

両側延長四角形の分割・整形による3次元建物モデルの自動生成

Automatic Generation of 3D Building Models by Both Sides Extendable Quadrilateral 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 金沢大学 理工研究域 研究協力員 博士(工学)

Researcher, Kanazawa University, Faculty of Geosciences and civil Engineering, 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: A GIS and CG integrated system is proposed for automatically creating 3D building model, based on building footprints (building polygons) on digital maps. Our 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). When a branch quad partitioned, the most quad will look for neighbors through a cut end edge, resulting in expanding its branch roof to an adjacent quad. However, not all partitioned quads look for neighbors. Some divided quads including three or more vertices from a main polygon as 'complete quad' will store adjacent information on the divided edge (a cut end edge), and can reconstruct itself by the stored adjacent information. This type of quad will expand its branch at both sides as 'Both Sides Extendable Quad'. For polygon shape reconstruction, the vertices labelling of partitioned quads is used for each quad to know which quad is adjacent to and which edge of the quad is adjacent to. In this paper, we classify all connectivity between absorbing quads and extendable quads. During rectification process, a quad's direction flip will occur for some connectivity between quads.

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; 3次元CG

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

1. はじめに

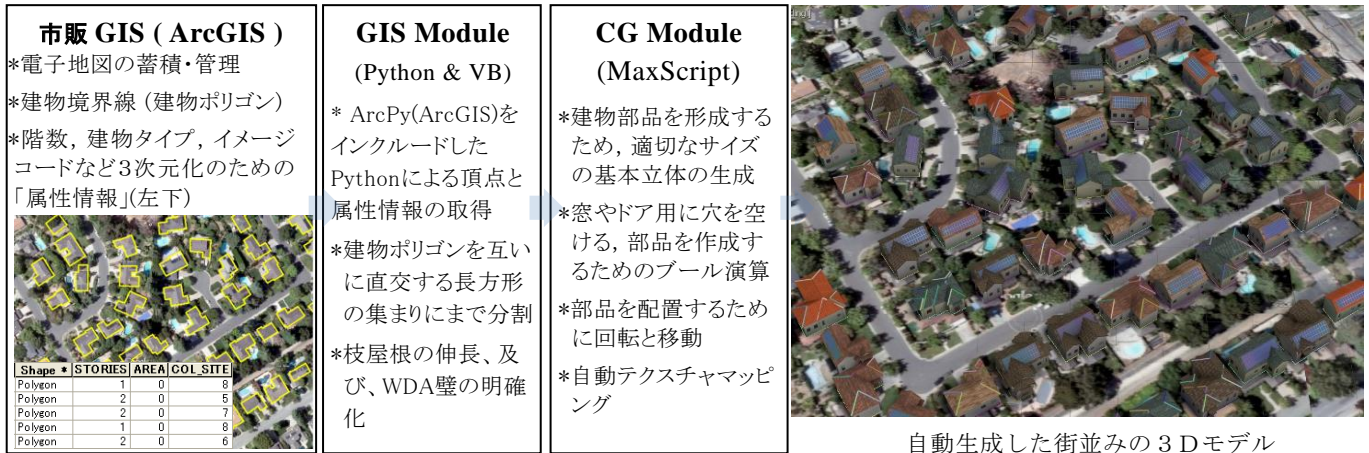
図-1右に示すような「街並みの3Dモデル」は、まちづくりの案を検討する際、関係者で計画案の出来上がりのイメージを共有でき、合意形成に役立つ。例えば、持続可能な「スマートハウス」とこれらを集合したスマートタウンはどうあるべきかを仮想空間で検討するとき、建物の3Dモデルはソーラーパネルを備え、どれぐらいパネルが太陽光を受け止められるのか。さらに、3Dモデル内部、即ち、部屋に入ることができ、建物形状に応じて、冬に太陽光がどのように導かれるのか、あるいは、夏にはどのように遮蔽されるのか等をシミュレーションできれば、よりよいスマートハウスの設計につながる。そのため、建物の3Dモデルを効率よく作ることが求められている。しかし、現状では、3Dモデルを構築するには、それぞれ、専門家が描く「建物境界線や平面図」に基づき、3次元CGやCADソフトを用いて、膨大な手作業にて、建物の3Dモデルを製作する。

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形状の建物本体と屋根を配置して3次元建物モデルを自動生成した。

