

L字型ポリゴンの分割・整形によるL字型屋根を持つ 3次元建物モデルの自動生成

Automatic Generation of 3D Building Models with L-shaped Roof by L-shaped Polygon Partitioning and Rectification

○杉原 健一*¹、沈 振江*²、村瀬 孝宏*³
Kenichi Sugihara *¹, Zhenjiang Shen *² and Takahiro Murase *³

*1 岐阜協立大学情報メディア学科 教授 博士 (工学)

Professor, Gifu Kyoritsu University, Information Media, Dr. Eng.

*2 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 教授 博士 (工学)

Professor, Kanazawa University, Faculty of Geosciences and civil Engineering, Ph.D.

*3 中京学院大学 短期大学部 教授

Professor, ChukyoGakuin University

Summary: Based on building footprints (building polygons) on a digital map, we have proposed the GIS and CG integrated system which partitions an approximately orthogonal building polygon into a set of quadrilaterals ('quads' for short) and rectifies them, placing rectangular roofs and box-shaped building bodies on these rectified quads (rectangles). Our contribution is the new methodology for automatic generation of 3D building model with L-shaped roof by L-shaped polygon partitioning and rectification. We set dividing criteria for partitioning a polygon into a set of quads. However, some branches do not meet the criteria. In this case, we use L-shaped polygon partitioning. For polygon shape rectification, the vertices labelling of partitioned quads and L-shape is used for each quad to know which quad or L-shape is adjacent to and which edge of the quad is adjacent to, which prevents unwanted intersection of windows and doors when building bodies are combined. A L-shape has two end vertices that will look for an 'adjacent quad'. After finding an adjacent rectified quad, L-shape will be rectified, resulting in a L-shaped roof and room.

キーワード: 自動生成; 3次元建物モデル; ポリゴン分割; 建物境界線; L字型ポリゴン; 3次元CG

Keywords: Automatic generation; 3D building model; polygon partition; building footprint; L-shaped polygon; 3DCG.

1. はじめに

街並みの3Dモデル(図1右)は、脱炭素社会を目指す持続循環型のまちづくりや高台への集団移転などの防災まちづくりにおいて、出来上がりのイメージを共有し、合意形成をはかるために利活用が期待される重要な情報インフラである。これまでの研究^{1)~3)}で、電子地図上の頂角がほぼ直角の建物境界線(直角建物ポリゴン)を四角形の集まりまで分割し、四角形の集まりを「互いに直交する長方形の集まり」まで「整形」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。

本手法において、建物ポリゴン(建物境界線)を四角形の集まりまで分割する過程で、分割処理の候補となる複数ある分割線の中で「システムが定めた分割条件」を満たす最適な線を選び、分割処理を実行する⁴⁾。これまでの研究では、分割線が「分割条件」を満たさないようなポリゴン形状に対して、分割処理が停止しないよう

に四角形が重なることを認めて、四角形を分離していた。しかし、本研究では、建物内部もモデリング、また、力学的に安定した3Dモデルの構築を目指しており、この「重複」は、重複する四角形上の屋根が部屋に突き出してくる、また、重複するところがあると、力学的に不安定となってしまう、というような問題が生じてしまう。そのため、その部分(枝部)を「L字型ポリゴン」として「L字形」を切り出すこととした。

この「L字型ポリゴンで分割する手法」によって、直角建物ポリゴン形状に対して重複のない分割が行われ、「四角形とL字型ポリゴンの集まり」まで分割することができる。本研究の建物の3Dモデルは、リモートセンシングやProcedural modelingで得られる表面モデル(Surface model)と異なり、3Dモデルの各部材は中身の詰まったCSG(Constructive Solid Geometry)のモデルであり、力学や熱伝導・熱流体解析等のエンジニアリング・シミュレーションに使える。

