

(49) 建物の力学シミュレーションのための動的 3次元建物モデルの自動生成

杉原 健一¹・村瀬 孝宏²

¹正会員 岐阜協立大学教授 経営学部情報メディア学科(〒503-8550 岐阜県大垣市北方町5丁目50番)
E-mail:mjsbp812@yahoo.co.jp

²非会員 中京学院大学 短期大学部(〒509-6192 岐阜県瑞浪市土岐町2216)
E-mail: murase@chukyogakuin-u.ac.jp

これまでの研究で、電子地図上の建物境界線(建物ポリゴン)に基づいて、3次元建物モデルを自動生成した。この3次元建物モデルは、建物の出来上りのイメージを理解するための3Dモデルで、建物を構成する壁や窓や屋根板、屋根下構造物などの部材は「部材同士の重なり」を許容していた。本研究では、3次元建物モデルは「部材同士重なっておらず、力学シミュレーションを行える部材」で構成し、「力学的に安定」した建物の動的3Dモデルを自動生成することを目指す。本システムは、3次元仮想空間内で、「大量の移動要素と動的3次元建物モデルのインタラクション」を可能にし、「津波や土石流などの土砂移動現象と建物の間の相互作用を再現し、例えば、津波による3次元建物モデル倒壊のシミュレーション」を行えるシステムを提案する。

Key Words : automatic generation, dynamic 3D building model, building collapse simulation, CG, GIS

1. はじめに

都市計画や建築設計、特に、BIM (Building Information Modeling)のために「建物の3D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、津波対策のための「住居の高台移転の案」、あるいは、ソーラーパネルを備え、季節に応じて太陽光を導き、空気の流れを制御して冷暖房コストを抑え、災害時にも「持続可能な建物」の設計はどうあるべきか等をシミュレーションするには、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⁾²⁾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。本システムでは、建物ポリゴンを四角形の集まりまで分割するが、その過程で、分割された四角形(分割四角形)の傾きを計測し、外部のどの四角形のどの辺に、どのように接していたかを「隣接関係」の情報として「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

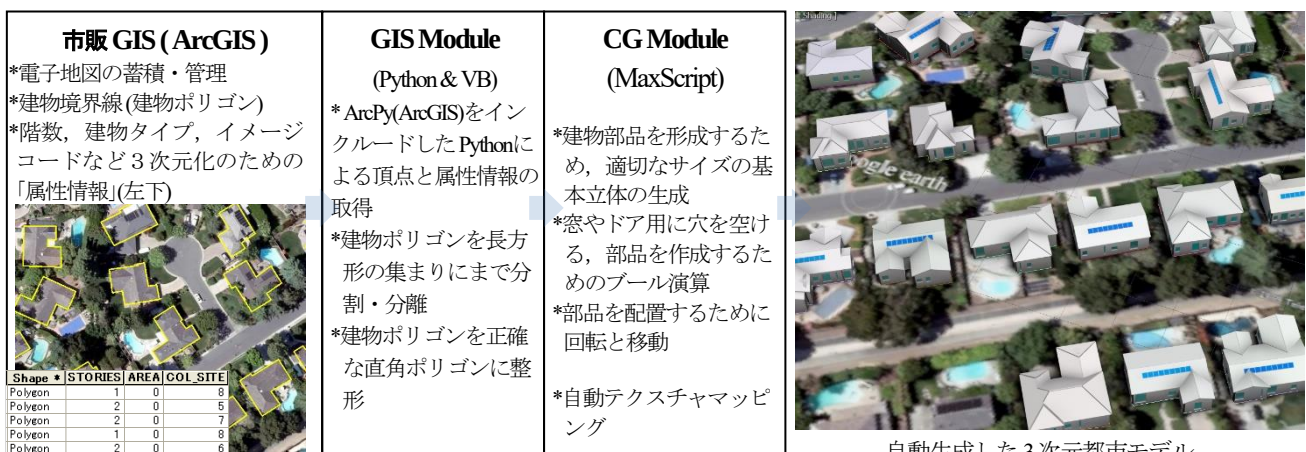


図-1 自動生成システムの構成と3Dモデルの自動生成のプロセス

付け)を通して行われる。これまでの研究²⁾で、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壁: Windows and Doors Available wall)」を明らかにする手法を提案した。本研究では、当手法を発展させ、3次元建物モデルを「構成部材同士が重なっておらず、力学シミュレーションを行える構造」で構成し、「力学的に安定」した建物の動的3Dモデルを自動生成することを目指す。本システムは、3次元仮想空間内で、「大量の移動要素と動的3次元建物モデルのインタラクション」を可能にし、「津波や土石流などの土砂移動現象と建物との相互作用」を再現し、例えば、津波による3次元建物モデル倒壊のシミュレーション(図-3)を行えるシステムを提案する。

