

電子地図上の建物ポリゴンの整形による3次元建物モデルの自動生成

○杉原 健一*¹ 沈 振江*²

キーワード：3Dモデル、自動生成、3次元建物モデル、建物ポリゴン、整形

1. はじめに

「復興まちづくり」や「自然と共生するまちづくり」等の次世代型まちづくりを推進するとき、デザイナーは、通常、計画案、整備案の地図を描く。このとき、「実際に出来上がる整備事業」に近いであろう「整備案の3Dモデル」が自動的に出来上がれば、関係者で出来上がりのイメージを共有し、社会的な合意形成を円滑に実現することが可能である。そこで、デザイナーは地図上に多数の建物境界線、即ち、建物ポリゴンを描くことになる。ここで、描く建物ポリゴンは、図1の左のオルソ画像上の建物境界線が示すように、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、Box形状を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。本研究では、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モデルを自動生成する手法を提案する。

2. 合意形成のための3次元都市モデルについて


噴火や異常気象による大災害対策、津波被災市街地の復興まちづくり、あるいは、今後の巨大地震対策のために、デザイナーや専門家は、可能な限り環境負荷を低減し、生態系ネットワークに配慮した安全地区への集団移転とする、例えば、「地区に隣接する丘陵地と一体的な整備」等の整備案の検討を地図上で行う。ここで、整備案を具体的な形にする「3次元都市モデル」(図1右)は、現実に出来るであろう「整備案」を分かりやすく周知し、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」となる。

防災・環境政策を推進する整備計画の構想段階から住民等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、「街区単位の整備案」の出来上が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3Dモデル」が重要となる。一般的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) それらにテキストチャマッピングを施す。

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、図1の3次元都市モデルを自動的に作るシステムが示すような、GIS(地理情報システム)

汎用 GIS (ArcGIS)	GIS Module (Python & VB)	CG Module (MaxScript)	
*電子地図の蓄積・管理 *建物境界線である建物ポリゴン *階数、建物タイプ、壁や屋根へのテキストチャマッピング用イメージコードなど3次元化のための「属性情報」(左下)	* ArcPy(ArcGIS)をインクルードしたPythonによる電子地図上の建物ポリゴンの頂点情報、属性情報の取得 *建物ポリゴンを長方形の集まりにまで分割・分離 *建物ポリゴンを正確な直角ポリゴンに整形	*建物部品を形成するため、適切なサイズの基本立体の生成 *窓やドア用に穴を空ける、部品を作成するためのブール演算 *部品を配置するために回転と移動 *自動テキストチャマッピング	



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

ム)とCGを統合化したシステムを提案した¹⁾²⁾³⁾。本システムでは、建物階数や建物のタイプ(寄せ棟屋根、切妻屋根、片流れ屋根等)などの「属性情報」を関連付けた電子地図上の建物ポリゴンに基づいて、3次元都市モデルを自動生成する。これまでの研究成果で、建物ポリゴンが「頂角がほぼ直角の直角ポリゴン」である場合、それらを四角形の集まりまで分割・分離して、これら四角形の上に、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。ところが、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、通常、電子地図上の建物ポリゴンは、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ることで、そのBox間に「隙間」や「重なり」が生じてしまう。本研究では、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モデルを自動生成する手法を提案する。

3. 既往の研究

「3次元都市モデル」は、防災まちづくりや環境共生型まちづくり、景観工学等のアカデミックな分野から公共事業の情報公開をはじめとして、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、「現状ある都市」の3次元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。3次元都市モデルは、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。しかし、地物のステレオ画像からCVの技術で地物の3次元形状を復元できる場合もあるが、地物の形状は複雑で多様性があり、また、オクルージョン、あるいは、詳しくサンプリングできないところがあること、CVのソフトウェアの能力不足等で、実用に耐えられるレベルでの完全自動復元は達成されていない。

