

# ポリゴン分割時の分割四角形のラベリングによる 窓設置可能な壁の明確化を行う 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 Clarifying Window Available Wall through Partitioned Quadrilateral Labelling at Polygon Partitioning

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

3D building models are of great use for many applications. The GIS and CG integrated system for automatic generation of 3D building models was proposed, based on building footprints (building polygons) on a digital map. The proposed integrated system 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 partitioning and rectifying a building polygon for automatic generation. For polygon shape rectification, the vertices labelling of consisting quads is used for each quad to know which quad is adjacent to and which edge of the quad is adjacent to, which will avoid unwanted intersection of windows and doors when building bodies are combined. In this paper, the new and extended methodology is proposed for polygon shape rectification and orthogonalizing by the quad vertices labelling.

**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), 3 次元 C G (3DCG)

### 1. はじめに

都市計画や建築設計, 特に, BIM (Building Information Model) のために「建物の 3 D モデル群」(図-1 右)を効率よく作ることが求められている. 例えば, このコロナ禍において, 建物の中を飛沫がどう漂うのか, 「安全な空気の流れを創る建物」の設備, 設計はどうあるべきか等をシミュレーションするには, デザイナーが描く「建物境界線や平面図」に基づき, 3 次元 C G や C A D ソフトを用いて, 膨大な手作業にて, 建物の 3 D モデルを製作する.

筆者らのこれまでの研究(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, その分割過程で, 分割さ

れた四角形(分割四角形)の傾きを計算し, 外部のどの四角形のどの辺に, どのように接していたかの「隣接関係」を隣接情報として「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. この「傾きや隣接情報の取得」は, 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. 本研究では, 分割四角形のどの辺に壁を作り, あるいは, 「壁のどこからどこまで窓やドアが設置できるか(WDA Windows and Doors Available) 壁」を明らかにする手法を提案する. 「WDA 壁」が不明の場合, 四角形を組み合わせる再構築時, 窓と他の四角形上の Box 状の建物部と「不要な交差(Unwanted Intersection)」が生じる. 「不要な交差」は Müller ら(2004)も指摘する不具合である. こうした不具合をなくすために, 分割四角形が隣接四角形にどう接するかを把握し, WDA 壁を明確化し, そこに窓やドア等を配置すれば, 矛盾しない形状の建物モデルを自動生成できる.

\* 非会員 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 5 0  
岐阜協立大学 E-mail : sugihara@gifu-keizai.ac.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 中京短期大学部 (Chukyo Gakuin University) murase@chukyogakuin-u.ac.jp