2. 既往の研究

建物の3D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つ目は、まだ、存在しない、これから作る建物と街並みのための「まちづくりの合意形成」やBIM用に建物の3D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、CGやCADソフトで建物の3Dモデルを作り、それをパース図や下絵として利用し、まだ存在しない建物を作る立場である。昨今では、最初にBIMソフトで3Dモデルを作り、それを写像する形で「互いに矛盾のない多数の平面図、断面図等の設計図書」を生成する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³⁾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⁴⁾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。

本システムは、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、「横長切妻屋根」などの「長方形の長辺に垂直な頂線」を有する屋根も存在する。

3. 大量の移動要素と動的3次元建物モデルのインタラクション

雪崩や乾いた土石流は、それらを細かい要素にまで分けて、「粒子の流れ」とみなすことができるが、DEM(離散要素法: Discrete Element Method)はこれら粒子の流れをシミュレートするには最適のツールとされる⁵⁾。DEMは、多数の「粒子(要素)」の動きや効果を分析するための数値解析ツールの一つである。地盤や粉体などの物体を、自由に運動できる多角形や円形、3次元に拡張した球や多面体(polyhedra)の要素の集合体としてモデル化し、要素間の接触、回転、滑動を考慮して、各時刻におけるそれぞれの要素の運動を逐次追跡して解析する手法である。物体を実在する分子の集まりとして解析する「分子動力学」と比較されることが多いが、違いは「粒子の相互作用における回転」、「前の状態を覚えている接触(stateful contact)」、「粒子の様々な幾何形状(多面体を含む)」にある。DEMは、岩盤工学に適用するために Peter A. Cundall (1971)⁶⁾により発表された論文に端を発しており、現在は「液化化や土石流などの生じる地盤」や「粉体(化学工学、リチウムイオン電池、薬学、農学など)」の挙動解析に用いられている。

DEMをはじめとする力学シミュレーションでは、各オブジェクトが衝突しているかどうかの「衝突検出」を行い、「衝突の深さ」を測定し、この「深さ」に応じて、ニュートンの第2法則を用いて、力と加速度、移動距離を求めて、次の各オブジェクトの位置を求めるというサイクルを繰り返す。「衝突検出」は力学シミュレーションにおいて、もっとも重要なプロセスである。この衝突検出において、オブジェクトは「凸包(Convex hull)」でなければ、衝突検出ができない⁷⁾とされる。本研究では3次元CGソフトである3ds Maxの、物理シミュレーションを行う「MassFX」ツールを用いて、「大量の移動要素と動的3次元建物モデルの間の力学シミュレーション」を行った。

MassFXでは、「動的摩擦」、「静止摩擦」、「跳ね返り性(bounciness)」の各属性を持つ多数の球状粒子を用いて、DEMと同様に乾いた土石流の物理シミュレーションを行うことができる。MassFXにおいて、オブジェクトが「凹型形状(Concave)」の場合、「メッシュ詳細度」、「最小hullサイズ」や「hull毎の最大頂点数」などの値を指定して、それを「凸包立体の集まり」まで分離する。「メッシュ詳細度」を大きくすれば、「凸包立体の集まり」はオブジェクトを正確に表現することになるが、PCには大きな負荷を与えることになり、「正確な表現」と「PCの負荷」はトレードオフの関係となる。本研究において、「動的3次元建物モデル」の建築部材作成で、例えば、ブル演算で壁板に窓用の穴を開けた後は、壁板の形状は「凹型立体」となり、物理シミュレーションするために、「凸包