Saedi⁴⁾らは、単眼の(monocular)衛星画像から、自動的に屋根面の形状を抽出することを試みた。衛星画像のセグメント化(共通する色合いに応じて塊にする)を行い、セグメントの境界線は、衛星画像より抽出された線セグメントにあわせる。これら境界線は屋根面の四角形の雛形となり、当てはまり点(probability score)が線セグメントと画像のイメージ勾配によって算出され、忠実度の目安としている。

このシステムやアプローチは、正確なサイズの基本立体(プリミティブ、直方体など)から成る建物の3次元モデルを提供する。但し、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3次元モデルである。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3次元モデルは、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、現状ある建物とはかけ離れていると評される⁵⁾。

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。Müller⁶⁾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⁸⁾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、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。屋根形態は多種多様に渡り、「長辺に垂直な頂線」となる屋根も存在する。

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長方形の集まりまで分割・分離して、各長方形上に任意の多種多様な建物形状を作成できる。屋根形態は多種多様であり、「長辺に垂直な頂線」となる屋根も存在する。筆者らはこれまでの研究で、電子地図上の直角建物ポリゴンを四角形の集まりまで分割・分離して、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、多種多様な屋根形状を自動生成する手法を提案した¹⁾²⁾³⁾。

4. 建物ポリゴン処理

(1) ポリゴンの表現と分割線

頂角が“ほぼ直角”の直角ポリゴンである建物ポリゴンを図2に示す。この建物ポリゴンの頂点を時計回りに辿ると、ポリゴンの辺は「直角に右に曲がるか(R-turn)」、「直角に左に曲がるか(L-turn)」のどちらかである。直角ポリゴンは、この辺の曲がる向き(RかL)で表現できる。これを「RL表現」とする。図2のポリゴンの場合、左端



図2 電子地図上の建物ポリゴン(上)とL頂点からの分割線(下)

の頂点から辿ると「RRLRLRLRLRRRLRLRLRLR」という RL 表現となる。この直角ポリゴンは、適切に分割線 (Dividing Line) を引くことによって、「長方形」の集まりに分割・分離することが可能である。Reflex 頂点 (内角が 180 度以上の頂点) である左に曲がる頂点「L 頂点」から分割線は 2 本引くことができる。図 2 下に建物ポリゴンの場合の分割線を示す。図のポリゴンでは L 頂点は 9 個あるので、18 本の分割線を引くことができる。この分割線の中から、次の 3 つの条件を満たす線を選び、分割処理を実行する。

- ① 四角形を切り取る。
- ② 分割線の長さが、枝屋根 (分割線で分割されて形成される) が伸びていく、主屋根の幅より短い。
- ③ 分割線の両端の頂点は他の分割線に共有されない。

RL 表現で、L 頂点間の連続する R 頂点の個数が 2 個以上で、R 頂点を挟む L 頂点からの分割線は四角形を切り取れる可能性がある。L 頂点で挟まれる R 頂点が 1 個の場合は 1 本の分割線で、四角形を切り取ることはできない。ある L 頂点を起点とする分割線が、それから連続する 2 個あるいは 3 個の R 頂点でその最後の R 頂点を起点とする辺と交わるような分割線は、条件①の四角形を切り取る分割線となりうるが、連続する 4 個以上の最後の R 頂点を起点とする辺と交差する分割線は四角形を切り取ることはできない。これは、四角形は、連続する 4 個の R 頂点から成り立つからである。

従って、本システムでは、連続する R 頂点の個数をカウントして、その数が 2 個、3 個、4 個、5 個以上の場合分けして、連続する R 頂点を挟む 2 個の L 頂点前後の辺の長さに応じて、分割線が条件に合うか合わないかで、分割処理を行うか行わないかを定める。条件②は、分割された四角形から伸びていく「枝屋根」が、枝屋根が伸びてくる主屋根より高くなると不自然となるため、枝屋根の高さを低くするための条件である。

図 3 は、建物ポリゴンで上記条件を満たす分割線による分割、ポリゴン整形処理を行っての屋根付き建物の 3D モデルの自動生成のプロセスを示す。図 4 では、他の形状の建物ポリゴンの分割処理、ポリゴン整形、3 次元建物モデルの自動生成の詳細なプロセスを示す。図 4 の