この分割処理では、ポリゴンのReflex頂点(内角が180度以上の頂点)から複数の分割線を引き、分割線の優先度の高い順に分割処理した。分割された四角形は「どの四角形のどの辺にどのように接していたか」という「隣接情報」を分割四角形に保存し、それに基づいて分割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する。「どのように接していたか」は、分割線がどのように引かれるかで分かり、「どの四角形のどの辺」かは、分割四角形の隣接辺がどの四角形の、次にその四角形のどの辺に含まれるかを順次探索して調べる。

ここで、分割四角形の形状、即ち、本体ポリゴンの「内角が90度の頂点」をどれだけ(3頂点以上かそれ未満か)含んだ分割四角形であるかに応じて、分割四角形から枝屋根を延長させるかどうかを決める。これは長方形



自動生成した街並みの3D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

が、図3左端の長方形で示すように3頂点(a1,a2,a3)の位置が決まると、長方形では、その2本の対角線の中心は一致するという頂点の関係式「 $(a1+a3)/2=(a2+a4)/2$ 」が成り立つので、第4点(a4)の位置は $(a1+a3-a2)$ で決まり、「内角が90度の頂点」を3頂点以上含んだ四角形は「独立した四角形」として、延長しない独立した屋根が載ることになるからである。

「本体ポリゴンの内角が90度の頂点」を2頂点だけ含んだ分割四角形は、四角形の第3、第4の頂点は分割線と本体ポリゴンの辺の交点として求め、その上に載る屋根は、多くの場合、隣接四角形へ枝屋根を伸ばす「延長型四角形」となる。本体ポリゴンの頂点を3頂点以上含んだ分割四角形(「独立型四角形」とする)は、延長せず独立した屋根を形成すると同時に、逆に「枝屋根を吸い込む四角形」となりうる。独立型四角形は、その分割時に、自らの四角形IDや自らの隣接辺、隣接方法などの隣接情報を確定できる。この隣接情報を「設計諸元」として、四角形の切断時、その本体ポリゴン側の「切り口の辺」に、その設計諸元を保存する。この「切り口の辺」を「保存辺」とし、整形プロセスにおいて、保存辺に蓄えられた隣接情報に基づいて独立型四角形を再構築する。

この再構築のプロセスである「分割・整形」は、四角形の分割時、分割四角形の頂点の「ラベリング(番号付け)」を通して、処理される。延長型四角形の場合、自らの隣接辺、隣接の仕方、その後、本体ポリゴン側の隣接辺を順次探索して調べ、これらの「隣接情報」に基づいて、整形処理を実行する。この延長型四角の一辺が「保存辺」の場合、この延長型四角は両側に伸びる「両側延長型四角(Both Sides Extendable Quad)」となり、保存辺でない場合は、「片側延長型四角(One Side Extendable Quad)」となる。

本研究では、この「両側延長型四角」と「独立型四角」、それから「片側延長型四角」の全ての接続の仕方を洗い出し、後述する同じ辺番号(図4の辺12、a12、b34等)で2つの四角形が隣接してしまうという「整形後はありえない隣接関係」を正すため、四角形の方向フリップを行う手法を提案する。

2. 既往の研究

本自動生成システムの中心的アルゴリズムは、計算幾何学の分野である「直角ポリゴンの分割」である。直角ポリゴン分割は集積回路設計で活用され、VLSIのマスク設計で著しく分割技術が進化した。マスク設計では、一定の最小幅を持つ電子ビームでマスクのエッチングを行うが、O'Rourkeら⁴⁾は、直角ポリゴンである電子回路を、できるだけ数が少なく、最小の辺長を持ち、できるだけ正方形に近い四角形の集まりまで分割する手法を提案した。彼らの提案では、最小の分割線長を設定し、分割線はReflex頂点(内角が180°以上)からの「Vertex cuts」、頂点ではない辺上の点から伸びる「Anchored cuts」、それから、ポリゴン内部で浮いた状態の分割線である「Floating cuts」の3種類の分割線で最適に直角ポリゴンを分割する。本研究では、この「Vertex cuts」と同様にL頂点(内角が270°)からの2本の分割線を分割処理の候補としている。建築設計との根本的な違いがあるものの、今後、自動的に「間取り」を行う上で参考になる手法である。

建物の3Dモデルの構築について、2つの大きく異なる構築する立場があると考えられる。1つ目は、リモートセンシングやコンピュータービジョンの技術を用いて、「今ある建物を仮想空間に写像する立場」で、これはPLATEAUやgoogle earth上の3Dモデルに実例を見ることができる。2つ目は、主に設計図に基づいて、これから建設する建物のために、「まだ存在しない建物の3Dモデルを作る立場」である。これは、BIMやパース図の3Dモデルに実例を見ることができる。本研究は、2つ目の立場のまだ存在しない建物を自由に描く建物境界線から、時間と労力をかけずに自動生成する手法である。