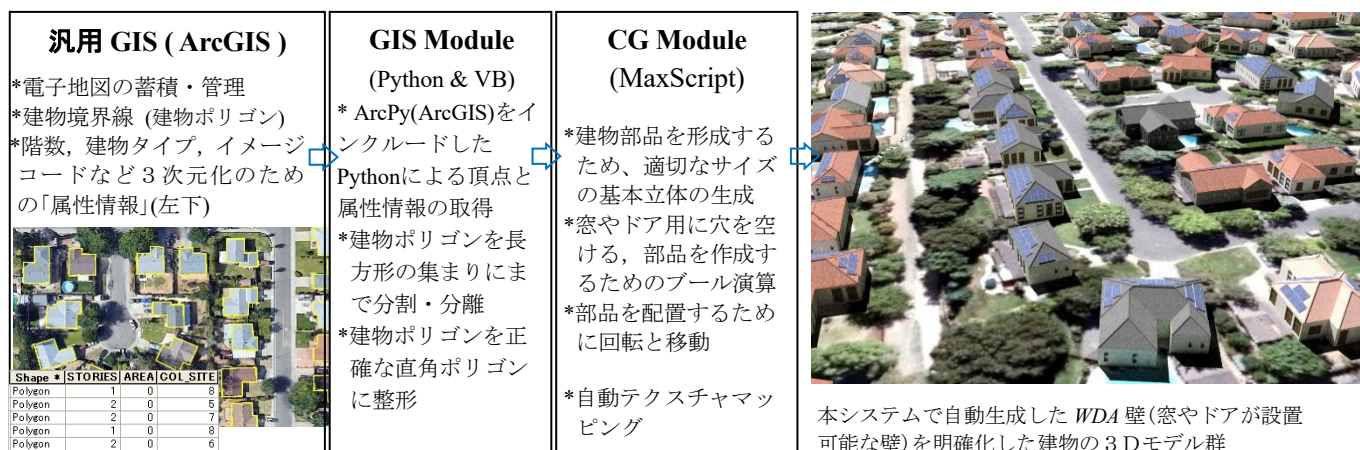


図-1 3次元建物モデルの自動生成システムの構成と自動生成のプロセス

## 2. 既往の研究

3次元建物モデルを作るとき、大きく2つの構築する立場があると考えられる。1つは、まだ、存在しない、これから建築する建物のための「BIMやパース図用に3次元建物モデルを作る立場」、2つ目は、リモートセンシングやコンピュータビジョンの技術を用いて、今ある建物をコンピュータ内に作る「仮想空間に写像する立場」である。1つ目の立場は、建築設計において、平面図、立面図などに基づいて、まだ存在しない建物を建設する立場で、前もってCGやCADソフトで3次元建物モデルを作り、パース絵などに利用する。昨今では、平面図、立面図を作る前に、3次元建物モデルを作り、それから、これらの「設計図書」を3Dモデルから生成するBIMが大規模建物設計を中心に活用されている。

この3Dモデル構築には多大な手作業が必要とされるので、これを省力化するために、製作ルールのプログラミングで自動生成する「手続き型モデリング(Procedural modeling)」が研究されている。Müllerら(2006)は、建物境界線である建物ポリゴンの押し出し処理とAichholzerら(1995)によるstraight skeleton手法を用いて一般形状の屋根を生成する。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、即ち、「寄せ棟屋根」しか生成できない。

本研究で提案する自動生成システムでは、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、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、各長方形の上に個別に建物を作成する。屋根形状は多種多様であり、「長方形の長辺に垂直な頂線」を有する屋根も存在する。本システムでは、分割・分離した長方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(図-1左端下)で決め、分割長方形ごとに個別に多種多様な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、また、建物ポリゴンの分割、ポリゴン整形、枝屋根延長しての3次元建物モデル自動生成の詳細なプロセスを図-2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)をインストールした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。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)、各頂点の内角の算出。
- (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( $=n_R$ )のカウント.
- (6) 「連続する R 頂点の個数( $=n_R$ )」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(Active Quad)」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.

下の図-2 では、建物ポリゴンを「四角形の集まり」になるまで分割し、それらを「互いに直交する長方形の集まり」になるまで整形、枝屋根延長を行い、各長方形に個々に建物本体と屋根を配置して、3次元建

物モデルを自動生成する詳細なプロセスを示す. 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」とした(2012).

図-2 のポリゴンの場合、最下端の頂点から辿ると「RRLRLRLRLRLRLRLRRRL」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、「長方形」の集まりに分割・分離することができる. 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 1 本の分割線だけに決める.