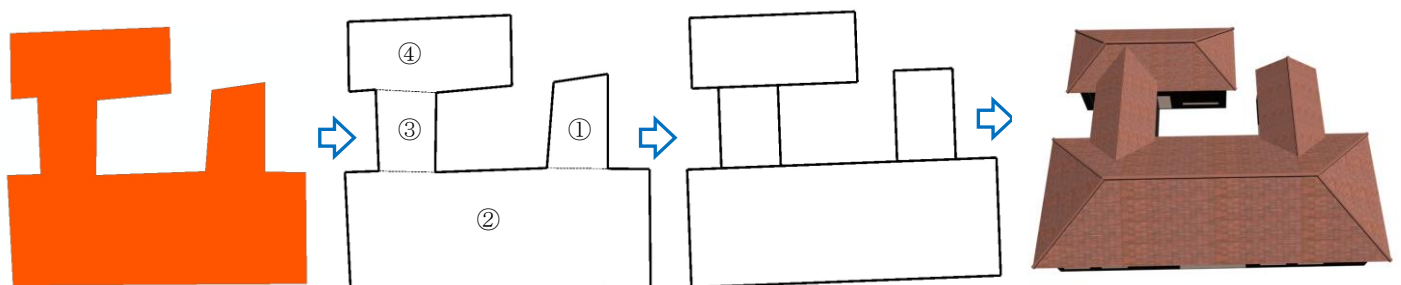
各分割プロセスの初期の段階で示す分割線は条件②を満たし、伸びていく主屋根の幅より短い分割線である。図 4 上段と中段のポリゴンは、RL 表現では同じ「RRLRLRRR」となるが、条件②を満たす分割線が異なるため、異なる分割処理が行われる。条件③は、図 4 の下段(2)の頂点 A から条件①②を満たす分割線が 2 本引けるが、2 本とも分割すると、不要な分割処理を行ってしまうため、L 頂点からの分割線は 1 本のみ分割処理させるための条件である。図 4 の詳細プロセスが示すように分割処理は、本体ポリゴンの頂点数が 4 になるまで行われ、四角形の集まりまでの分割処理完了後は、枝部が隣接四角形のサーチ、四角形の集まりを互いに直交する長方形の集まりとするポリゴン整形を行う。

(2) 枝屋根の形成

これまでの研究で開発したシステムでは、枝屋根を整形せずに形成してきた。本研究では、枝屋根を形成する際、枝屋根の方向を「主傾き (Main Angle)」か、それに垂直な方向に合わせるなど、整形するための手法を開発した。ここで、「主傾き」は、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。例えば、「45°~46°」というように、一定の刻み幅の傾きの範囲で、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。

図 3 (b)において、ポリゴンは「分割される順番」で「番号付け」された 4 つの四角形に分割される。ここで、四角形①と③は、それら四角形の上に、平面図上で、それら四角形とほぼ同じ形の屋根を形成すると、切れた独立した屋根となってしまふ。四角形①と③は、「枝屋根」として、どの辺をどこまで屋根として延長するかを計算して、図 3 (d)にあるように、切り取られた「主屋根」に伸ばす必要がある。

また、四角形に分割された図 3 (b)の前の段階で、枝屋根を伸ばすべき四角形①と③は、それらに隣接する四角形は不明である。例えば、四角形①を分割する段階で、「隣接する図形」は四角形に分割されておらず、何番の四角形であるか分からない。そこで、四角形①と③を、枝屋根を伸ばすべき隣接している四角形を探す「活性四角形」とする。「活性四角形」は、ポリゴンを四角形の集まりに分割した後に、隣接四角形は何番目の四角形で、その四角形のどの辺に「どのように接していたか(分割パターン)」



