

L字型ポリゴンのラベリング、探索を行っての建物ポリゴン分割による 3次元建物モデルの自動生成

杉原 健一*・沈 振江**・村瀬 孝宏***

Automatic Generation of 3D Building Models by Polygon Partitioning through L-shaped Polygon Labeling and Search

Kenichi Sugihara *, Zhenjiang Shen **, Takahiro Murase ***

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). 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.

Keywords: 自動生成 (automatic generation), 3次元建物モデル (3D building mode), ポリゴン分割 (polygon partition), 建物境界線 (building footprint), L字形ポリゴン (L-shaped Polygon)

1. はじめに

現実都市のデジタルレプリカである「スマートシティ Digital Twin」プロジェクトが今注目されている。「Digital Twin」を実現するためには建物の内部を含めた3Dモデルを設計から施工、維持管理に至るまで利活用する「BIM」が必要不可欠である。そのために建物の細部まで忠実に再現した「詳細な BIM 用の建物の3Dモデル」を効率よく作成する必要がある。

しかし、現状では、3Dモデルを作成するには多大の労力をかけ、部材のモデリングを行い、数多い部材を配置している。そこで、「電子地図上の建物境界線に基づいて建物の3Dモデルを自動生成するシステム(図-1)」を発展させ、スマートシティのための「建物内部を含めた詳細な BIM 用の3次元建物モデルの自動生成」を目指す。これまでの研究(2012, 2016)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。

本手法では、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が、その分割時に「分割された四角形(分割四角形)」が外部のどの四角形のどの辺に、どのように接していたかの「隣接情報」を取得し、それから、「分割四角形」の傾きを計測し、分割四角形に保存する。本システムは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。この「傾きや隣接情報の取得」は、分割処理時の分割四角形の頂点の「ラベリング(番号付け)」を通して行われる(2018)。

本システムでは、この建物ポリゴンの分割処理時に、「システムが定めた分割条件」を満たす分割線について、分割処理を実行する。これまで分割線が「分割条件」を満たさないようなポリゴン形状に対して、その部分(枝部)を四角形で分離していたが、本研究では、「L字形ポリゴン」として分割する。この

* 会員 岐阜協立大学 経営学部 (Gifu Kyoritsu University) 〒503-8550 岐阜県大垣市北方町5ノ50 岐阜協立大学 E-mail : mjsbp812@yahoo.co.jp