ここで、条件①と③は、ポリゴンの「一本枝の細い

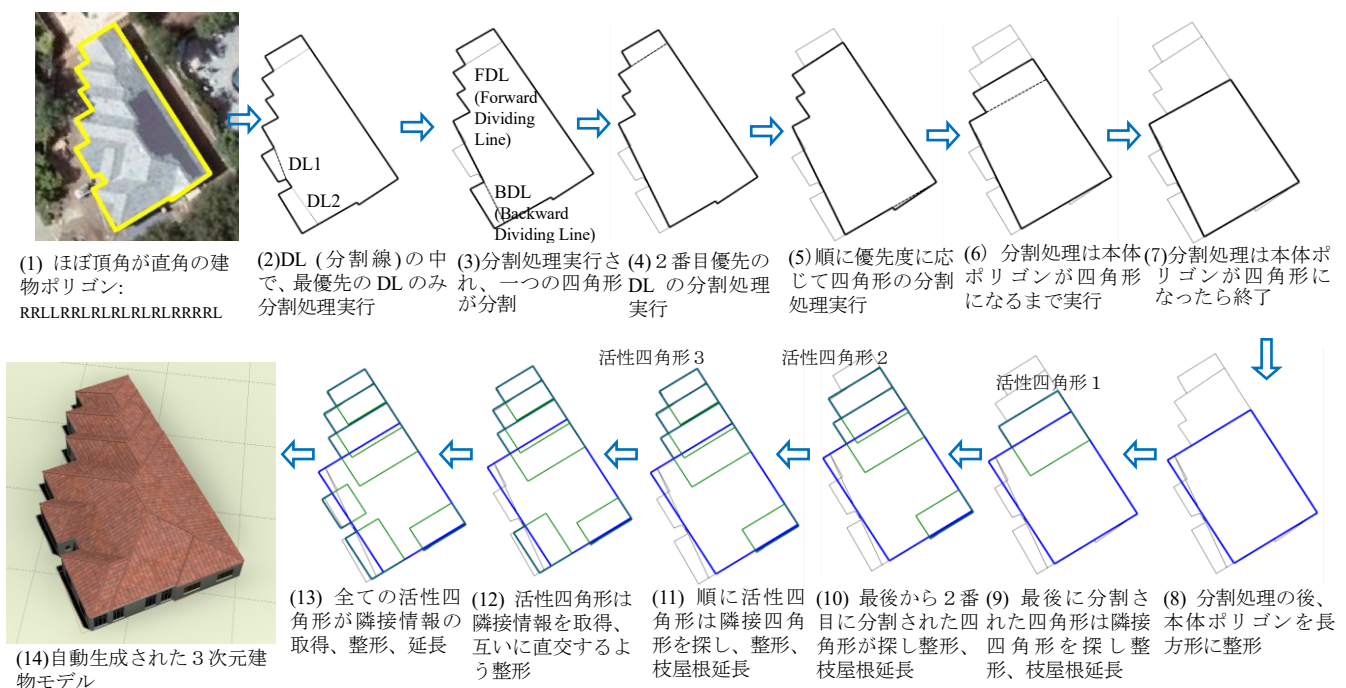


図-2 建物ポリゴンの分割、ポリゴン整形、枝屋根延長しての 3 次元建物モデル自動生成の詳細なプロセス

ところ」を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るのを防ぐための条件である。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( $n_R$ )を数え、 $n_R$  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。従って、L 頂点で挟まれる R 頂点が 1 個の場合( $n_R=1$ ) は 1 本の分割線で、四角形を切り取ることとはできない。

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とはできない。R 頂点が 4 個以上連続する場合は、前の挟む L 頂点から数えて、2 番目、3 番目の R 頂点を起点とする辺と交わる分割線を「分割処理の候補」と考える。あるいは R 頂点が 4 個連続する場合、その 4 個の R 頂点で四角形を形成できる場合もあり、連続する R 頂点の最初と最後の R 頂点を繋ぐようなかたちで分割四角形を形成できる。

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 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。

本システムでは、図-3 に示すように、四角形の頂点を「時計回りに番号付け」するが、分割線(DL)は、図-2 (3) に示すように、L 頂点から「時計回り (clockwise)」か「反時計回り (counter-clockwise)」の方向に引く。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 (2) に示す DL1 は、両側から DL が引かれると考えて、「F&BDL(Forward&Backward DL)」とする。

この分割線の引き方は「分割パターン」として、活性四角形でもある分割四角形に保存される。ポリゴン分割時及び整形時に、分割パターンに応じて、どの辺とどの辺の交点を求めて、分割四角形の頂点とするか、それから、ポリゴン整形時にどの頂点を「基準点」とするかがこの「分割パターン」によって決まる。

図-2 では、一つの建物ポリゴンに対する本分割手法の適用事例であり、前記条件を満たす分割線による分割処理及び 3D モデル自動生成のプロセスを示す。以下にその手順を示す。

- (1) 建物ポリゴンを RL 表現し、L 頂点からの分割線(DL)で 3 つの「分割実行条件」を満たす DL を列挙
- (2) 列挙された DL の中で、最優先の DL のみ分割処理実行
- (3) 分割されトポロジーが変わった建物ポリゴンにおいて、再度 RL 表現を行い、3 条件を満たす DL を列挙、その中で最優先の DL のみ分割処理
- (4) この分割処理を本体ポリゴンの頂点数が 4 個になるまで実行
- (5) 最後に残った四角形を平均長辺、平均短辺、重心、主傾きに応じて長方形に整形
- (6) 最後に切り取られた四角形は活性四角形として、隣接四角形を探索し、探し当てた整形された本体ポリゴンの基準値に基づいて整形、枝屋根の延長を本体ポリゴンに対して行う
- (7) 最後から 2 番目に切り取られた活性四角形が、隣接四角形を探索し、探索した整形四角形の基準値に基づいて整形、枝屋根を延長
- (8) すべての活性四角形について、探索、整形、延長を行う。