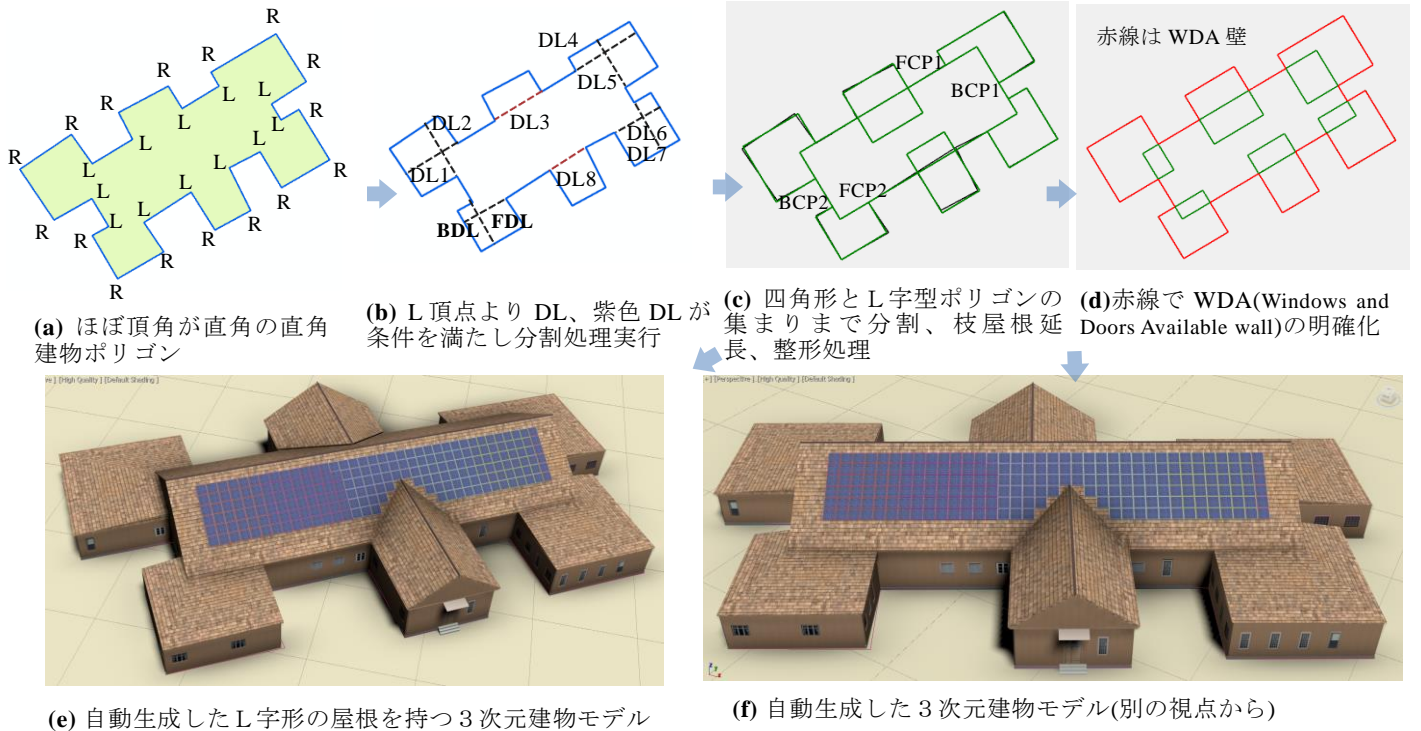


図2 建物ポリゴンを四角形とL字型ポリゴンまで分割、枝屋根延長、整形しての3次元建物モデル自動生成

より高くないための条件である。本システムは以下のように枝部を見つけ、分割する。まず、RL表現で、L頂点間の「連続するR頂点の個数(=nr)」を数える。nr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。これは、四角形は「連続する4個のR頂点」から成り立ち、1本の分割線で分割四角形の方に「R頂点が1つか2つ発生」し、少なくとも残り2つのR頂点が必要であるからである。

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個以上と場合分けして、連続するR頂点を挟む2つの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。