(a) 電子地図上の建物ポリゴン (b) ポリゴンの分割 (c) ポリゴンの整形 (d) 自動生成した 3D モデル

図 3 建物ポリゴンの分割・整形処理を行っての 3D モデルの自動生成

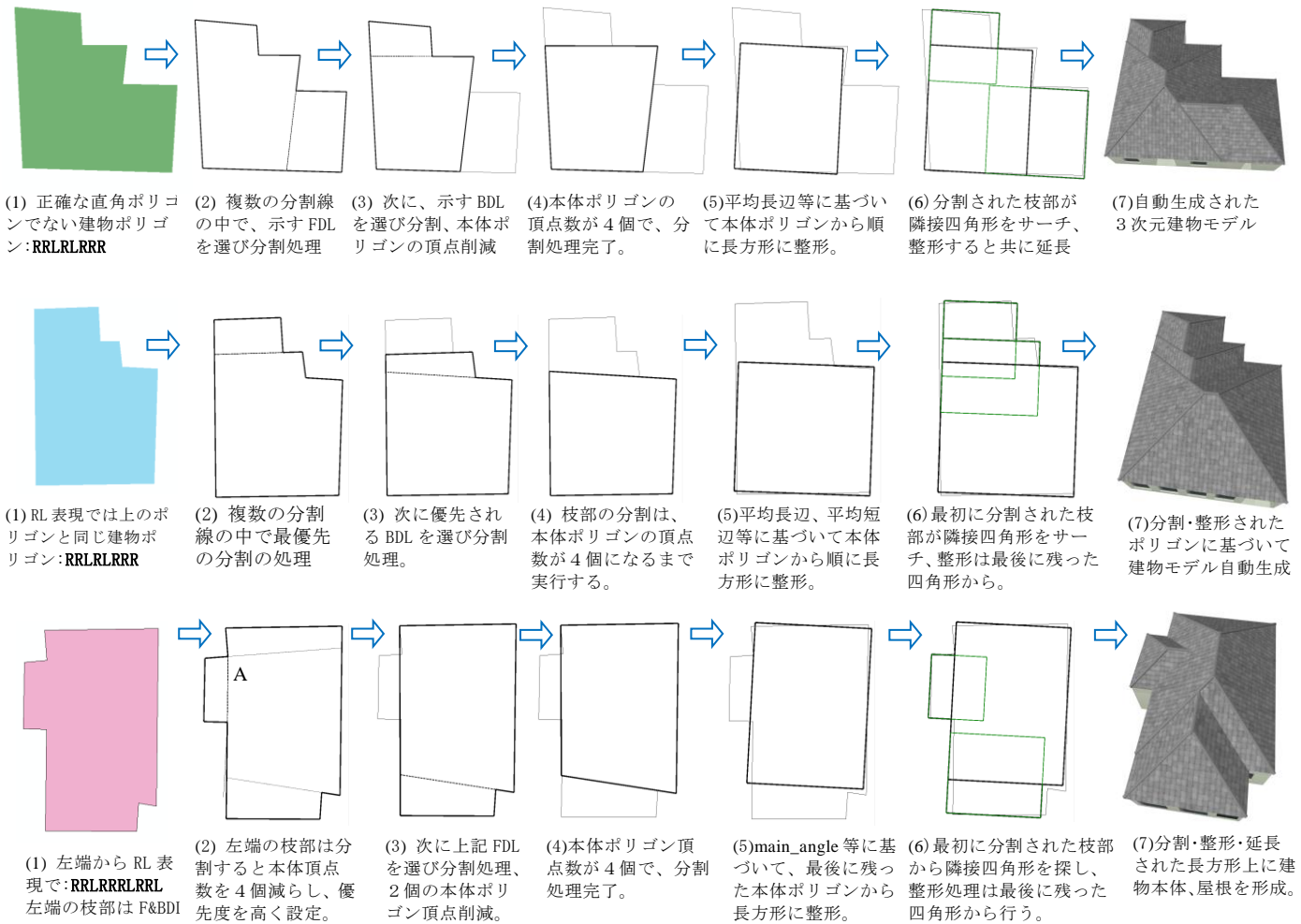


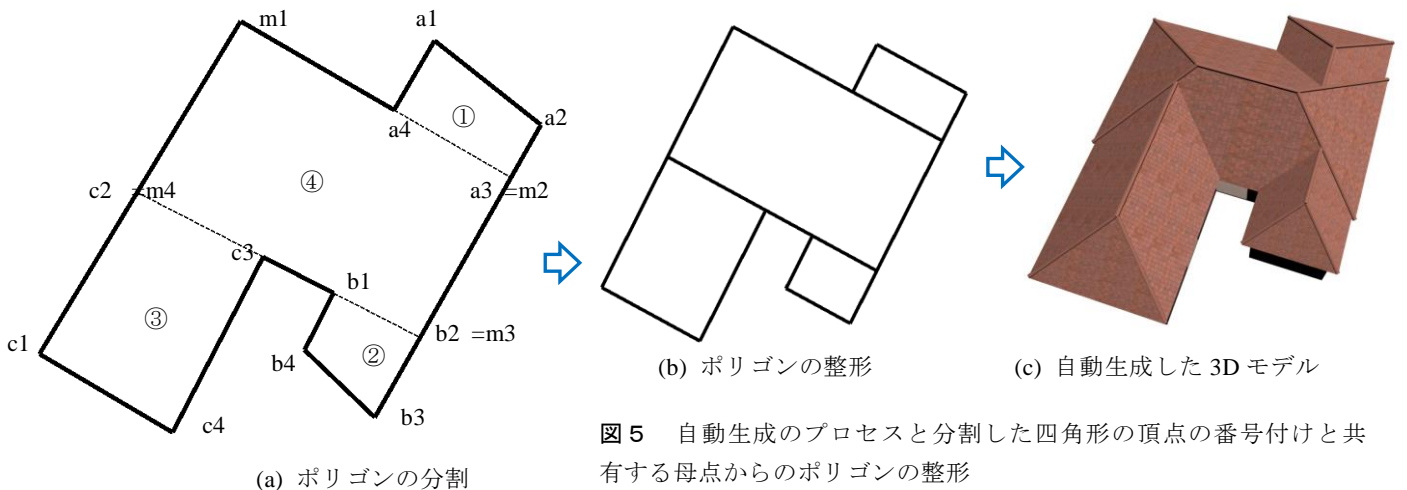
図4 ほぼ頂角が直角の建物ポリゴンの分割処理、ポリゴン整形、3次元建物モデルの自動生成の詳細なプロセス

を調べることにした。「分割パターン」によって、どの分割線とどの辺との交点を求めて、分割処理するかが決まる。この「分割パターン」を、四角形を分割する際、四角形に関連付ける。図4上段(2)、(3)において、各々、分割線は時計回り方向の分割線(Forward Dividing Line: FDL)、反時計回りの分割線(Backward Dividing Line: BDL)として異なる「分割パターン」とする。図4下段(2)の頂点Aを一端とする分割線は、両方向からの分割線(F&BDL)の「分割パターン」とする。

分割プロセスで、各分割線には優先度が与えられ、分割処理するとき、もっとも優先度が高い線が分割処理される。例えば、図4下段(2)において、左端の枝部は分割すると本体頂点数を4個減らし、それを切り取る分割線の優先度は高く設定され、同じく頂点Aを一端とする分割線より先に分割処理される。

(3) ポリゴン整形

活性四角形が、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」(これ



