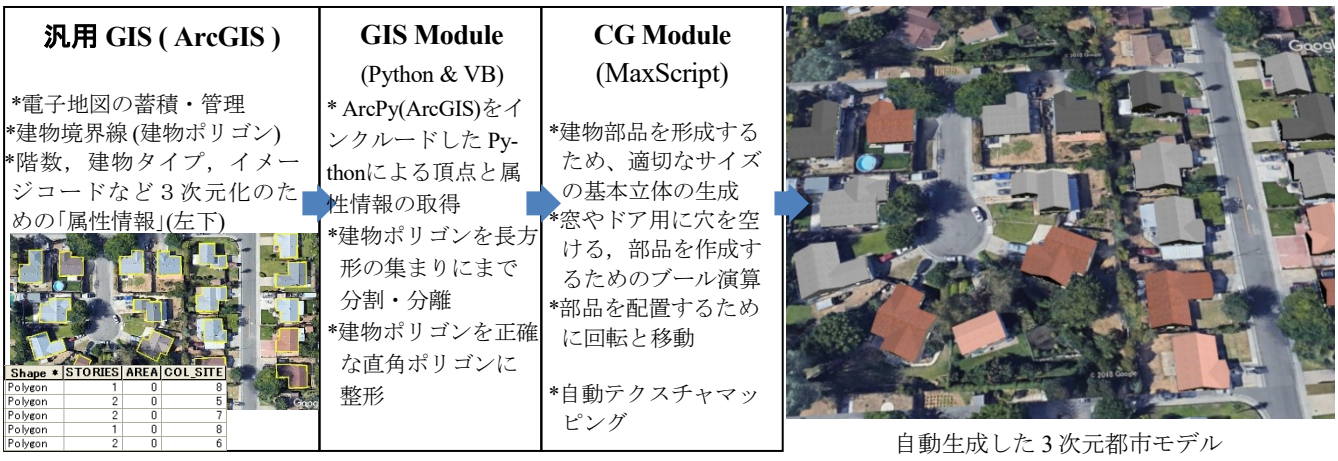
これまでの研究で，電子地図上の直角建物境界線(建物ポリゴン)を長方形の集まりまで分割し，各長方形の上にBox形状の建物本体を配置して建物の３Ｄモデルを自動生成した．本手法では，建物ポリゴンを分割する過程で，分割された四角形(分割四角形)の傾きや分割四角形のどの辺で，外部のどの四角形にどのように接していたか等の「隣接情報」を分割四角形に保存し，これに基づいて，互いに直交する長方形の集まりとなる建物ポリゴンを再構築する．但し，傾きがほぼ垂直な四角形が隣接しているような形状のポリゴンでは，ポリゴンの主な傾きに合わせるため四角形の方向が180度反転し，不具合を生じる．本研究では，こうした不具合にも対応するように「隣接関係を明らかにするポリゴン分割法」による建物の自動生成を提案する．

Key Words : *automatic generation, 3D building model, polygon partition, building footprint, CG, GIS*

1.　はじめに

「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Aichholzer[3)]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[4) 5)]．ところが，本稿の図で以下に示すように電子地図上の建物ポリゴン(建物境界線)は，その頂角が“ほぼ直角”のポリゴンであるが，厳密に頂角が直角の直角ポリゴン(Orthogonal Polygon)とは限らない．そのため，基本立体であるBox形状を建物本体として組み合わせて作る建物で，そのBox間に「隙間」や「重なり」が生じてしまう．そこで，建物ポリゴンを正確な直角ポリゴンに整形(Rectification)し，精緻な建物の３Ｄモデルを自



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

動生成する手法を提案した[6]．本手法では，建物ポリゴンを四角形の集まりまで分割するが，その過程で，分割された四角形(分割四角形)の傾きを計測し，外部のどの四角形のどの辺に，どのように接していたかを「隣接関係」の情報として「分割四角形」に保存し，この隣接情報に基づいて，互いに直交する長方形の集まりとなる建物ポリゴンを再構築する．但し，ポリゴン再構築(整形)時に，ほぼ垂直な四角形が隣接しているような形状のポリゴンでは，分割四角形をポリゴンの主な傾き(主傾き)に合わせるため四角形の方向が180度反転(flip)してしまうことが多い．このとき四角形に保存された隣接関係に基づいて整形処理するので，反転すると不具合を生じる．本研究では，多様なポリゴン形状に対応するように「分割四角形の隣接関係を明らかにするポリゴン分割法」による建物の自動生成を提案する．