図-2 (9)~(11) に示すように、分割四角形は「活性四角形」となり、隣接四角形を探し、隣接四角形のどの辺にどのように接するか(FDL, BDL または F&BDL)かの「隣接情報」を取得する。活性四角形はこの隣接情報に基づいて、形状の再構築、整形、枝屋根の本体ポリゴンへの延長を行う。

#### 4. 隣接情報による枝屋根の形成

本システムでは、建物ポリゴンの「一本枝の細いところ」を分割していき、ポリゴンを「四角形の集まり」

建物ポリゴンを分割せず、建物ポリゴン全体に対して、一律に屋根を構築できる Straight Skeleton(直線状骨格)手法で、どのような形状のポリゴン(非直角ポリゴンも含む)に対しても、屋根を形成する手法を、筆者らは開発してきた(2014, 2019). この Straight Skeleton は、ポリゴンを内側に一定速度で縮小処理するとき、ポリゴン各頂点が辿る軌跡で構成される。従って、辺の両端の頂点の内角の総和が  $360$  度以下である短い辺は、縮小処理で消えてしまい、長い辺が残るので、屋根は「寄せ棟屋根」に限定される。Straight Skeleton 手法で非直角建物ポリゴンに対しても 3 次元建物モデルを自動生成できる利点はあるも

ここで、隣接辺の I D 番号 ‘ed12’は、図-3 (b)に示すように点 1 と点 2 の間の辺である。建物ポリゴンは、その頂点に時計回りに番号付けするが、その番

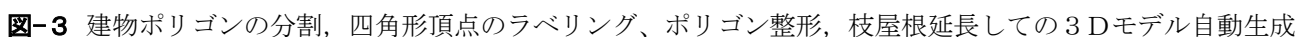


表-1 最長辺の相対番号とその向き、活性辺の関係

| 最長辺の相対番号 | 最長辺の向き | 活性辺(隣接辺) | 妻側辺(三角屋根板の辺) | 図-3(b)における枝屋根例 |
|----------|--------|----------|--------------|----------------|
| 1        | Right  | ad41     | ed23         | A, D           |
| 1        | Left   | ad23     | ed41         | F              |
| 2        | Right  | ad34     | ed12         | B, C, H, I     |
| 2        | Left   | ad12     | ed34         | E, G           |
| 3        | Right  | ad23     | ed41         | F              |
| 3        | Left   | ad41     | ed23         | A, D           |
| 4        | Right  | ad12     | ed34         | E, G           |
| 4        | Left   | ad34     | ed12         | B, C, H, I     |

号を「絶対番号」とすると、分割四角形にもその4頂点と4辺に、時計回りに順に番号付けする。具体的に、絶対番号順に、頂点を時計回りに見ていって、分割四角形の本体ポリゴン上にある頂点を番号1とし、時計回りに頂点、そして、辺に番号付けすると、分割四角形の4辺は、図-3(b)の図中の(1)(2)(3)(4)に示すように番号付けされる。それは「相対番号」と考えられる。本システムでは四角形を切り取る時、その四角形の辺の長さとき向きを時計回りに調べるが、その最長辺の相対番号が(1)(3)である場合は、その分割四角形は本体ポリゴンに垂直で、(2)(4)である場合は、分割四角形は本体ポリゴンに平行であることが分かる。さらに、この相対番号が(4)である辺は、必ず、「隣接四角形を探す活性辺(Active Edge)」となり、四角形頂点のラベリング(番号付け)によって、活性