** 非会員 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 (Kanazawa University) shenzhe@t.kanazawa-u.ac.jp

*** 会員 中京学院大学 短期大学部 (Chukyo Gakuin University) murase@chukyogakuin-u.ac.jp

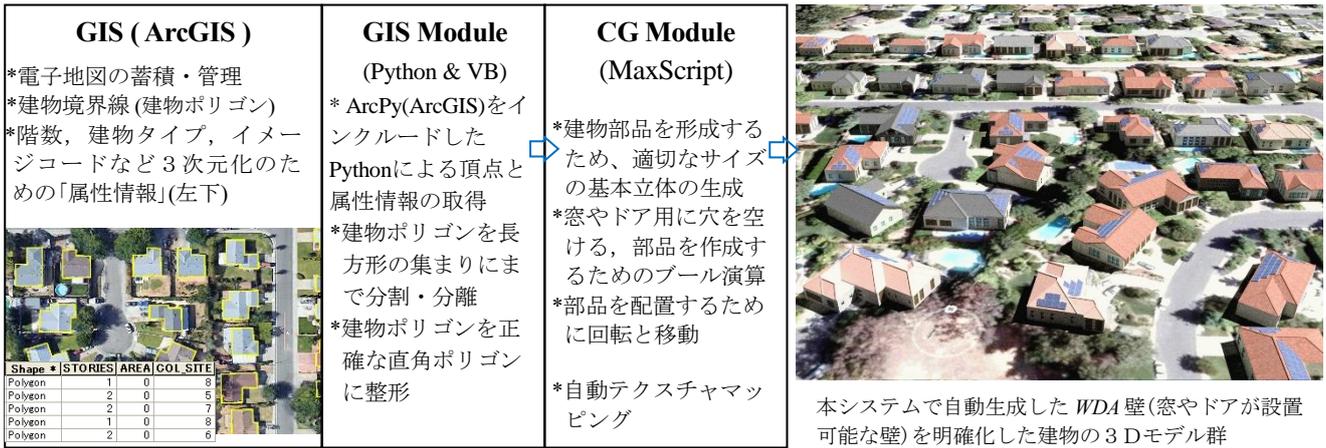


図-1 3次元建物モデルの自動生成システムの構成と自動生成のプロセス

「L字形ポリゴンで分割する手法」によって, どのような形状の直角建物ポリゴンでも「四角形とL字形ポリゴンの集まり」まで分割することができる. L字形ポリゴンは「整形された主ポリゴン」に基づいて, 整形処理される. L字形ポリゴンは隣接四角形を探し, そのIDや属性情報, 隣接四角形のどの辺に隣接しているかなどの「隣接情報」を取得し, 整形処理し, L字形の屋根を形成する.

2. 既往の研究

「3次元都市モデル(図-1右)」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.

Saeedi (2008)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, 忠実度の目安とする.

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(2002). 本研究で目指す, 自動生成する3次元建物モデルは, 窓やBIMモデルに必要な建物内部空間, 屋根下構造物といった建物の詳細を持つ.

3. L字形ポリゴン分割による3Dモデルの自動生成のプロセス

図-2では, ほぼ頂角が直角の直角建物ポリゴンを「四角形とL字形ポリゴンの集まり」になるまで分割し, それらを互いに直交する「長方形と整形されたL字形の集まり」になるまで整形, 枝屋根延長を行い, 各長方形とL字形に個々に壁と屋根を配置して, 3次元建物モデルを自動生成するプロセスを示