図2において、L頂点から分割処理の候補となる分割線(DL)が引けるが、3つの条件を満たすDLは、「DL3」と「DL8」である。残りのDLは条件②を満たさない。そこで、これまでの研究では、3個の連続するR頂点で、L頂点前後の辺の長さに応じて、四角形が重なるとを認めて、分割処理が停止しないように「連続3R頂点」を四角形として分離していた。しかし、本研究では、建物内部もモデリング、また、力学的に安定した3Dモデルの構築を目指しており、この「重複」は、(1) 建物の内部、即ち、部屋に重複する四角形の上の屋根などが突き出してくる。(2) 3Dモデルで重複するところがあると、力学的に不安定になってしまう。というような問題が生じてしまうため、「L字形」を分割することとした。

この「L字型ポリゴン」は整形するために、これまでの研究³⁾で提案した「活性四角形」と同様に、整形され

た隣接四角形を探し、それに基づいて、整形処理を行う。しかし、「L字形」は「活性四角形」とは異なり、隣接四角形が1つだけとは限らない。図4に示すように、「L字形」の隣接四角形に接する「両端の点」は2点(FCP&BCP)あり、隣接四角形が1つになるとは限らない。ここで、「連続3R頂点」を挟むL頂点となる「L字型ポリゴンの両端の点」を時計回りの順に「FCP(Forward Cut Point)」と「BCP(Backward Cut Point)」とする。このForwardとBackwardの意味は、本システムではポリゴンの頂点を「時計回りに番号付け」するが、分割線(DL)は、L頂点から「時計回り(Forward)」か「反時計回り(Backward)」の方向に引くという意味である。時計回りの分割線を「FDL(Forward DL)」、反時計回りの分割線を「BDL(Backward DL)」とする(図2(b)参照)。図2(b)に示すDL3とDL8は、両側からDLが引かれると考えて、「F&BDL(Forward&Backward DL)」とする。

4. 建物の3Dモデルの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を図1に、建物の3Dモデルの自動生成のプロセスを図2に示す。建物の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、市販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 : Right Turn & Left Turn)、各頂点の内角を算出する。

(2) 内角がほぼ 180 度の頂点をフィルタリング (除去) する (プログラムに与える数値でフィルタリングの閾値を設定)。

(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)」を算出する。

(4) 建物の基礎やフェンスを生成するために、元建物ポリゴンを数十センチ程度拡大 (プログラムに与える数値で自由に設定) した拡大ポリゴンを生成する。

(5) セットフォワードした拡大ポリゴンの各辺の長さを算出する。

(6) RL 表現で、L 頂点 (Left Turn) 間の連続する R 頂点 (Right Turn) の個数をカウントする。

(7) 「連続する R 頂点の個数」に応じて、枝屋根を大きく分類し、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、優先度を決め、分割処理を行う。

(8) 分割された四角形と L 字形について、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 (Active Quad)」かどうかの判断を行い、「主傾き」に対する分割四角形の傾きに応じて反転 (Flip) するかの判定を行う。

(9) 「活性四角形」と「L 字型ポリゴン」は隣接四角形、次に、その四角形のどの辺に接しているかをサーチする。

(10) 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、四角形を整形する。

(11) 枝部はそれを切り取るとき、主ポリゴンの辺に切り取った「切り跡 (trace)」を残す。本システムはこの痕跡を分類、ソートして、窓やドアを設置できる壁、即ち、WDA (Windows and Doors Available wall) 壁を明らかにする (図 2 (d) 参照)。

(12) 整形した四角形に関連付ける属性情報 (屋根タイプ、長辺や短辺の長さ、傾き、頂点座標、四角形の中心座標など) を CG モジュールへ出力する。

図 1 に示すように、GIS モジュールで前処理したこれらデータを、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 D 建物モデルを自動生成する。

(1) GIS モジュールからの整形した四角形に基づいて、屋根や壁、窓、ドアなどの建物の部品となる、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) これらの基本立体の間で、壁板に窓やドア用に穴を

空ける、または、寄せ棟屋根用の台形形状の屋根板を作成するために基本立体間でブール演算を行う (CSG : Constructive Solid Geometry)。特に種類の多い「枝屋根」についてブール演算用の板を多種類作成する。