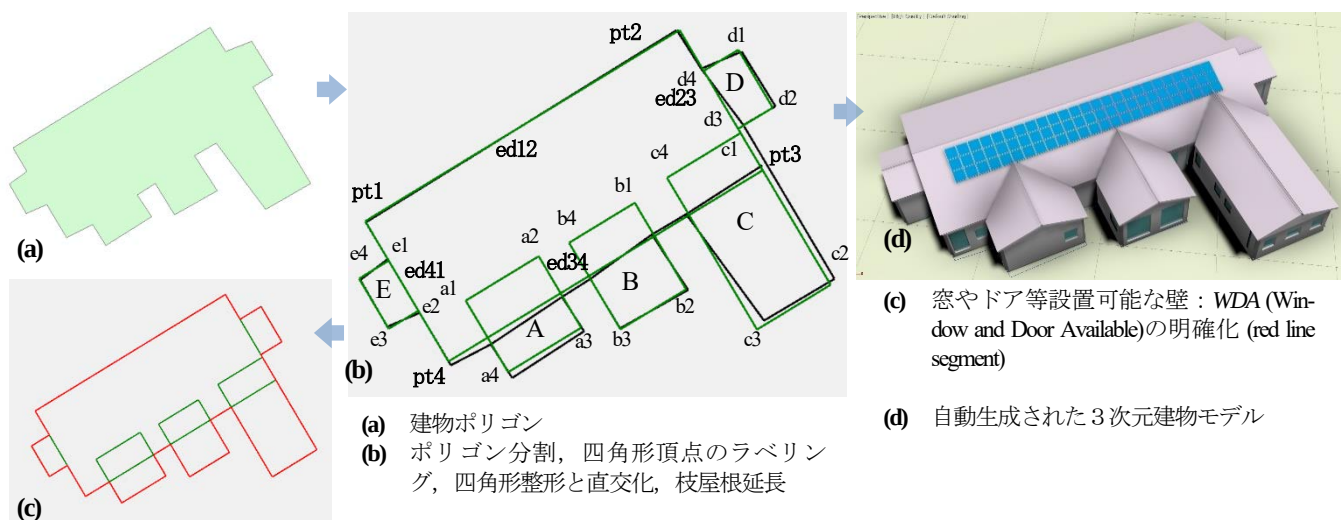


図-2 建物ポリゴン分割，四角形頂点のラベリング，四角形整形と直交化，枝屋根延長，窓やドア等設置可能な壁(WDA 壁)の明確化，自動生成された3次元建物モデル

立体の集まり」まで分離・分割する。「動的3次元建物モデル」は，このように構成部材を凸包立体の集まりまで分離し，次に，部材が重なって，フックの法則で反発しないように離し，力学的に安定するように，多数の部材を組み上げ，配置して建物を構築する。

4. 窓等設置可能な壁の明確化と部材の重なり防止

これまでの研究^{1)~3)}で，図-2(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-2(b)に示すように，「ラベリング(番号付け)」を行った。活性四角形の活性辺はどの辺か，隣接四角形のどの辺にどの様に接していたか，四角形の傾きなどは，四角形の頂点をラベリングすることで取得できる。図-2(b)で，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点1として，順に頂点のラベリングを行う。同じく，これまでの研究²⁾で，図-2(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「建物分岐部」と交差するという不具合を生じる。

図-2(b)の枝部D,Eと図-2(c)が示すように，建物ポリゴン再構築時に，切妻屋根の「妻」側に接続している枝部D,Eは，その屋根を延長しないと判断している。もし，延長してしまうと，部屋の中に屋根が突き出し，屋根延長部が壁板と重なり，フック法則で反発力が生じ，建物が倒壊してしまう。そこで，枝部の「活性辺」が隣接情報を取得し，隣接四角形が切妻屋根でかつ隣接辺が ed23,

ed41である場合，「延長しない切妻屋根」としている。

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⁴⁾でも述べたように，枝部を切り取る時，分割四角形の I D，分割辺の I D(ed12, ed23, ed34, ed41) と分割パターン(Forward Dividing Line: FDL 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「活性辺の主ポリゴン辺上の頂点情報」を取得する。
- (2) 本システムは，「活性四角形」が隣接四角形を見つけたとき，この切り跡の頂点数(n_v)を数え上げる。ここで，活性辺(Active Edge)の場合，壁がないので， $n_v=0$ 。
- (3) 切り跡の頂点群は，主ポリゴン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間の距離を計算する。
- (4) WDA 壁は「切り跡」と枝部の分割パターンに依存する。例えば，FDL があるときは FDL の起点が clock-wise で見て WDA 辺の最後の頂点となる。WDA 辺の個数(n_{wdh})がカウントされ，これら WDA 辺は図-2(c)の赤線で示す。
- (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 $n_{wdh}=0$ ，1枚壁があれば $n_{wdh}=1$ ，WDA 壁があれば，WDA 壁の枚数(n_{wdh})，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. 本手法の適用事例とまとめ