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と異なり、3Dモデルの各部材は中身の詰まったCSGのモデルであり、3Dモデルの内部に入って、太陽光がどのように差し込むか、あるいは、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利用できる。

3. 四角形の番号付け

本手法では、直角建物ポリゴンを四角形の集まりまで分割し、全ての分割四角形にIDを割り当てたあとで、分割四角形の「隣接情報」を調べ、この隣接情報に基づいて、建物ポリゴンを整形、再構築する。隣接情報は分割した四角形の「切り口の辺」が、どの四角形に含まれ、次に、その四角形のどの辺に含まれるかを順次探索し、調べる。具体的には、四角形の頂点の「ラベリング(番号付け)」を行い、辺に辺番号をつけ、「どの辺に含まれるか」を特定する。

線分をラベリングする場合、線分の両端の2点で、 x 座標が小さい点を「点1(a1,b1等)」にする。このようにすることで、線分の傾きを -90 度未満から $+90$ 度の範囲に一意に収めることができる。このことを下の図2に示す。図2の線分a12は $a1.x < a2.x$ で、傾きは -90 度未満から $+90$ 度の範囲に一意に収められるが、線分b12は $b1.x > b2.x$ で、傾きは約 -110 度になってしまう。線分a12と線分b12は同じ傾きであり、同じ傾きに対して、2つの角度を与えるのは不適切なので、線分の両端の2点で、 x 座標が小さい点を点1とする。このようなラベリングにおいて、線分がほぼ垂直に立っている場合、点1の位置は微小な傾きの変化でも、点1の位置は大きく変わってしまう。具体的に、ほぼ垂直に立っている線分g12の傾き(-89.9 度)と線分f12の傾き($+90.0$ 度)の絶対値の

