

(30) ストレートスケルトン手法による内部構造を持つ地形モデルの自動生成

村瀬 孝宏¹・杉原 健一²

¹非会員 中京学院大学教授 中京短期大学部(〒509-6192 岐阜県瑞浪市土岐町2216)

E-mail: murase@chukyogakuin-u.ac.jp

²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: sugihara@gifu-keizai.ac.jp

基盤地図やGoogle Earthから現状ある「表面のみで成り立つ3次元地形モデル」の構築は可能であるが、地層などの内部構造を持つ3D地形モデルは現状ほとんど構築されていない。力学シミュレーションの行える要素で構成される内部構造を持つ3D地形モデルは、仮想空間内で、「地層が地表と平行となる流れ盤に沿う土砂崩れ」等の土砂移動現象を再現し、防災教育等を支援することができる。本研究では、この「内部構造を持つ地形」の基になる等高線群を、1本の外周線などのキー等高線から自動図出し、土石流や土砂崩れなどの土砂移動現象をシミュレートできる内部構造を持つ3次元地形モデルを自動生成するシステムを提案する。

Key Words : 3D terrain model, straight skeleton, automatic generation, debris flow simulation, CG, GIS

1. はじめに

地球温暖化が進み、気候の振幅が増し、異常気象により巨大化した台風や想定外の集中豪雨が甚大な被害をもたらしている。また、日本列島は地震活動期に入ったとされ、北海道胆振東部地震で丘陵地帯の大規模崩壊をもたらした。さらに首都直下型地震や南海トラフ巨大地震の30年以内の発生確率は非常に高いとされる。被害は、主に土石流や土砂崩れなど土砂災害によるものが多い。こうした災害を防止・軽減するためには、構造物によって土砂移動現象を無害化するような防災対策が急務であ

る。このためにも地質学など、土石流や土砂崩れのメカニズムを学ぶ防災教育が重要である。このとき土石流等のシミュレーションを行える3D地形モデルは防災教育には有効である。これまでの研究で、「キー等高線から表面のみで成り立つ3次元地形モデル」の自動生成には成功した。また、基盤地図やGoogle Earthから今ある「現状の表面のみで成り立つ3次元地形モデル」の構築は可能であるが、地層などの内部構造(図-1右参照)を持つ3D地形モデルは現状ほとんど構築されていない。本研究では、地層に相当する内部構造を持つ3D地形モデルを自動生成し、「流れ盤に沿う土砂崩れ」、受け盤斜面の