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．まだ，存在しない，これから作る計画案の街並みの建物の3次元形状をドローン等で取得することはできないが，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」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．ここで，Straight Skeleton手法による生成される屋根は，Straight Skeletonの縮小処理において，短い辺は消失するので，長い辺が残ることになり，屋根頂線は，建物境界線の「長辺に平行な頂線」を持つ屋根しか生成できない．

本研究で提案するシステムでは，電子地図上の建物ポリゴンを四角形の集まりまで分割･分離して，各四角形の上に独立して建物形状を作成できる．屋根形状は多種多様であり，「四角形の長辺に垂直な頂線」となる屋根も存在する．本システムでは，分割･分離した四角形の長辺に平行な屋根頂線とするか，垂直な頂線とするかをポリゴンに関連付ける属性情報で決め，屋根形状を生成できる．

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．

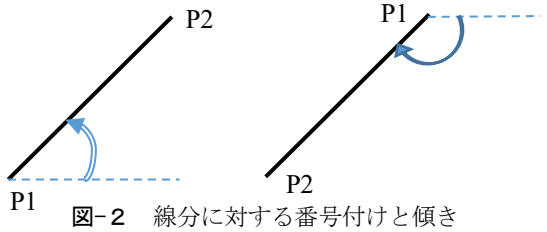
(1) 建物ポリゴンの各辺の長さや傾き，左右にどちらに曲がるのか(RL 表現)，各頂点の内角の計測.
(2) 内角がほぼ１８０度の頂点をフィルタリング.
(3) ポリゴン各辺の辺長の総和が最大となる辺の傾きである「主傾き(Main Angle)」の算出.
(4) 窓やドアの配置のため，元建物ポリゴンをセットバックした縮小ポリゴンの生成.
(5) RL 表現で，L 頂点(Left Turn)間の連続する R 頂点(Right Turn)の個数のカウント.
(6) 「連続する R 頂点の個数」に応じて枝屋根の分類，さらに L 頂点の前後の辺の長さや分割線から対向するポリゴン辺までの距離に応じて，分割パターンと優先度を決め，分割処理の実行.
(7) 分割された四角形について，その「頂点の番号付け」と隣接している四角形を探す「活性四角形」[6)]かどうか，「主傾き」に対する分割四角形の傾きに応じて反転(Flip)するかの判定.
(8) 活性四角形が，外部のどの四角形のどの辺にどのように接するかを調べ，「主屋根との共通頂点である頂点」(母点とする)を基準として平均長辺と平均短辺，主傾きから，整形四角形の形成.
(9) 整形した四角形に関連付けられている属性情報(屋根タイプ，長辺や短辺の長さ，傾き，頂点座標など)をＣＧモジュールへ出力.

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)が取込み，以下の処理を自動的に行い，建物の３Ｄモデルを自動生成する．**(1)**整形した四角形に基づいて，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の生成． **(2)**これらの基本立体間で，屋根や窓用に穴空け，部品作成のためのブール演算． **(3)**作成した部品の回転．**(4)** 作成部品の正しい位置への配置．**(5)**それらにテクスチャマッピングの施し．

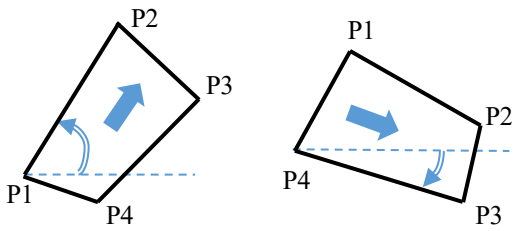
4. 四角形頂点の番号付け

線分の傾きは，線分両端の２つの頂点を点１と点２とするとき，ｘ座標の小さい頂点を点１とし，大きい頂点を点２とし，傾き＝(y2-y1)/(x2-x1)と計算する．これは，２次元の座標系でｘ軸は右に向かっており，線分がｘ座標の小さい頂点からｘ座標の大きい頂点に向かうとき，頂点の ｙ 座標がどう変化するかが「傾き」になるということである．このような線分の頂点の番号付けにおいて，**図−２**の左に示すように線分の２つの頂点で左側にある頂点を始点である点１(P1)と番号付けを行うと，線分の傾きは−90度から+90度までの範囲に限定できることになる．一方，**図−２**の右に示すような番号付けを行うと，線分の傾きは−90 度以下の角度になってしまう．同じ傾きを 2 つの角度で表現するのは不適切なので，ｘ座標の小さい左端の頂点を点１(P1)と番号付けする．