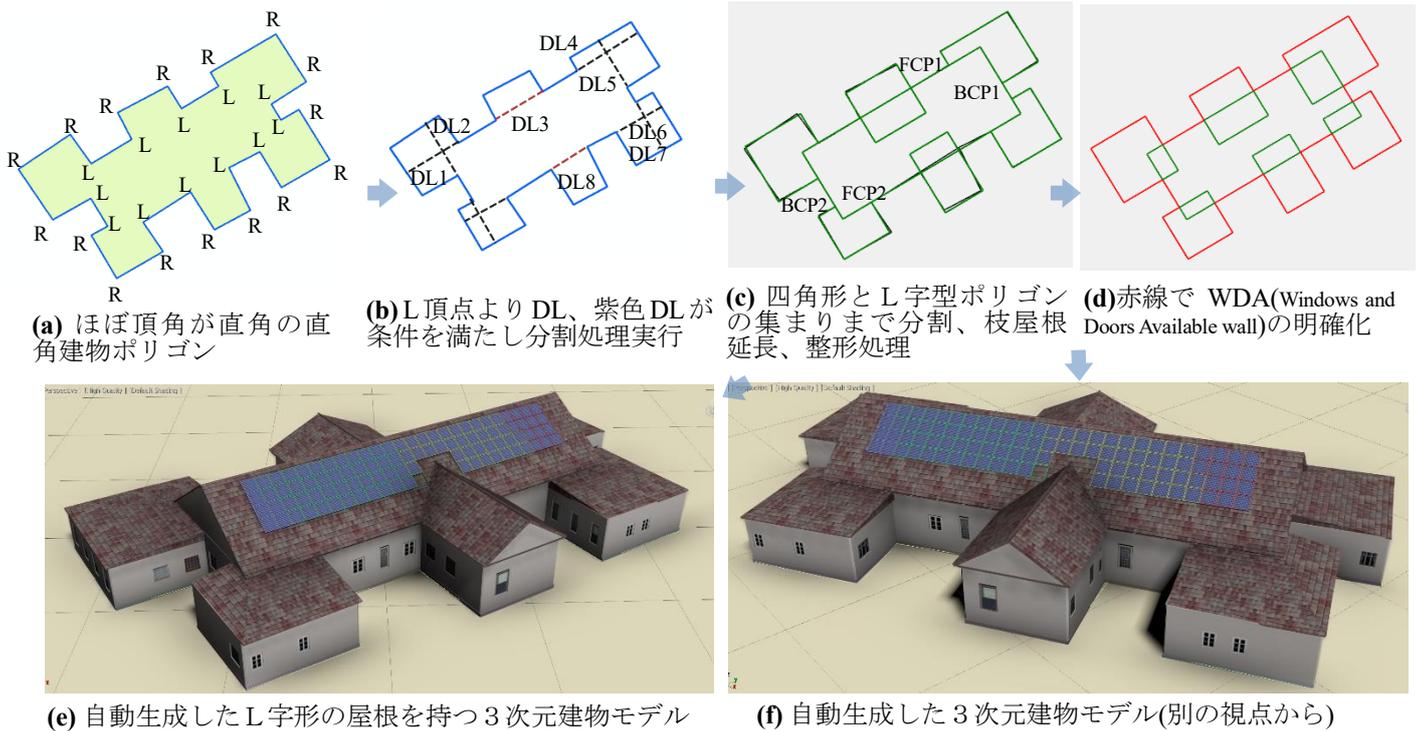


図-2 建物ポリゴンを四角形とL字形ポリゴンまで分割、枝屋根延長、整形しての3次元建物モデル自動生成

す。この直角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」とした(2012)。

図-2のポリゴンの場合、28頂点の最左端の頂点から辿ると「RLLRLLRRLLRRLLRLLRLLR」というRL表現となる。この直角ポリゴンは、左に曲がる頂点「L頂点」から適切に分割線(Dividing Line : DL)を引くことによって、「四角形とL字形」の集まりに分割することができる。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。複数の分割線の中から、次の3つの条件(「分割実行条件」とする)を満たす線を選び、分割処理を実行する。

- ① 1つの四角形を切り取る。
- ② 分割線の長さが切り取られる四角形の反対側のポリゴン辺までの最短距離より短い。
- ③ L頂点からは優先度の高い1本の分割線だけに決め分割処理を実行する。

ここで、条件①と③は、ポリゴンの「一本枝」の細

いところをDLで一つずつ分割していき、ポリゴンを「四角形の集まり」に分割するための条件である。条件②は、枝屋根の幅が主屋根より太くなり、枝屋根の方が主屋根より高くないための条件である。本システムは次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(nr)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。

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を満たせない。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、四角形が重なることを認めて、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、今回の研究では、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「分離」は「重複」を生み、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、力学的に不安定となってしまう。というような問題が生じてしまうため、「L字形」を切り出すこととした。

この「L字形ポリゴン」は整形するために、これまでの研究で提案した「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(図-4参照)。ここで、「連続3R頂点」を挟むL頂点となる「L字形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。ここで、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. 3次元建物モデル自動生成の手順

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(nr)をカウントする。
- (7) 「連続するR頂点の個数(nr)」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(2018)。
- (9) 「活性四角形」と「L字形ポリゴン」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(3DCG)である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を行い, 3D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分割四角形に基づいて, 屋根や壁, 窓, ドアなどの建物の部材となる, 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, それから, 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) 建物の各部材を正しい位置に配置するには, 独立した屋根が配置される分割四角形単位, 即ち, 独立した屋根とその下の部屋の単位で, 建物を構成する部材を配置していく. 3DCGで, 分割四角形の中心または四角形の上辺か下辺の中心が座標の原点となるようにローカル座標を設定する. 例えば, 「寄せ棟屋根」の生成では, 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」を組み合わせて, 寄せ棟屋根を組み上げるが, ローカル座標を前述のように設定すると(この場合, 原点は分割四角形の中心), 寄せ棟屋根の2枚の台形形状の屋根板はローカル座標のX座標に対して上下対称となっていて, 上側の屋根板の制御点(CP)の位置が算出できれば, 下側の屋根板の制御点は容易に算出できる.

電子地図上の建物境界線に各部材を組み立て, 3次元建物モデルを生成するには, 建物境界線を分割・整形してできる分割四角形に, ローカル座標上に組み立てた部材群を, 部材間の相対位置はそのま

まで移動・回転して配置する必要がある. そのために, 構成部材間で「親子関係」を考えて, 位置決めと配置に最も便利な部材を「親」と設定する. 本システムでは, 寄せ棟屋根については, 「主棟」を「親」として設定する. このように設定すると, 「主棟」の中心と傾きを建物境界線の分割四角形の中心と傾きに一致させれば, 「子供」の各部材も相対位置を保ったまま, 屋根及び部屋を地図上の建物境界線に従って, 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頂点座標や傾き, 建物ポリゴンに関連付けられている「属性情報」(図-1左)等のデータに基づいて, 「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. 「親部材」の垂直方向の位置(高さ)は屋根勾配, 屋根の幅に応じて算出する. 本研究では, 各屋根形状を構築するサブルーチンを多様な形態となる屋根ごとに開発した. これらサブルーチンにMaxScript内の「データテーブル」の「屋根勾配」などの値を選んで, パラメータとして与え, 3次元建物モデルを自動生成する.