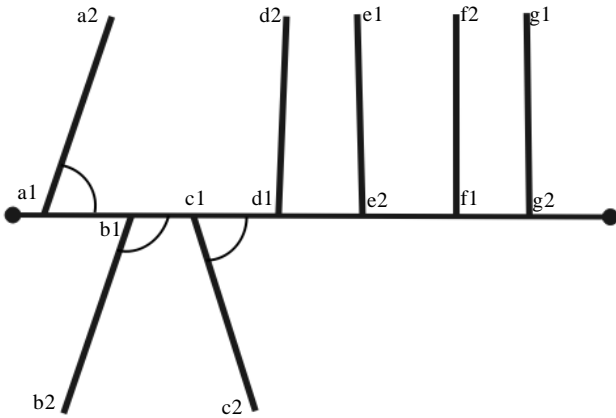


図2 線分の傾きを一意に決める番号付け

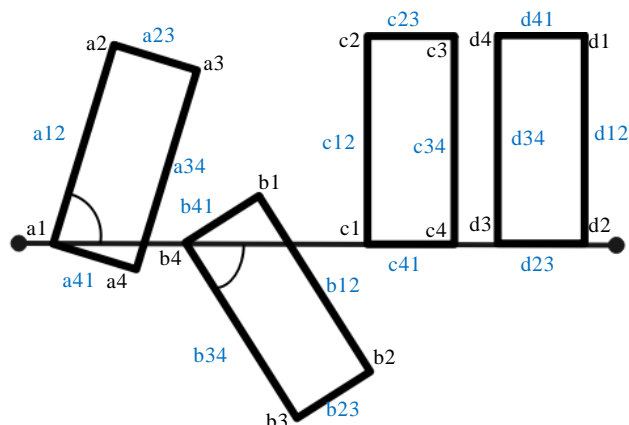


図3 長方形の傾きを一意に決める番号付け

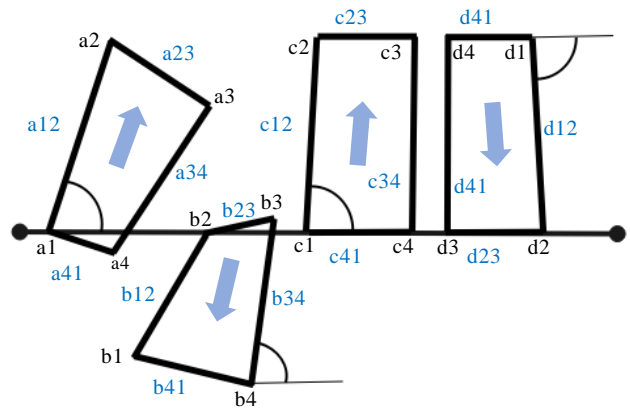


図4 四角形に対する番号付け

差は僅か 0.1 度であるが、点1から点2のベクトルの方向を線分方向とすると、線分g12は下向きで、線分f12は上向きとほぼ 180 度異なる。ほぼ垂直に立っている線分はその傾きの微小な変化でも、線分方向は反転する。これを本研究では、「方向フリップ」とする。

この線分のラベリングを長方形に拡張した場合を図3に示す。長方形の辺は「長辺」と「短辺」の2つに分類され、上側長辺の始点を点1(a1,b1等)とし、残りの頂点を図3のように時計回り(Clockwise)に番号付けする。ここで、長辺の傾きを長方形の傾きとすると、長辺の始点(a1,b1等)の x 座標は長辺の終点(a2,b2等)の x 座標より小さいので、線分と同様に、長方形の傾きを -90 度から $+90$ 度の範囲に一意に収めることができる。このようなラベリングは、ポリゴンから四角形を分割するとき、分割四角形の辺の長さや辺の向きを調べ、右向きで最も長い辺の始点を点1、あるいは、左向きで最も長い辺の始点を点3とすることで実現できる。

また、線分と同様に、長方形がほぼ垂直に立っている場合、傾きの微小な変化でも、ラベリングは大きく変わってしまう。図3で、ほぼ垂直に立っている四角形c1234の傾きが -89.9 度とすると、その向きは下向き、四角形d1234の傾きが 90 度とすると、その向きは上向きとなるが、両者の傾きの差の絶対値は微小である。

長方形のラベリングを「一般的な四角形」に適用した場合を図4に示す。本手法では、切り出した四角形の最長辺の傾きと向きを調べ、分割四角形の傾きはその最長辺の傾きとし、図4に示すように、最長辺の向きが右向きであれば、その始点を点1(a1,b1等)とし、左向きであれば、始点を点3(a3,b3等)とし、残りの頂点は時計回りに番号付けする。本システムは、ポリゴンを四角形の集まりまで分割した後、分割四角形は、隣接四角形のIDと隣接辺を探索する。その探索が正しく行われるように、ポリゴンや分割四角形の形状はそのまま、本ラベリング手法で番号付けした辺番号(図4のa12等)の「隣接情報」を取得する。その後、最後に残った四角形を最初に長方形に整形し、次に、それに基づいて、それに隣接していた四角形を整形する。さらに整形された四角形に隣接していた四角形を整形するという「整形処理」を伝搬させて、整形処理を実行する。