同様に，「長方形の頂点の番号付け」を行う場合，**図−３**に示すように上側長辺の左側の頂点を点１(P1)と番号付けすると，長方形の傾きを−90 度から+90度までの範囲に限定できるが，４辺の長さが異なる「頂角がほぼ直角の近い四角形の頂点の番号付け」を行う場合，最長辺である上側長辺の左側の頂点を点P1と番号付ける(**図−３**左)，あるいは最長辺である下側長辺の右側の頂点を点 P3 と番号付け(**図−３**右)すると，四角形の傾きを−90 度から+90 度までの範囲に限定できる．四角形において，点 P1 か点 P3 の番号付けが決まれば，残りの頂点は「時計回りの番号付け」で決まる．このような「長方形に近い四角形」に対して，本システムでは，時計回りに辺の長さを計測し，最長辺を見つけ，その最長辺が「右向き」であれば，その辺の始点を点１(P1)，あるいは，最長辺が「左向き」であれば，その辺の始点を点３(P3)と番号付ける．



図−２　線分に対する番号付けと傾き



図−３　四角形に対する番号付けと傾き

本研究では，整形した四角形を形成する際，「四角形の方向性」を考慮し，四角形の方向をポリゴン各辺の辺長の総和が最大となる辺の傾きである「主傾き」か，それに直交する方向に合わせることとした．ここで，「主傾き」は，一定の刻み幅の傾きの範囲で，ポリゴンの各辺の辺長の総和を求め，最大の総和となる範囲から主傾きを求める．そして，平均長辺長と平均短辺長から，整形した四角形を形成する．

5. 四角形頂点の番号付けと枝屋根の形成手法

枝屋根の形成手法を以下に述べる．**図−４**に示すような頂角がほぼ直角のポリゴンの各辺を時計回りに辿るとき，辺は右に回るか(Ｒ頂点)，左に回るか(Ｌ頂点)のどちらかである．本システムでは，Ｌ頂点の間の連続するＲ頂点の数をカウントし，２個以上で「枝屋根」となる可能性があるので，Ｌ頂点前後の辺の長さや候補となる分割線から対向する辺までの距離を算出し，「枝屋根」となる場合は分割処理を実行する．ここで，内角が 270 度前後のＬ頂点からは「２本の分割線」を引くことができる．これまでの研究[4)5)6)]で，分割線が３つの条件を満たし，優先度の高い分割線が選ばれて，分割処理を実行する．

図−４の頂角がほぼ直角の３６頂点のポリゴンの場合，「RRLLRRLRRLLRRLLRRLRLRRLRLRRLLRRLLRRL」(左端より RL 表現で)となり，「LRRL」型の枝屋根を複数持つ．分割四角形の頂点は，前述した番号付けを行い，分割される四角形の「４辺で最長辺は何番目か(最長辺番号)」，また，その向きに応じて，四角形のどの辺が本体ポリゴンに接していたかが**表−１**に示すように分かる．これは，枝屋根として四角形を切り取るとき，「LRRL」型の枝屋根で「先頭のＬ頂点を始点とする辺から何番目の辺になるか」である「辺番号」が「４番目の辺」が確実に「隣接辺」となるからである．

表−１　分割四角形の最長辺の番号･進行方向と活性辺の関係

最長辺番号	最長辺の向き	活性辺(Active Edge)	妻側の辺	図-4での枝屋根例
1	右向き	辺41(ad41)	辺23	A，D
1	左向き	辺23(ad23)	辺41	F
2	右向き	辺34(ad34)	辺12	B, C, H, I
2	左向き	辺12(ad12)	辺34	E，G
3	右向き	辺23(ad23)	辺41	F
3	左向き	辺41(ad41)	辺23	A，D
4	右向き	辺12(ad12)	辺34	E，G
4	左向き	辺34(ad34)	辺12	B, C, H, I

この「辺番号」は，切り取られる前の元のポリゴン本体の辺の番号を「絶対番号」とすると，切り取られる枝屋根の四角形の中での辺番号であり，「相対番号」であるといえる．ここで，この「隣接辺」は，建物ポリゴンが四角形の集まりまで分割･分離されたあと，隣接辺を「活性辺」として，隣接四角形をサーチする．また，「２番目の辺」は，**図−５**の枝屋根と**表−１**にも示すように「妻側の辺」となる．