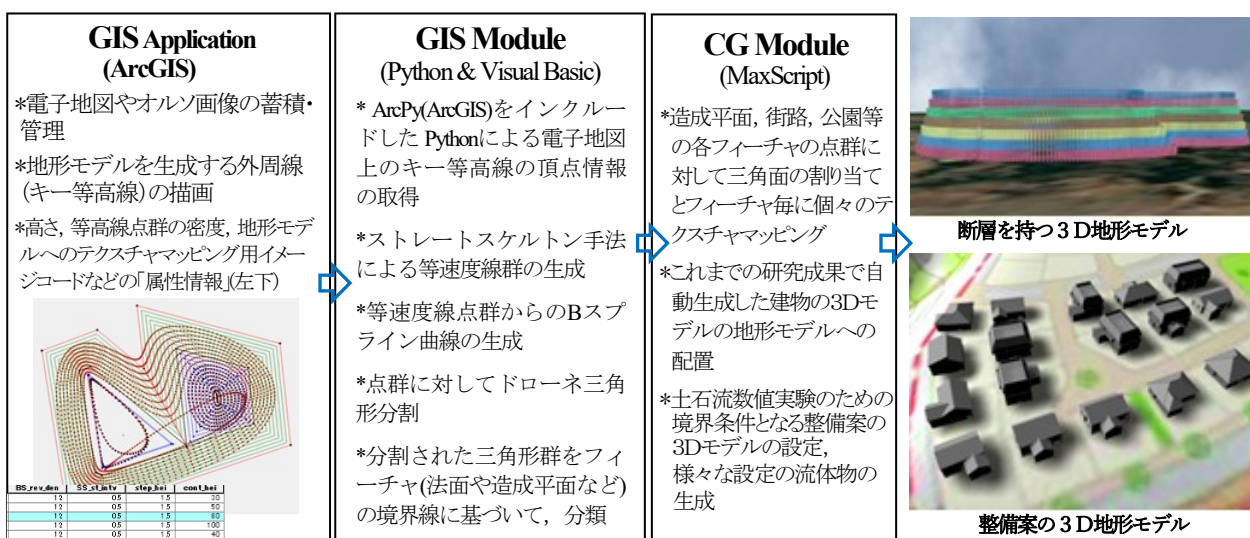


図-1 内部構造を持つ3D地形モデルの自動生成システムの構成と自動生成のプロセス

「トップリング」というような土砂移動現象を、仮想空間の中で、このレイヤーを持つ3D地形モデルで再現し、防災教育等を支援することを研究目標とする。ここで、「3D地形モデル」を作成するには、3次元CGソフト等を用いて、多大の労力と時間が必要である。筆者らは、これまでの研究で、図-1右の建物の3Dモデルが示すように、電子地図上の建物境界線(建物ポリゴン)を長方形の集まりまで分割・分離し、各長方形の上にBox形状の建物本体、上から見て長方形形状の屋根を載せて、建物3Dモデルを自動生成する手法を提案した¹⁾²⁾。本研究では、「内部構造を持つ3D地形モデル」の元になる「3次元地形モデル」を自動生成するシステムの研究・開発を目的とする。そのために、計算幾何学で注目されている「ストレートスケルトン手法(SS法)」を用いて、キー等高線から等高線群を自動的に描き、それらに基づいて、地形の3Dモデルを自動生成する手法を提案する。

2. 既往の研究

建物や地形も含む「3次元都市モデル」は、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、自動的あるいは半自動的に構築する研究が盛んである。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、リモートセンシングの技術を用いて、建物や地形の3次元形状を復元する。特に昨今では、3次元都市モデルの構築では、ドローン(無人機)による空撮写真から建物の屋根の形状を計測・点群化し、地上の3次元レーザースキャナーで計測した壁面部と合成し、点群による建物の3Dモデルを構築する研究などがさかんである。しかし、レーザースキャナーによる計測や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。

ここで、ドローン等による計測で、今ある現状の3次元都市モデルを構築できるが、整備案の3Dモデルはドローン等による計測だけでは構築できない。これは、「将来の整備案の3Dモデル」は、これから出来上がるもので、現在はまだないものであるからである。通常、整備案の地形モデルは、等高線群を作図して、それらに基づいて地形モデルを生成する。しかし、この等高線群を作図するには時間と労力がかかり、また、トポロジ的に変化する等高線群を描くのは技術的にも難しい。提案する本システムは、平面図上のキー等高線(地形を囲む外周線)を描くだけで、内部に等高線群の自動作図、そ

して、3次元地形モデルの自動生成まで行い、製作効率を著しく向上させる。

等高線の自動作図について、CADソフトの分野で代表的なオートデスク社の製品AutoCAD Civil 3D³⁾、及び、GIS(地理情報システム)で代表的なArcGIS⁴⁾では、高さデータの与えられた点群に対して、同一の高さである点群を等高線でつないで、等高線を描画する機能を持つ。

但し、この方法では、こうした高さデータを持つ点群データが前もって準備されていることが前提となる。この高さの与えられた点群を作成するには多大の時間と労力を要する。また、複数の等高線において、対応付けられた点を持つ等高線が、その間に内挿関数を用いて、対応付けられた点間を内分する点を順に求め、つなぐことで等高線を自動作図する機能を持つCADソフトは存在する³⁾。しかしながら、起伏する稜線などに見られるような複数のピークを持つ尾根において、高さを上げるとともに、順に後退していく等高線は、自分自身の等高線と交差して、トポロジーが変化する可能性がある。こうした等高線では点に高さデータがない場合、点の対応付けが困難で、自動作図することはできない。

本研究では、高さデータを持たない平面に対して、キー等高線(地形を囲む外周線)から、それに囲まれる「盛り上り」である3次元地形モデルを自動生成することを目指した。そのとき、外周線内部に3次元地形モデルの元になる等高線を描くには、外周線となるポリゴンの各辺がポリゴン内部に後退して行くとき、交差判定や辺消失判定を行いながら、縮小ポリゴンを描いていくストレートスケルトン手法が有効であると考え、当手法によって、3次元地形モデルを自動生成する手法を提案する。但し、Aichholzer⁵⁾らのストレートスケルトンの論文では、数学的にスケルトンを持つ性質、その証明は記述してあるが、スケルトンの構築方法の記述はないため、本論文の後半の構築方法は独自の手法である。

3. ストレートスケルトンによる等高線の自動作図

(1) ストレートスケルトン手法(SS法)とは

高さを上げるとともに、順に後退していく等高線は、複数のピークを持つ尾根に見られるように自分自身の等高線と交差して、トポロジーが変化する可能性がある。高度を上げるとともに、後退しない等高線や交差する等高線も理論的には考えられる。例えば、傾斜が90度以上の岸壁では等高線は後退しないが、通常は高度の上昇とともに、等高線は後退して、ある高さで等高線は自分自身と交差し、分離する。こうした等高線を描くには、後退と共に交差判定を行って生成されるストレートスケルトン手法(以下、SS法)が有効である。図-2(a)で示すよ