を母点：generatrix とする)を基準として、活性四角形の平均長辺と平均短辺、主傾きから、整形した四角形を形成する。図5(a)に示すように、まず、分割された四角形は、四角形の上側の長辺の始点を番号1(図5では、a1、m1など)とし、時計回りに、四角形の頂点を「番号付け」する。四角形①は活性四角形で、①の辺 a34(点 a3と点 a4を繋ぐ辺)上の点(Checkpoint)がどの四角形のどの辺の上にあるかを調べ、隣接する四角形をサーチする。どのように接するかは、分割する際に分割線の引き方で分かるので、その分割パターンを四角形①に蓄える。サーチの結果、四角形①の辺 a34が四角形④の辺 m12上にあることを突き止める。そして、四角形①と④の共通頂点である母点(a3=m2)を基準として、活性四角形の平均長辺(w_L)と平均短辺(w_S)、Main Angle(θ)から、整形した四角形を生成する。以下の式で、整形した四角形の頂点の位置を算出する。

$$\begin{aligned} a1.x &= m2.x - w_S \cdot \sin \theta - w_L \cdot \cos \theta \\ a1.y &= m2.y + w_S \cdot \cos \theta - w_L \cdot \sin \theta \\ a2.x &= m2.x - w_S \cdot \sin \theta : a2.y = m2.y + w_S \cdot \cos \theta \\ a4.x &= m2.x - w_L \cdot \cos \theta : a4.y = m2.y - w_L \cdot \sin \theta \end{aligned}$$