(3) 電子地図上の建物ポリゴン上に建物の 3 D モデルを構築するため、分割四角形ごとに、主屋根や枝屋根を構築し、建物全体を組み上げる。このとき建物の構成部材で「親子関係」を考え、適切に配置するための位置出しに最も便利な部材を「親」と設定する。例えば、「寄せ棟屋根」は、図 4 (e) に示すように、台形形状と三角形形状の屋根板、屋根頂線である「主棟」とそこから軒先に向けて降りてくる「隅棟」を組み合わせ、屋根を組み上げるが、「主棟」を「親」として設定する。分割四角形単位で、主屋根や枝屋根の部材を組み上げ、それぞれ構築するのは、座標軸の原点近傍である。そこで、寄せ棟屋根の「主棟」の中心を原点、中心軸を x 座標に合わせる。その他の部材は主棟に対して正しい位置になるように水平方向と垂直方向に回転、移動、配置し、寄せ棟屋根を構築する。「主棟」の中心と傾きを分割整形四角形の中心と傾きに一致するよう移動・回転させれば、「子」である部材は「親」との相対的な姿勢や位置を保ったまま、「寄せ棟屋根」を地図上の建物ポリゴンの上に正しく配置できる。

(4) GIS モジュールからの建物ポリゴンを分割、整形してできた分割四角形の中心や傾きのデータに基づいて、分割四角形単位の屋根の「親」となる部材を「水平方向」に回転・移動し、正しい位置にそれらを配置する。「親」の「垂直方向」の位置は、各屋根を構築するために描いた手書きの「平面図、立面図」と建物ポリゴンに関連付けられている「属性情報」 (図 1 左) に基づき MaxScript 内の「データテーブル」内の「屋根勾配」などの値を選んで、それらを各屋根を自動生成するサブルーチンにパラメータとして与え、屋根を自動生成する。

(5) 壁に設置する窓やドアについても、同様に、「データテーブル」にある「窓やサッシの幅、高さ」、「窓やサッシの垂直方向の位置」、「基準となる窓間隔」などの値を選んで、窓やドアの位置を基準間隔から算出し、窓やドアのある壁を構築するサブルーチンにそれらをパラメータとして与え、親子の部材で構成する「窓やドアが設置された壁」を自動生成する。

(6) 構成する各部材には、属性情報で決まるイメージコードに基づいて、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。

5. 「L 字形」屋根となる「L 字型立体」について

本システムでは、L 字型ポリゴンも「構造体」として定義しており、分かりやすくするために唯一の Reflex

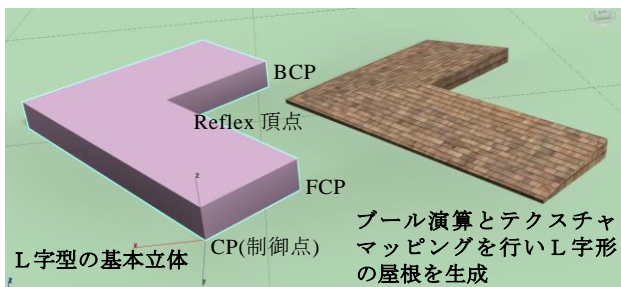


図3 3DCGにおけるL字型の基本立体とプール演算とテクスチャマッピングを行いL字形の屋根を生成

頂点を頂点1として時計回りに頂点をラベリング（番号付け）する「頂点メンバー」とL字型ポリゴンを囲む最小の「バウンディング四角形」(Minimum-area bounding quadrilateral、これを「境界四角形」とする)を想定し、「境界四角形」のラベリングと同様なL字型ポリゴンの頂点番号付けも「頂点メンバー」として用意し、L字型ポリゴンの整形を行う。ここで、「四角形」のラベリングは四角形の右に向かう最長辺の始点を頂点1とするラベリングである。図3に示す「L字型立体」は3ds Maxでは、「L字型の基本立体(Extruded L-shaped object: L-Ext)」として、生成することができる。同オブジェクトのパラメータに値を与え、屋根形状にするためのプール演算とテクスチャマッピングを行い、L字型を適切に配置するためにCP(オブジェクトの位置や方向を決める制御点)の位置を整形された隣接四角形より算出し、回転させることで、L字形の屋根を生成する。