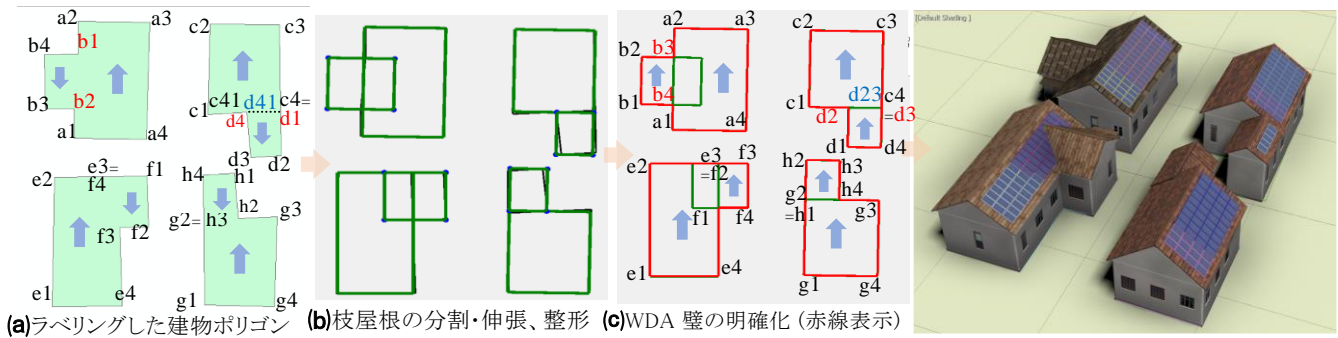


図5 ポリゴン分割、整形、枝屋根の伸長、および、WDA 壁 (Windows and Doors Available wall)の明確化プロセス

4.「方向フリップ」による整形処理

本手法では、図3の説明で前述したように最長辺の向きが右向きであれば、その始点を「点1 (a1, b1 等)」とし、最長辺の向きが左向きであれば、始点を「点3 (a3, b3 等)」とし、全頂点を番号付けする。ここで、図3及び図4に示すように点1と点2の間の「辺12 (a12, b12 等)」は、整形された後では「右向き上側長辺」、点2と点3の間の「辺23 (a23, b23 等)」は「右側短辺」、点3と点4の間の「辺34 (a34, b34 等)」は「左向き下側長辺」、点4と点1の間の「辺41 (a41, b41 等)」は「左側短辺」となる。「整形後」においては、建物ポリゴンは互いに直交する長方形の集まりとなるが、「整形後の長方形を組合せたポリゴン」は以下の性質を持つと考える。

(1) ポリゴンを構成する長方形は2つの方向は、即ち、「主傾き(ポリゴン各辺の辺長の総和が最大となる辺の傾き)」か「それに垂直な方向」のどちらかをとる。

(2) 2つの長方形が一辺(隣接辺)を共有して隣接するとき、隣接辺の両側に長方形は存在する。従って、長方形Aの辺12が長方形Bの辺12に接続することは「ありえない隣接関係」となる。

このポリゴンの分割、ラベリング、四角形方向修正、枝屋根の延長、整形、WDA壁(窓やドア設置可能壁)の明確化のプロセスを上図5に示す。ここで、整形前の図5(a)にて、四角形 b1234、d1234 等を切り出し、本ラベリング手法を施し、分割四角形の傾きを算出するが、これらは「主傾き」と約 180 度異なる。システムは、それを検出すると、図5(c)の四角形 b1234 等の矢印で示すように「方向フリップ」を発生させて、分割四角形の向きを「主傾き」にあわせて、四角形方向を修正する。

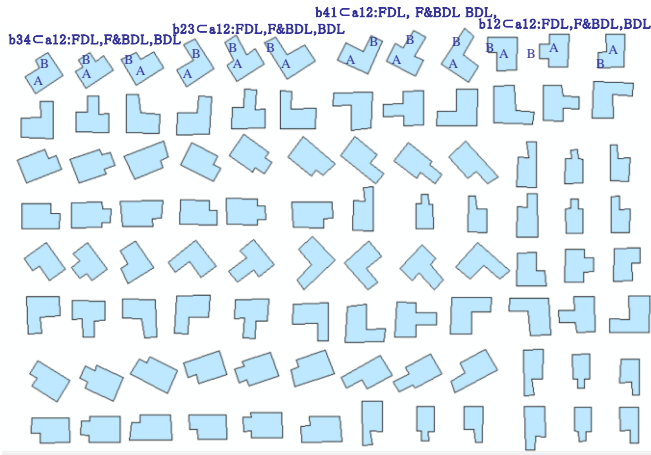
重要な後工程となる「分割四角形の整形処理」は、「整形後の傾き」や「隣接情報(分割四角形の起点、隣接辺)」などのいわば「設計諸元」に基づいて、再構築するが、その設計諸元は方向フリップによって、大きく変化する。具体的に、図5(a)の分割四角形 d1234 は、整形前の傾きは、約-89 度で、四角形の再構築の起点は「d1」であるが、整形後の傾きは 90 度で、四角形の再構築の起点が「d3」に変更される。同図でその他の分割四角形の設計諸元も変更され、整形処理される。また、整形後には、2つの長方形が一辺(隣接辺:d23 c c41)を共有して隣接

するとき、隣接辺(d23)の両側に長方形(c1234、d1234)が存在するが、整形前には、長方形(d1234)の「辺41(d41)」が長方形(c1234)の同じ辺番号の「辺41(c41)」に接続しており、「同じ辺番号で2つの四角形が隣接する整形後ではありえない隣接関係」となっている。これらは「方向フリップ」によって、長方形(d1234)の「辺23(d23)」が長方形(c1234)の「辺41(c41)」に接続するという、正しい接続に修正される。