5. まとめ

3次元都市モデルは、様々な分野で利活用が期待される重要な「情報基盤」である。しかし、現状では、3次元モデリングするのに、多大な時間と労力をかけている。これまでの研究で、電子地図上の、建物階数や建物タイプなどの「属性情報」を関連付けた建物ポリゴンに基づいて、3次元建物モデルを自動生成する「GISとCGの統合化システム」を提案した。図6の本システムを手書きの電子地図に適用した事例では、ほぼ、現実に近い建物のモデルを作成している。本システムは、デザイナーが描く建物境界線に基づいて、「現実にはない」将来の街の3次元モデルを短時間で自動生成できる。事例の電子地図の場合、属性情報が入力されていれば、建物ポリゴンの前処理は、数秒で行われ、3Dモデルの自動生成は5分以内で行う(Core i5 マルチコアのPC使用)。本研究では、通常、手作業で描いている、頂角が“ほぼ直角の建物ポリゴン”を正確な直角ポリゴンに整形し、精緻な3次元

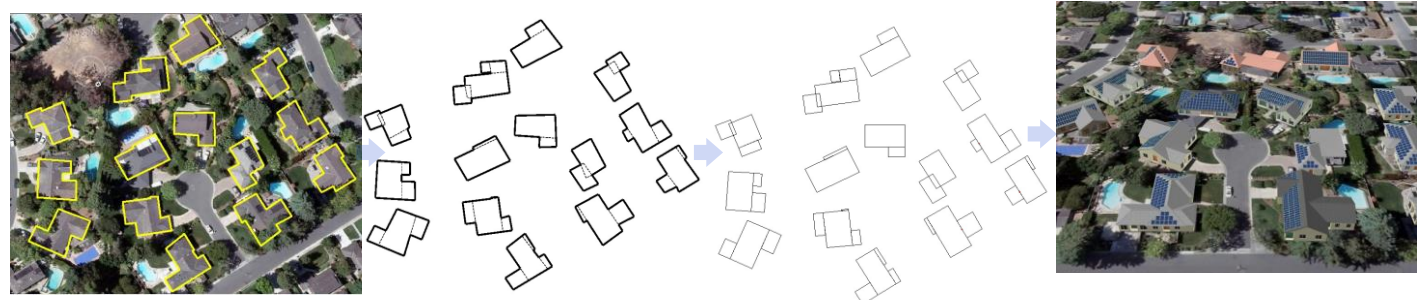
建物モデルを自動生成する手法の提案を行った。そのために、建物ポリゴンを分割した四角形の集まりで、隣り合う四角形間の隣接関係を明らかにし、次に建物ポリゴンを再構築する際、ポリゴンの主傾きと隣接四角形の共通頂点である母点」を基準として、直角ポリゴンに整形した。今後の課題として、隣接する四角形の建物タイプを取得し、主屋根が四角形の長辺に垂直な屋根頂線の切妻屋根のような場合、枝屋根を伸ばさないという判断をするシステムの開発、また、枝部が隣接する四角形にどうい形で接するか分かるので、窓やドア等を配置するとき、それらを枝部の隣接建物に交差しないように配置する等、矛盾しない形態の建物モデルを自動生成したい。