国が示した日本海側統一の津波断層モデルを使い，福井県が新たな想定により最大津波高が大幅に増加した福井県坂井市三国地区のオルソ画像を元に，津波シミュレ

ーションモデルを構築した。図-3 では、GIS上の津波浸水想定地域とされたオルソ画像と、その地区を囲むキー等高線と地区内の一部の建物境界線を元に、3次元地形モデルを生成し、建物境界線から動的3次元建物モデルの生成した図を示す。図-3 では、地形モデルとその上の大量の移動要素、そして、「動的3次元建物モデル」の間のインタラクションで建物モデルが倒壊する力学シミュレーションを示す。

本研究では、仮想空間内で「物理シミュレーションの行える部材」で「部材の物理形状(幾何形状とは異なる)が重ならないような構造」で構築された3次元建物モデルを自動生成し、「土砂移動現象を再現できる大量の要素群」を備えた3次元地形モデルを用いて、「津波による建物倒壊のシミュレーション」を行えるシステムを提案した。これらは防災科学における数値実験や防災教育の教材、整備案の合意形成などで、現実に近いイメージ、アニメーションを提供できる。

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, pp.476-488, 2013.
- 2) 杉原健一,村瀬孝宏：窓やドアの設置可能な壁を明らかにするポリゴン分割法による3次元建物モデルの自動生成, 土木情報学シンポジウム講演集 CG/AR/VR②, Vol.45, pp.101-104, 2020-9.
- 3) Pascal Müller, Peter Wonka, Simon Haegler, Andreas Ulmer, Luc Van Gool: Procedural modeling of buildings, *ACM Transactions on Graphics* 25, Vol. 3, pp.614-623, 2006.
- 4) Aichholzer, O., Aurenhammer, F., Alberts, D., and Gärtner, B.: A novel type of skeleton for polygons, *Journal of Universal Computer Science*, Vol.1 (12): pp.752-761, 1995.
- 5) H.Teufelsbauer, Y.Wang, S.P.Pudasaini, R.I.Borja and W. Wu: DEM simulation of impact force exerted by granular flow on rigid structures, *Acta Geotechnica* 6, Springer-Verlag, pp.119-133, 2011.
- 6) Cundall, P.A.: A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems. *Proceedings of the Symposium of the International Society for Rock Mechanics*, Society for Rock Mechanics (ISRM), France, II-8, pp.47-65, 1971.
- 7) Gino vanden Bergen: Collision Detection in Interactive 3D Environments, *Morgan Kaufmann Series in Interactive 3D Technology*, pp.23-24, 2004.



(a) 低い視点から見た自動生成した三国地区の3次元地形モデル上の建物モデル(堤防の高さ、地区の高さをGISモジュールで与えている)



(c) 津波が堤防(高さ3mとしている)を乗り越え始め、「動的3次元建物モデル」に接触し始めた状況



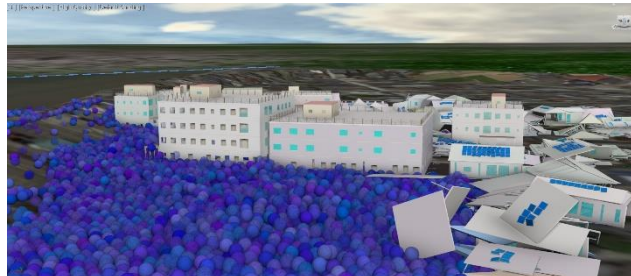
(e) 津波が堤防(高さ3mとしている)を乗り越え、「動的3次元建物モデル」を破壊し始めた状況



(b)「動的3次元建物モデル」は窓やドア等設置可能な壁に窓用に穴を開けた壁が「凸包立体の集まり」には変換していないので、窓が弾かれる



(d) 津波が堤防(高さ3mとしている)を乗り越え、「動的3次元建物モデル」に接触・破壊し始めた状況



(f) 津波が堤防(高さ3mとしている)を乗り越え、「動的3次元建物モデル」を押し流している状況

図-3 低い視点から見た自動生成した三国地区の3次元地形モデルと建物モデル(堤防の高さ、地区の高さをGISモジュールで与えている)、津波に相当する大量の移動要素と建物モデルの間のインタラクションで建物モデルが倒壊