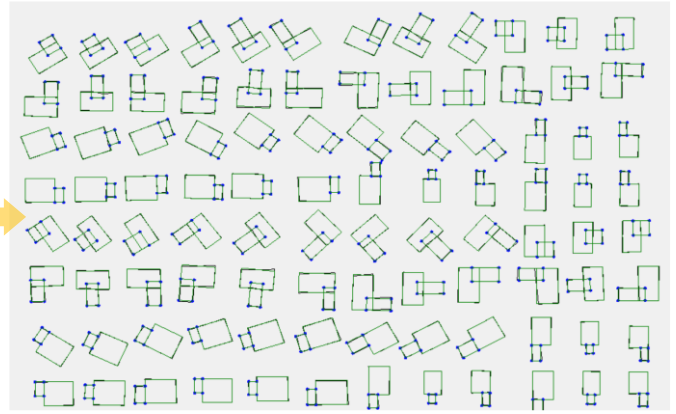
5. 片側延長型四角と主四角の全ての接続ケース

前記の同じ辺番号で2つの四角形が隣接する「整形後ではありえない隣接関係」も含めて、「片側延長型四角」と延長しない四角の2つの四角形の接続の全ての組み合わせを図6に示す。ここで、片側だけ枝屋根を延長する片側延長型四角を「枝四角」、枝屋根が延長される四角形を「主四角」とする。この2つの四角の全ての接続ケースは、主四角の各4辺に枝四角の4つの辺が接続、そして、その接続方法が「分割線の引き方」で3通り(「分割線を始点から時計回りに引く:Forward Dividing Line (FDL)」、「反時計回りに引く: Backward Dividing Line (BDL)」、「両側から引く:F&B Dividing Line(F&BDL)」)あり、さらに、2つの四角形のうち、どちらかがフリップするという場合を付け加えると、接続の組み合わせの数は $4 \times 4 \times 3 \times 2 = 96$ 通りある。

「分割線の引き方」で場合分けするのは、分割四角形の4つ目の頂点をポリゴン辺の交点として求める際、その辺の組み合わせが「3通りの分割線の引き方」で異なるからである。図6の建物ポリゴンの集まりの上から1行目において、主四角の辺 a12 に枝四角の4つの辺 b34、b23、b41、b12 が、各々3通りの場合で接続、図6の1行目、左端の「b34 c a12」は、「辺 a12 が辺 b34 を包含する形で四角形 A と B が隣接」していることを表す。2行目においては、フリップする可能性のあるほぼ垂直に立った枝四角が主四角の辺 a12 に各々3通りの場合で接続、次は逆に、ほぼ垂直に立った主四角の辺 a12 に、枝四角がその辺 b23、b41 で、各々3通りの場合で接続するケースである。図6の3行目以降は、主四角の残りの辺 a23、a34 と a41 について、同様に枝四角の4つの辺が3通りの分割線の引き方で接続、それから、ほぼ垂直に立った主四角と枝四角が接続するケースである。



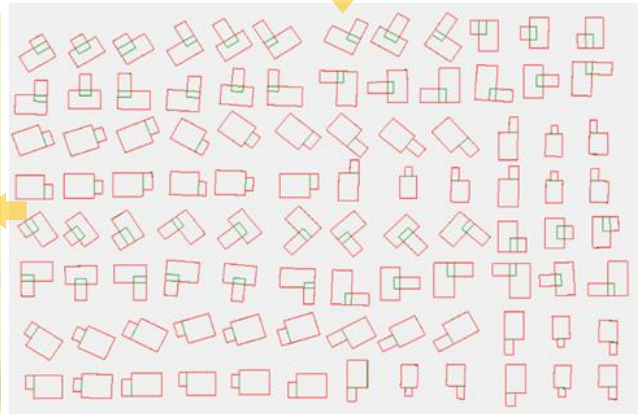
(a) 片側延長型四角と主四角の全ての接続ケース



(b) ポリゴン分割, 四角形頂点のラベリング, 四角形整形と直交化, 枝屋根延長



(d) 自動生成した3次元建物モデル



(c) 窓やドア等設置可能な壁(WDA壁)の明確化(red line)

図6 片側延長型四角と主四角の全ての接続ケースにおける建物ポリゴン分割, 四角形頂点のラベリング, 四角形整形と直交化, 枝屋根延長, 窓やドア等設置可能な壁(WDA壁)の明確化, 自動生成された3次元建物モデル