6. L字型ポリゴンの整形処理

下の図4のL字型ポリゴンの整形処理が示すように、本システムは、最初に、「FCP(Forward Cut Point)」と「BCP(Backward Cut Point)」がどの四角形のどの辺にあるかを探索し出した後、それらの点の位置を整形された四角形の辺上に求める。L字型ポリゴン整形の元になるFCP&BCPの2点の位置は、探索され整形された長方形の辺を内分する形で求められる(内分比は探索時に求める)。次にL字型ポリゴンを囲む「境界四角形」で、唯一隣接四角形の内部にある点(内包点)を、FCPとBCPを繋ぐ線分(「FCP-BCP線分」)より求める。「FCP-BCP線分」の長さと同様に、次に、FCPとjaf(FCPの次の頂点)の傾きを求め、その傾きと「FCP-BCP線分」の傾きとの差を出して、「内包点」の位置を求める。次に、「境界四角形」の頂点の「ラベリング(番号付け)」を行い、この「内包点」は「境界四角形」のどの点かを調べる。どの頂点かがわかれば、残りの3頂点の位置も決まる。L字型ポリゴンの唯一のReflex頂点は「内包点」の「FCP-BCP線分」について線対称の位置として求められる(図4(b)参照)。これで6頂点を持つL字型ポリゴンは整形されることになる。図4では、L字形の端点の探索で異なる分割四角形に存在する場合の3次元建物モデル自動生成のプロセスを示す。