(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パラメータとして与え, 親子で構成する「窓やドアが設置された壁」を自動生成する.

(6) 構成する各部品には, 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字形立体」について

本システムでは, L字形ポリゴンも「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頂点を頂点1として時計回りに頂点をラベリ

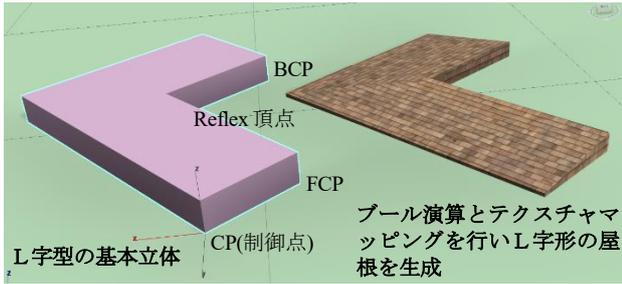


図-3 3DCGにおけるL字型の基本立体とブール演算とテクスチャマッピングを行いL字形の屋根生成

「頂点メンバー」とL字形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字形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字形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頂点を時計回りに辿るとき、右に向かう最長辺の始点を頂点1とするか左に向かう最長辺の始点を頂点3とするラベリングである。図-3に示す「L字形立体」は3ds Maxでは、「L字形の基本立体(Extruded L-

shaped object : L-Ext)」として、生成することができる。同オブジェクトに対して「Side_Length」, 「Front_Length」, 「Side_Width」, 「Front_Width」, 「height」の各パラメータに値を与え、屋根形状にするためのブール演算とテクスチャマッピングを行い、L字形を適切に配置するためにCP(制御点)の位置を整形された隣接四角形より算出し、オブジェクトを回転させることで、L字形の屋根を生成することができる。但し、「L字形の基本立体」はサーフェスモデルであり、ブール演算を行うと、中身の空洞が表に現れるため、2つのBox基本立体を組み合わせ、L字形の基本立体を「親部品」として、L字形の屋根を生成した。