6. 両側延長四角形と主四角の接続ケースとまとめ

方向フリップが起こる「両側延長四角形」(以下、「両枝四角」と「主四角」が接続する場合において、ポリゴンの分割、ラベリング、枝屋根の延長、整形、WDA壁(窓やドア設置可能壁)の明確化のプロセスを下の図7に示す。ここで、整形前の図7(a)にて、四角形c1234を分割し、前記手法でラベリングを施し、「分割四角形の傾き」や「隣接辺(c23)」、「四角形整形のための起点(c3)」、「WDA壁明確化のための辺上の頂点(b3)」などの独立型四角形構築のための「設計諸元」を保存辺(Stored Edge)となるb23に保存する。ポリゴンを四角形の集まりまで分割し、主傾きなどを計算した後の整形処理にて、四角形c1234の傾きが主傾きと約180度は異なることを検出す

ると、「方向フリップ」を発生させて、四角形c1234の向きを「主傾き」にあわせる。同時に保存辺に保存された「設計諸元」も、「隣接辺」は「c23」から「c41」へ、「四角形の起点」は「c3(=b2)」から「c1(=b2)」に変更される。ここで、このケースでは、両枝四角b1234はフリップしないが、フリップする場合は、「WDA壁明確化のための辺上の頂点」は「b3」から「b1」、「四角形の起点」は「c3(=b2)」から「c1(=b4)」に変更される。従って、方向フリップを「両枝四角」と「主四角」において、想定しなければならない。また、整形後には、2つの長方形が一边(隣接辺:b23c41)を共有して隣接するとき、隣接辺(c41)の両側に長方形(b1234, c1234)が存在するが、整形前には、四角形(c1234)の辺c23が四角形(b1234)の同じ

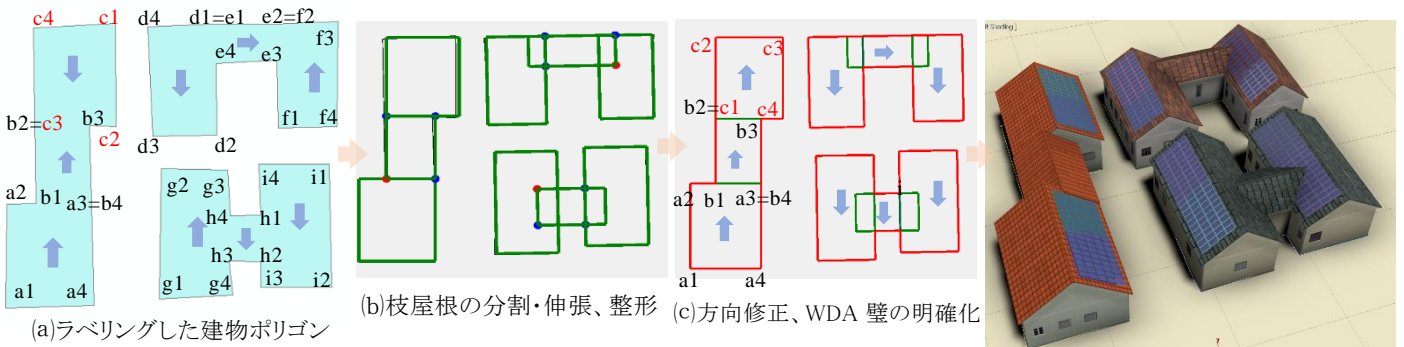


図7 方向フリップが生じる両枝四角と主四角の組合せで分割、ラベリング、方向修正、整形、枝屋根延長、WDA 明確化

辺、即ち、辺 b23 に接続しており、同じ辺番号で2つの四角形が隣接する「整形後ではありえない隣接関係」となり、「方向フリップ」によって修正される。

「整形後にはありえない隣接関係」も含めて、「両枝四角」と2つの「主四角」の全ての接続の組み合わせを図8に示す。ここで「主四角」の各4辺に「両枝四角」の4つの辺が接続、そして、その接続方法が「分割線の引き方」で3通りあり、さらに、2つの四角形のうち、どちらかがフリップするという場合を付け加えると、接続の組合せの数は $4 \times 4 \times 3 \times 2 = 96$ 通りある。ここで、両枝四角は、さらに、保存辺側からも延長する。

7. まとめ

四角形の集まりまで分割できる直角建物ポリゴンにおいて、各四角は隣の四角と共通の隣接辺を介して繋がり、場合に応じて枝屋根を隣接四角形に延長する。このとき、四角の両側の辺で他の四角と接し、両側で延長する四角、一つの四角と接し、片側だけ延長する四角があり、本研究では、それらの全てのケースを洗い出し、ソフト開発することにより、四角が枝屋根を延長するあらゆるケースを実現した。ここで、生成プロセスでの隣接四角形の検索時、ポリゴン形状はそのまま、整形後には「あり

えない隣接関係」もありうる。整形時、この隣接関係を検出して、「四角形の方向フリップ」を行い、方向を修正する。本研究では、両側延長四角形も含めた四角形の分割・整形による3次元建物モデルを自動生成する。

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 (2016) No. 2 p. I_167-I_174.
- 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, 2018.
- 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.