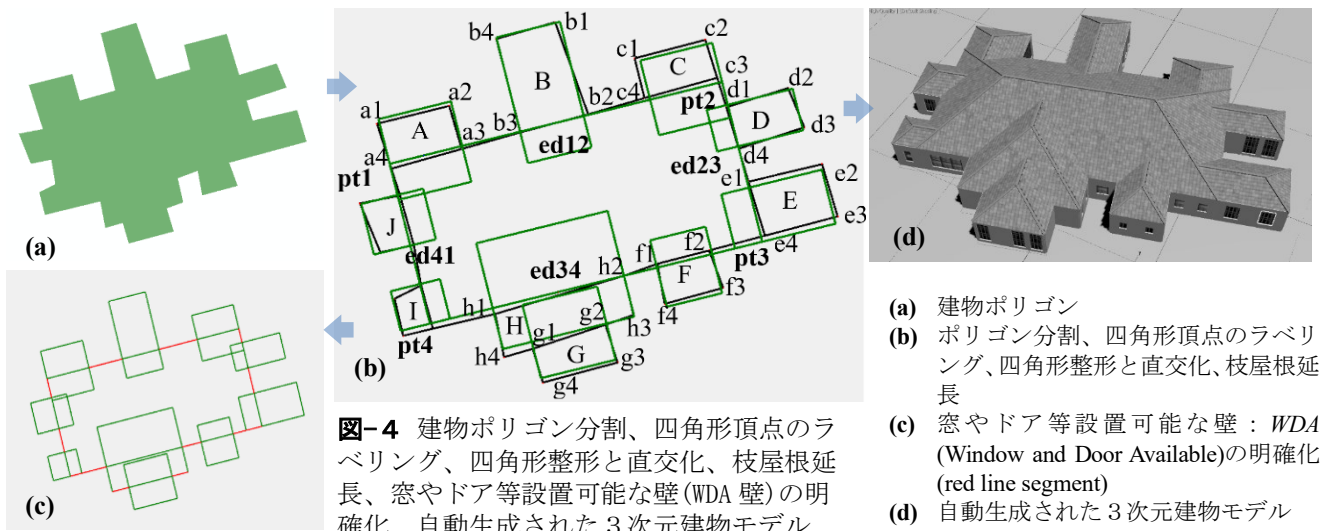
辺がどの辺(ed12,ed23,ed34,ed41 のどれか)かが分かる。それを上の表-1にまとめる。

#### 4. 窓等設置可能な壁の明確化

窓やドア等設置可能な壁：WDA 壁(Windows and Doors Available wall)を明確化する手法を以下に述べる。これまでの研究(2012, 2016)で、図-3(a)に示すような頂角がほぼ直角のポリゴンを、四角形の集まりまで分割して、分割四角形の頂点を図-3(b)に示すように、ラベリング(番号付け)を行った。図-3(b)が示すように、分割四角形は「活性辺(Active Edge)」,もしくは、「保存辺(Stored Edge)」を共有して、主ポリゴンに接続し、これらの辺上には、壁を作らない。これらの辺以外の辺上に壁を作り、ポリゴン全体を囲むように壁は作られる。

ここで、窓やドア等を設置する場合、設置が可能な壁かどうかを明確化しなければ、窓やドアが分岐建物部と交差してしまうという不具合を生じる。これは、Müller ら(2006)も指摘する不具合(不要な交差:Unwanted Intersection)で、Müller らは、交差するポリゴンがお互いのことを知らない、この不要な交差が窓を不自然にカットしてしまうと述べている。

枝部はそれを切り取る時、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、WDA 壁を明らかにする。明確化は以下の手順で行われる。



(1) これまでの研究(2016)でも述べたように、枝部を切り取るとき、分割四角形のID、分割辺のID(ed12, ed23, ed34, ed41)と分割パターン(Forward DL か Backward DL か F&B DL)等の「隣接情報」と分割四角形の「切り跡(trace)」である「活性辺(Active Edge)の主ポリゴン辺上の頂点情報」を取得する。具体的には、図-4(b)が示すように、主ポリゴンの「辺12(ed12)」には、枝部が3つあり、枝部の分割パターンに応じて、「切り跡(trace)」は、順に頂点  $a4(=pt1)$ ,  $a3$ ,  $b3$ ,  $b2$ ,  $c4$  と  $c3(=pt2)$  となる。

(2) 本システムは、「活性四角形」が隣接四角形を見つけるが、見つかった隣接四角形の見つかった辺について、この切り跡の頂点数( $n_v$ )を数え上げる。活性辺(Active Edge)の場合は、壁がないので、 $n_v=0$  とする。

(3) 全ての分割四角形の全ての辺について、切り跡の頂点群は、切り跡の頂点がのっている辺の端点からの距離でソートする。そのために各頂点と端点との距離を計算する。

(4) WDA 壁は枝部の分割パターンに依存する。例えば、図-4(b)が示す主ポリゴンの「辺12(ed12)」には、FDL (Forward Dividing Line) と BDL (Backward Dividing Line)の枝部があり、枝部の分割パターンに応じて、「切り跡(trace)」は、順に  $a4(=pt1)$ ,  $a3$ ,  $b3$ ,  $b2$ ,  $c4$  と  $c3(=pt2)$  となり、「WDA 辺」は時計回りに 頂点  $a3$  からスタートして、辺  $a3$ - $b3$ , 続いて、辺  $b2$ - $c4$  の合計2個だけとなる。WDA 辺の個数( $n_{wda}$ )もシステムはカウントする。これら WDA 辺は図-4(c)と図-5(c)の赤線でも示す。