6. L字形ポリゴンの整形処理

下の図-4のL字形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

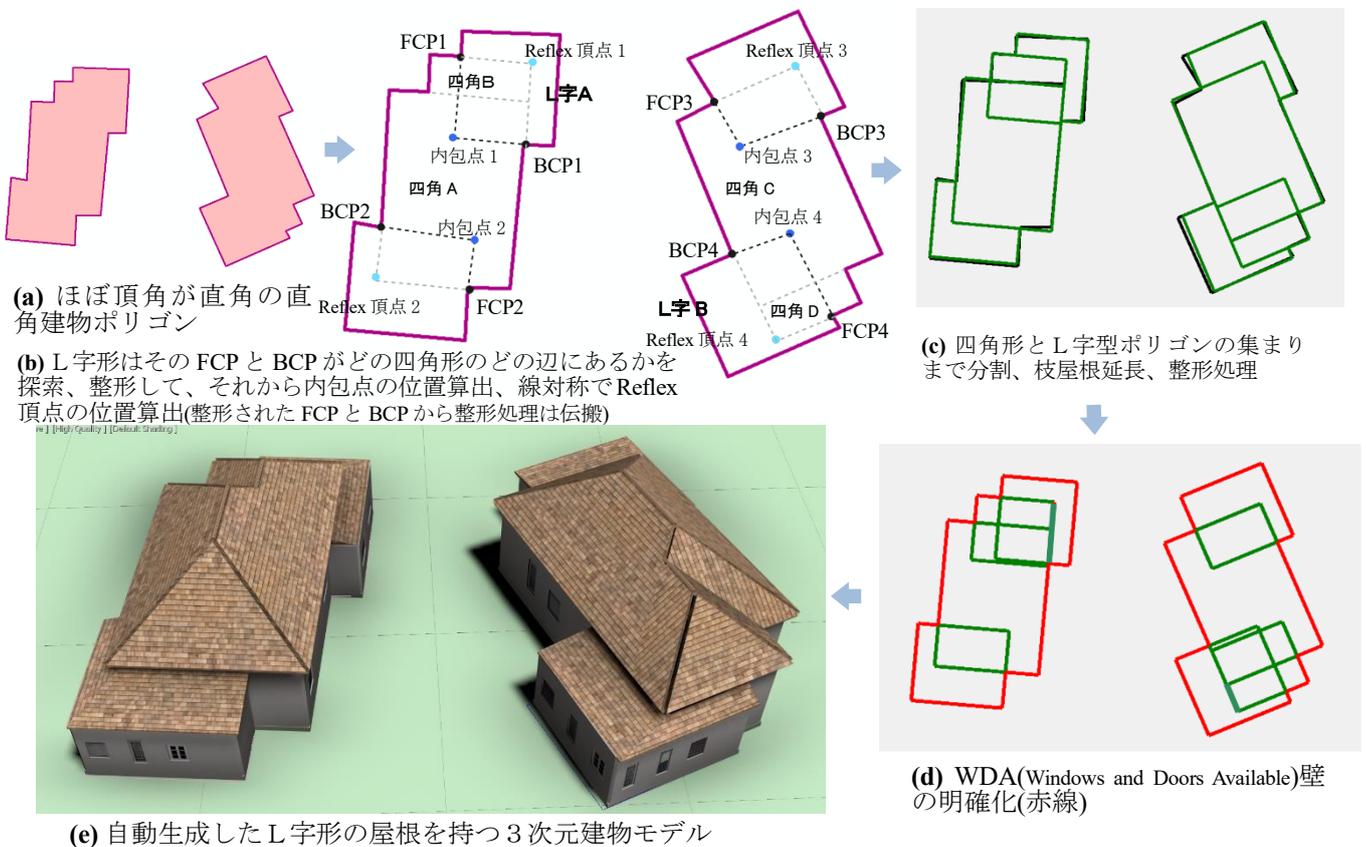


図-4 L字形の端点(FCPとBCP)の探索で異なる分割四角形に存在する場合の3次元建物モデル自動生成

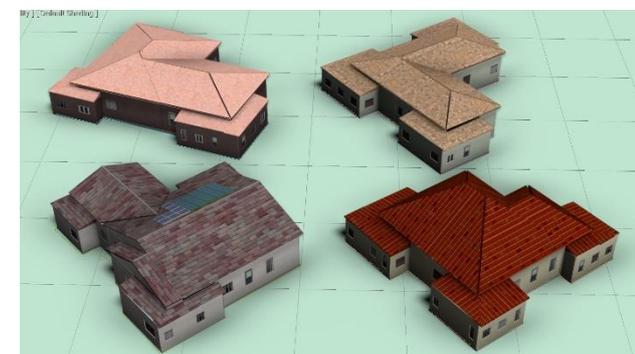
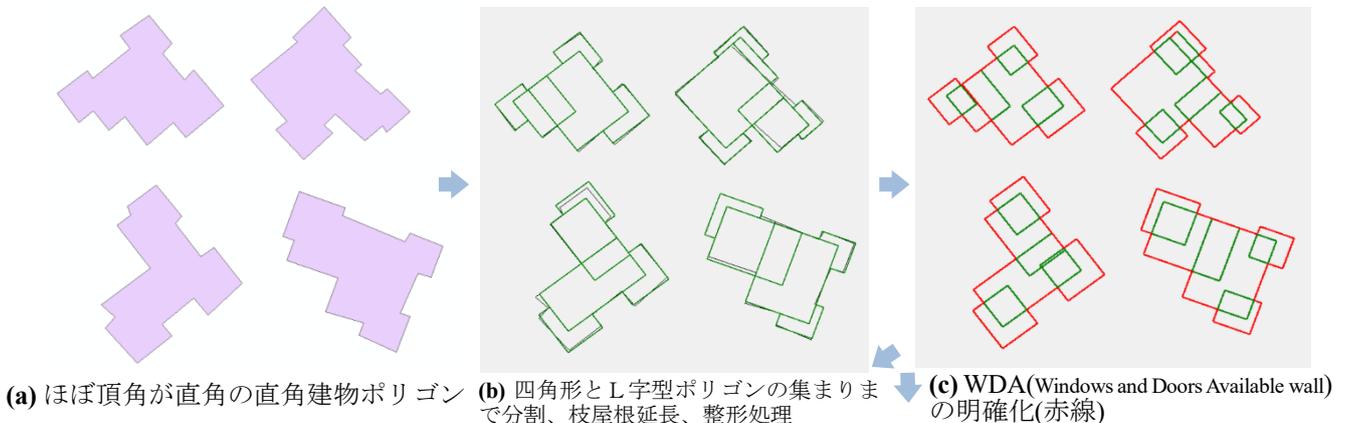
を整形された四角形の辺上に求める。このとき、「FCP&BCP 探索」は探索がうまく行われるように、整形されていない四角形を用いて行う。L字形ポリゴン整形の元になるFCP&BCPの2点の位置は、探索され整形された長方形の辺を内分する形で求められる(内分比は探索時に求める)。次にL字形ポリゴンを囲む「境界四角形」で、唯一隣接四角形の内部にある点(内包点)を、FCPとBCPを繋ぐ線分(FCP&BCP Line Segment)より求める。ここでFCPとBCPを繋ぐ線分を「FCP-BCP線分」とする。「FCP-BCP線分」の長さと同様、次に、FCPとjaf(FCPの次の頂点)の傾きを求め、その傾きと「FCP-BCP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字形ポリゴンの唯一のReflex頂点は(内角が 180° 以上)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字形ポリゴ