【参考文献】

- 1) 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
- 2) 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
- 3) Kenichi SUGIHARA: “Automatic Generation of 3D Building Models with Various Shapes of Roofs”, ACM SIGGRAPH ASIA 2009, Sketches, Visualization, 16-19 DEC, 2009. DOI: 10.1145/1667146.1667181
- 4) Parvaneh Saeedi and Harold Zwick: ‘Automatic building detection in aerial and satellite images’, International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision - ICARCV, pp. 623-629, 2008, DOI: 10.1109/ICARCV.2008.4795590
- 5) Zlatanova, S., and Heuvel Van Den, F.A. (2002). “Knowledge-based automatic 3D line extraction from close range images”, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 34, 233 - 238.
- 6) Müller, P., Wonka, P., Haegler, S., Ulmer, A., and Van Gool, L.: ‘Procedural modeling of buildings’, ACM Transactions on Graphics, 25, 3, 614-623 (2006)
- 7) Tom Kelly, Peter Wonka, 2011 “Interactive Architectural Modeling with Procedural Extrusions”, ACM Transactions on Graphics.
- 8) Aichholzer, O., Aurenhammer, F., Alberts, D., and Gärtner, B.: ‘A novel type of skeleton for polygons’, Journal of Universal Computer Science, 1 (12): 752-761 (1995).

*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)



(a)電子地図上の建物ポリゴン

(b)建物ポリゴンの分割・分離

(c)ポリゴン整形

(d)自動生成された3次元都市モデル

図6 本システムの適用事例：建物ポリゴンの分割・分離とポリゴン整形を行っての3次元都市モデルの自動生成
論文R01

Automatic Generation of 3D Building Models by Rectification of Building Polygons on Digital Map

○Kenichi SUGIHARA*¹

Zhenjiang SHEN*²

Keywords: 3D city model, automatic generation, GIS (Geographic Information System), 3D building model, Building Polygon, Rectification

A 3D city model is important in urban planning and gaming industries. Urban planners may draw the maps for sustainable development. 3D city models based on these maps are quite effective in understanding what if this alternative plan is realized. However, enormous time and labor has to be consumed to create these 3D models, using 3D modelling software such as 3ds Max or SketchUp. In order to automate laborious steps, we proposed a GIS (Geographic Information System) and CG integrated system for automatically generating 3D building models, based on building polygons or building footprints on a digital map.

A complicated orthogonal polygon can be partitioned into a set of rectangles. The proposed integrated system partitions orthogonal building polygons into a set of rectangles and places rectangular roofs and box-shaped building bodies on these rectangles. In order to partition an orthogonal polygon, we also proposed a useful polygon expression (RL expression: edges' Right & Left turns expression) and a partitioning scheme for deciding from which vertex a dividing line (DL) is drawn.

Since technicians, at map production companies, are drawing building polygons manually with digitizers, depending on aerial photos or satellite imagery, not all building polygons are precisely orthogonal. When placing a set of boxes as building bodies for forming the buildings, there may be gaps or overlaps between these boxes if building polygons are not strictly orthogonal. Our contribution is the new methodology for rectifying and orthogonalizing the shape of building polygons and constructing 3D building models without any gap and overlap. At the time when one rectangle is divided as a branch rectangle, it is impossible for this rectangle to know which rectangle is adjacent to and which edge of the rectangle is adjacent to. It is not until the whole rectangles of a building polygon are divided that the rectangle knows which rectangle is adjacent to. After polygon partitioning into a set of rectangles, the branch rectangle, defined as active rectangles, will start to search for an adjacent rectangle. Although some branch rectangle has two adjacent rectangles, when this rectangle is divided, it is possible for the rectangle's edge to save the information about the adjacent rectangle and adjacent edge, dividing pattern.

Branch rectangles (active rectangles) will search for an adjacent rectangle, and will rectify their shape according to the orthogonality. After rectification, divided precise rectangles become orthogonal to each other. In our proposal, after approximately orthogonal building polygons are partitioned and rectified into a set of mutually orthogonal rectangles, each rectangle knows which rectangle is adjacent to and which edge of the rectangle is adjacent to, which will automatically create precise 3D building models with building bodies mutually orthogonal to each other.

*1 Professor, School of Management, Gifu Keizai University

*2 Professor, School of Environment, Kanazawa University