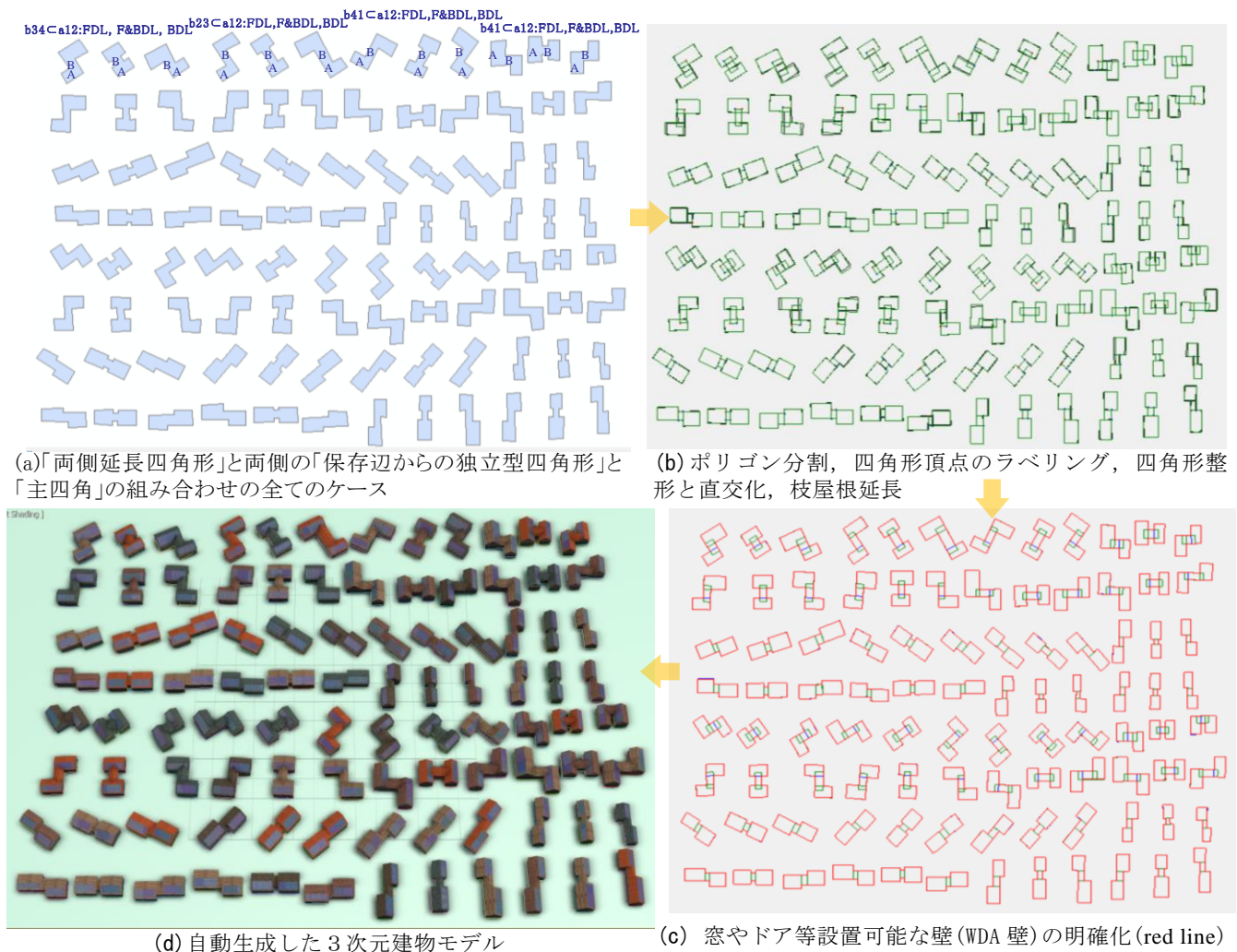


図8 「両側延長四角形」と両側の「保存辺からの独立型四角形」と「主四角」の組み合わせの全てのケース、ポリゴン分割, 整形と直交化, 枝屋根延長, 窓やドア等設置可能な壁(WDA壁)の明確化, 自動生成された3次元建物モデル