ンは整形されることになる。整形処理は、順に「FCPとBCP」→「内包点」→「境界四角形の外の3頂点」→「Reflex頂点」で進み、「内包点」以外の6頂点が「整形されたL字形ポリゴン」を構築する。このように整形処理は探索し、整形されたFCPとBCPから始まり、他の頂点へ伝搬していく。

図-4では、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のプロセスを示す。図-4(b)でL字形ポリゴンである「L字A」の端点(FCP1)は四角Bの辺ed12上に存在するが、もう一つの端点(BCP1)は四角Aの辺ed34上に存在する。通常、図-2に示すように、L字形の隣接四角形は同一の場合が多いが、隣接四角形が分割されてしまう場合もあり、2つの端点で個々に隣接四角形の探索を行う。

7. まとめ

これまでの研究で、頂角がほぼ直角の直角ポリゴンを四角形の集まりまで分割するとき、ポリゴンの枝部をみて、分割する枝部の屋根の高さが分割され



(d) 自動生成したL字形の屋根を持つ3次元建物モデル



(e) L字形の屋根を持つ3次元建物モデル(別の視点から)

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

ない主屋根より高くないように、枝部の中で細いところを選んで分割していく分割基準を設定した。しかし、分割基準を満たさない枝部も存在していて、それらを「重複する四角形」として分離していた。しかし、この「重複」は、建物内部(部屋)に不要な屋根が突き出す、あるいは、建物の力学シミュレーションを行うときの不安定さを引き起こすこととなった。そこで、分割条件を満たさない枝部をL字形ポリゴンとして、切り出すことで、この重複をなくすことができた。L字形ポリゴンも、他の分割四角形と同様に整形する必要があり、その整形のために、L字形ポリゴンが隣接四角形と接する端点がどの四角形のどの辺に存在するのかを探索し、見つかった辺で端点の辺に対する内分比を求め、整形された四角形において、端点の整形を行い、その整形処理をL字形ポリゴンの他の頂点に伝搬させ、整形処理を行った。

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

- Kenichi Sugihara and Junne Kikata (2012) 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.
- 杉原 健一, 村瀬 孝宏(2016) 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. I_167-I_174.
- 杉原健一, 沈 振江: “四角形の方角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.
- Parvaneh Saeedi and Harold Zwick : Automatic building detection in aerial and satellite images, International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, pp. 623-629, 2008.
- Zlatanova, S. and Heuvel Van Den, F.A. : Knowledge-based automatic 3D line extraction from close range images, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol 34, pp.233-238, 2002.