7. 本システムの適用事例とまとめ

図5に本システムの適用事例を示す。図5(a)では、

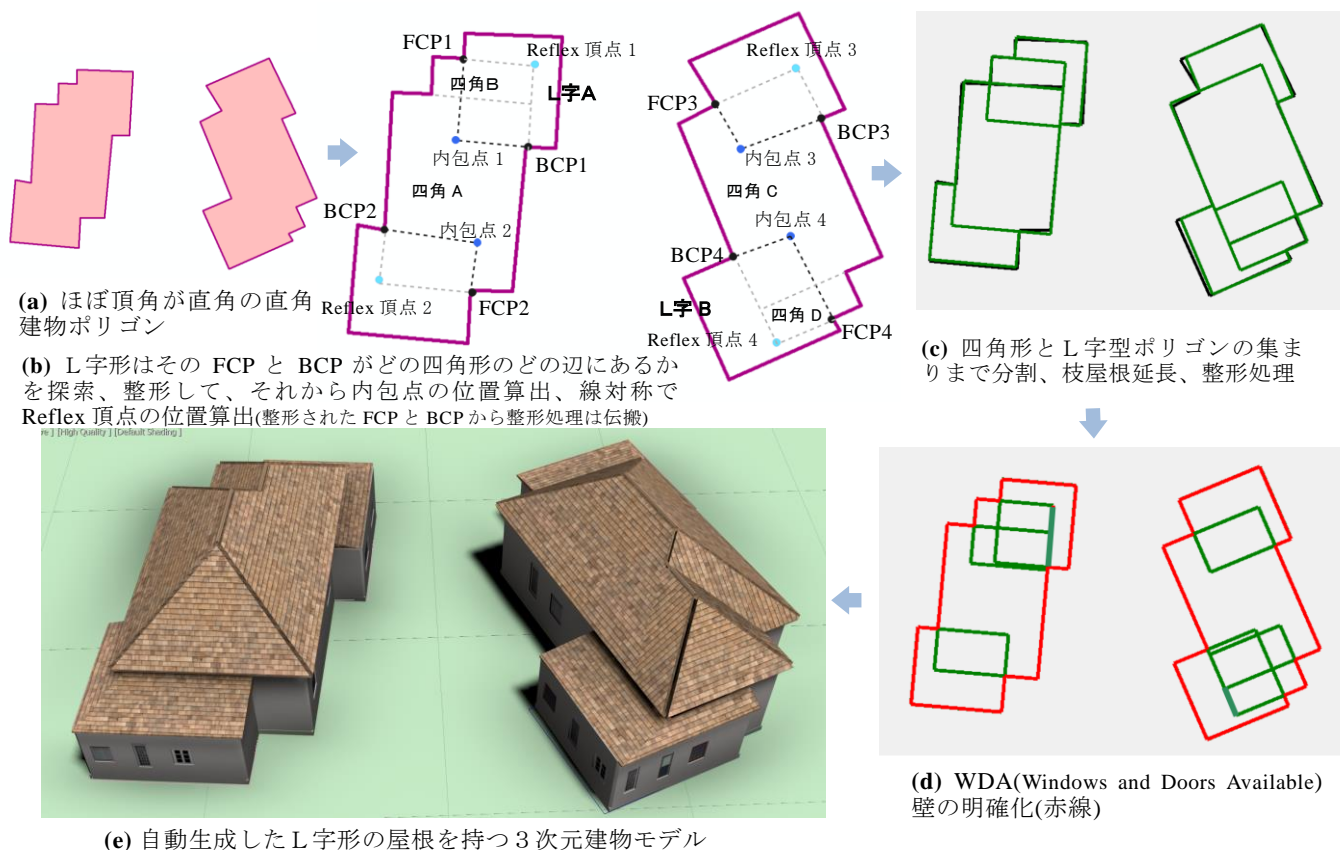


図4 L字形の端点(FCPとBCP)の探索で異なる分割四角形に存在する場合の3次元建物モデル自動生成

3次元建物モデルの元になるほぼ頂角が直角の建物境界線を示し、図5(b)では、建物境界線を四角形とL字型ポリゴンの集まりまで分割し、枝屋根の延長、整形処理を示す。ここで、必ずしも全ての枝屋根が延長しているとは限らない。これは、例えば、切妻屋根の「妻側」に接する枝屋根は延長してしまうと、切妻屋根の下の部屋に突き出してしまうからである。本システムでは、枝屋根は活性四角形として、隣接四角形を探し、どの四角形のどの辺にどのように接するかの隣接情報を取得し、もし、隣接四角形が「切妻屋根」で、隣接辺が「妻側」の辺だとすると、「延長しない切妻屋根」をその枝部に対して生成する。また、本システムはドアも、枝部の四角形において活性辺に相対する辺を「妻側」の辺として検出し、その「妻側の辺」にドアを設置する。

この「L字型ポリゴン」を切り出す手法によって、直角建物ポリゴンを重複のない「四角形とL字型ポリゴンの集まり」まで分割できる。本研究の建物の3Dモデルは、リモートセンシングや手続き型モデリングで得られる表面モデルと異なり、3Dモデルの各部材は中身の詰まったモデルであり、3次元の建物モデルを中心とするBIMとのデータのやりとりが可能である。また、力学や熱伝導・熱流体解析等のエンジニアリング・シミュレーションにも使用可能である。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費の研究課題番号：19K04750 と 20K03138、21K04405 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) 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.
- 2) 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, p.167-174, 2016.
- 3) 杉原健一、沈 振江: 四角形の方向性を考慮したポリゴン分割・整形による建物の自動生成、日本建築学会 第41回情報・システム・利用・技術 シンポジウム 査読付き, DVD-ROM 収録 6 page, 2018.12.6.
- 4) O'Rourke Joseph, Tewari Geetika: The structure of optimal partitions of orthogonal polygons into fat rectangles, Elsevier, Computational Geometry: Theory and Applications, Volume 28, Issue 1, pp 49-71, 2004.
- 5) Durocher Stephane, Mehrabi Saeed: Computing conforming partitions of orthogonal polygons with minimum stabbing number, Theoretical Computer Science Volume 689, Pages 157-168, 15 August 2017.
- 6) Antonio Leslie Bajuelos, Ana Paula Tom and Fabio Marques: Partitioning Orthogonal Polygons by Extension of All Edges Incident to Reflex Vertices: Computational Science and Its Applications-ICCSA, pp 127-136, 2004.