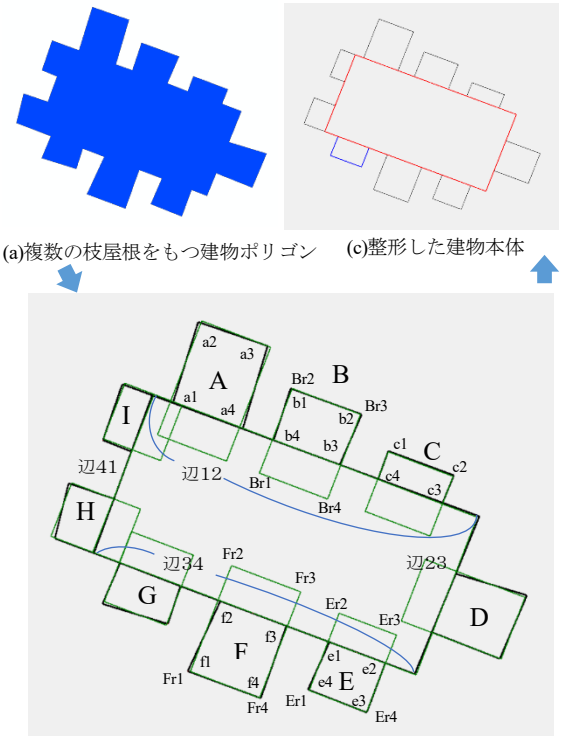
枝屋根を形成するには，「どの四角形に接しているか」，そして，その四角形の「どの辺か」，「どのように四角形に隣接」しているかの隣接情報に基づいて，枝屋根を整形して構築する．枝屋根は，**図−４**で示すように本体ポリゴンのどの辺，即ち，辺 12，辺 23，辺 34，辺 41 に接するかで４つの場合に分け，それから，「隣接パターン」については「時計回り方向の分割線(**図−４**の枝屋根Ｉ)」か「反時計回りの分割線(**図−４**の枝屋根H)」か，または，「両方向からの分割線(**図−４**の枝屋根ＨとＩ以外全て)」の３種類の場合に分ける．

枝屋根の形成における場合分けについて，上記の場合分けに加えて，**図−４**及び**図−５**に示すように枝屋根は本体ポリゴンへ伸長する必要があり，その「枝屋根部の形状」（**図−４** (b)において緑色の四角も含める四角の枝屋根部）と「枝部の建物の形状」(**図−４** (b)において黒色の四角だけの枝建物部)で次の３種類の場合が存在する．

(1)枝屋根部も枝建物部も「最長辺が２番目か４番目」で本体ポリゴンの隣接辺に向きが平行(**図−４**の枝部Ｃ)
(2)枝建物部は「最長辺が２番目か４番目」だが枝屋根部は「最長辺が１番目か３番目」で本体ポリゴンの隣接辺に枝屋根部の向きが垂直(**図−４**の枝部ＢとＥ，Ｈ)
(3)枝屋根部も枝建物部も「最長辺が１番目か３番目」で本体ポリゴンの隣接辺に共に向きが垂直(**図−４**の枝部ＡとＤ，Ｆ)

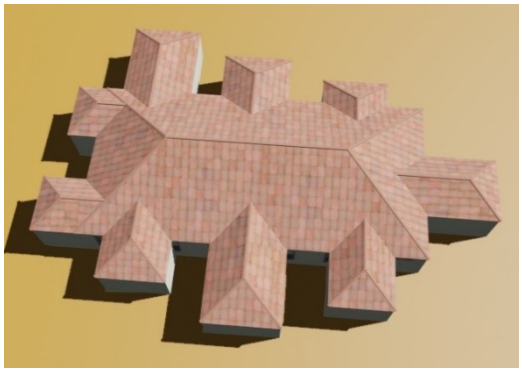
6. まとめ

東西方向に平行な辺を持ち，それに垂直となる南北方向の辺を持つような形状となる建物ポリゴンは電子地図上でも多く見られ，建物ポリゴンを整形する際，「四角形の方向 Flip」が起こりうる．このため四角形の方向性を考慮し方向 Flip が起こるか起こらないかを判定し，隣接辺や座標の母点の変更等を行う必要がある．本手法を用いれば，枝部が隣接四角形にどう接するかの「隣接関係」が明らかとなり，窓やドア等を配置するとき，それらを枝部の隣接建物に交差しないように配置する等，矛盾しない形状の建物モデルを自動生成できる．



(b)枝屋根の分割･伸張、整形

図−４　建物ポリゴンの枝屋根の分割･伸張、整形



図−５　自動生成した３次元建物モデル

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, 2008.
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), Vol.27 (5), pp.476-488, 2012.
6) 杉原 健一, 村瀬 孝宏： 3 次元建物モデルの自動生成のための建物境界線のポリゴン整形，土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol. 72 No. 2, pp.167-174, 2016.