それから、具体的に、「辺34(ed34)」には、FDL と BDL の枝部がなく、WDA 辺は( $pt3$ ,  $f2$ ), ( $f1$ ,  $h2$ ), ( $h1$ ,  $pt4$ )となり、 $n_{wda}=3$  となる。

(5) 全ての分割四角形の全ての4辺について、壁がなければ  $n_{wda}=0$ 、1枚壁があれば  $n_{wda}=1$ 、WDA 壁があれば、WDA 壁の枚数、それから、WDA 辺の辺長、辺の傾き、両端の頂点座標を CG モジュールへ出力する。

## 5. まとめ

本システムでは、建物ポリゴンを四角形の集まり

まで分割して、互いに直交する長方形の集まりまで整形し、各長方形の上に個別に建物、屋根を配置して3次元建物モデルを自動生成した。下の図-5においても、建物ポリゴン毎に属性情報を与えて、一部の屋根は切妻屋根、または、寄せ棟屋根として自動生成した。このように長方形の上に直方体を形成し、複数の直方体を組み合わせて建物を作るとき、直方体が繋がったところには窓やドアを設置できず、壁も不要である。本研究では、この「繋がったところ」を自動的に検出し、窓やドア等設置可能な壁を明かにした。

**謝辞** 本研究は、JSPS 科研費の研究課題番号：18K04523 と 19K04750, 20K03138 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.
- Kenichi Sugihara (2013) Straight Skeleton for Automatic Generation of 3-D Building Models with General Shaped Roofs. Communication papers proceedings of WSCG'2013 - 21st International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision pp. 175 - 183
- Kenichi Sugihara (2019) Straight Skeleton Computation Optimized for Roof Model Generation. WSCG 2019, 27th. International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision
- Pascal Müller, Peter Wonka, Simon Haegler, Andreas Ulmer, Luc Van Gool (2006) Procedural modeling of buildings, ACM Transactions on Graphics 25, Vol. 3, pp.614-623
- O. Aichholzer, F. Aurenhammer, and D. Alberts, B. Gärtner (1995) A novel type of skeleton for polygons, Journal of Universal Computer Science, Vol.1 (12), pp.752-761

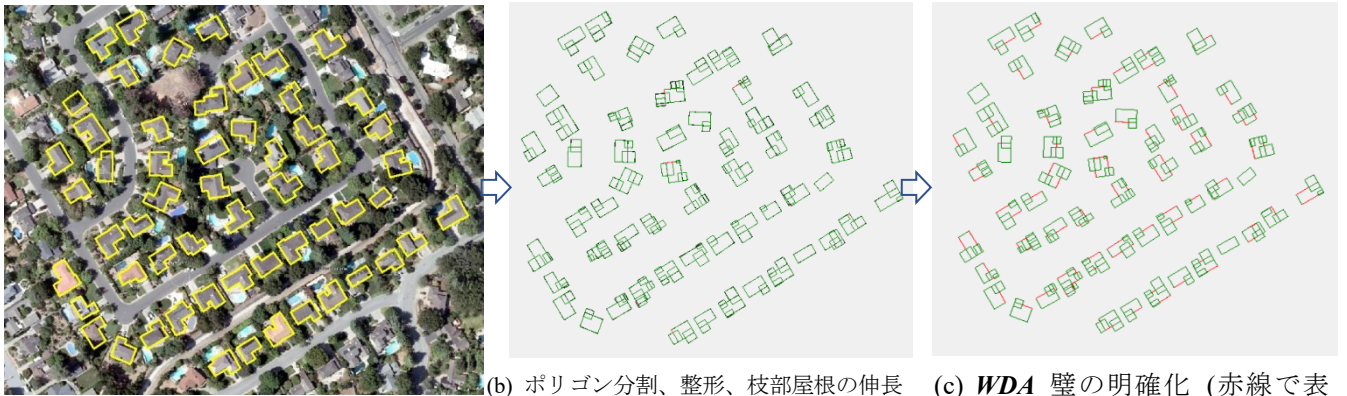


図-5 ポリゴン分割、整形、枝屋根の伸長、および、*WDA* 壁 (Windows and Doors Available wall)の明確化