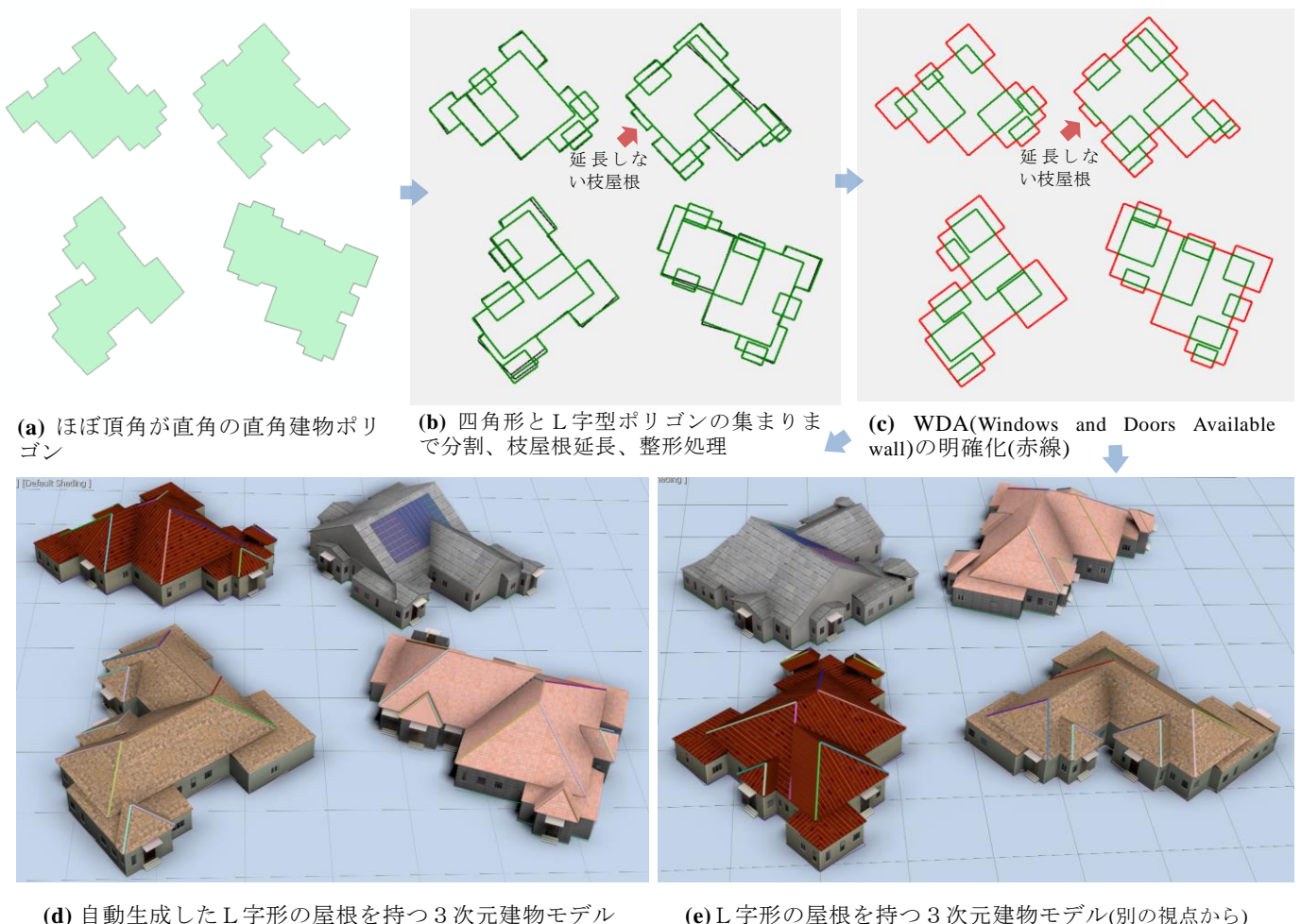


図5 主に連続3R頂点となるL字形を分割して、L字形の屋根を持つ3次元建物モデル自動生成