うに、交差していない形状の Simple ポリゴンにおいて、ポリゴンの各辺がポリゴン内部に、各辺自らに平行に一定速度で縮小するとき、各頂点の軌跡を辿ることによって得られる直線状の骨格がストレートスケルトンである。Simple ポリゴンの縮小プロセスは、次のイベントが生じるまで続く。

1) 辺消失イベント(Edge イベント) : 辺が縮小して消失する。消失辺の両側の辺が、以降は接することになる。

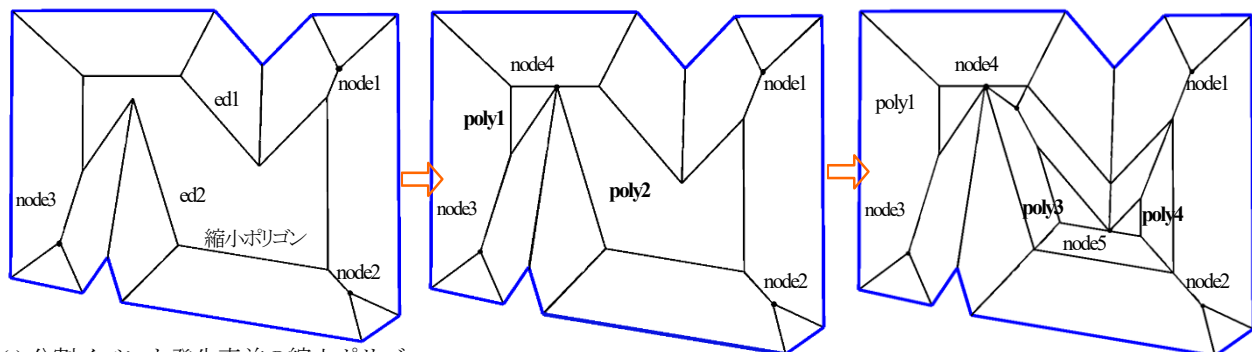
2) 分割イベント(Split イベント) : Reflex 頂点(内角が 180 度以上の頂点)が辺に交差して、ポリゴンを分割する。分割されて 2 本になった辺と Reflex 頂点に付随する辺が、以降は接するという新たな隣接関係が生じる。

ストレートスケルトンは一定速度でのポリゴンの縮小プロセスにおいて、各頂点が辿る頂角の二等分線(angular bisector)と上記のイベントを経て生じるノード(線分と線分をつなぐ頂点)の集まりとして形成される。図-2(a)は、縮小処理が進み、Reflex 頂点からの二等分線が伸びて、分割イベントが発生する直前の縮小ポリゴンを示す。図-2(b)では、二等分線と対向する辺がノード(node4)で交差して、分割イベントが発生し、ポリゴンは分割される、図-2(c)では、分割されたポリゴンで、さらに、分割イベントが発生し、2つのポリゴンに分割、図-2(d)では、等

速度で縮小するポリゴン群を全て表示し、辺消失イベントと分割イベントによるトポロジーの変化を表示している。図-2(d)の状態では、等高線を形成するための頂点(ノード)が少ないので、この頂点を制御点とする B-スプライン曲線を生成する。B-スプライン曲線はなだらかな起伏の地形モデルを生成するにはふさわしい自由曲線である。この B-スプライン曲線上の点群に対して、ドローネ三角形分割を行った結果を図-2(e)で示す。

本システムでは、3 DCG ソフト(Autodesk 社の 3ds MAX)のスクリプト言語で 3D モデルを自動的に作成するが、3 DCG ソフトには TIN サーフェスを点群に割り付ける機能を有するものの、スクリプト言語には、点群をドローネ三角形分割する機能がない。

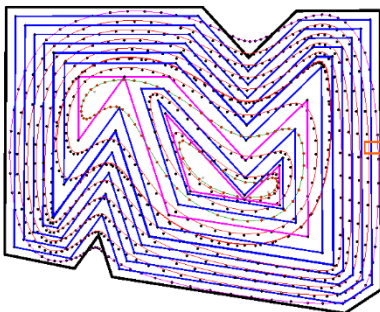
また、ドローネ三角形分割の処理には、自分自身を呼び出すことが必要であり、自分自身を呼び出すことのできる(recursive)言語体系でなければならない。そこで、図-1のGISモジュールにおいて、ドローネ三角形分割を行うプログラムを Visual Basic.NET で開発した。生成された点群をドローネ三角形分割し、分割された三角形群に三角面を割り当て、キー等高線に関連付けられた属性情報に基づいて、三角面群にテクスチャマッピングして自動生成した 3 次元地形モデルを図-2(f)で示す。



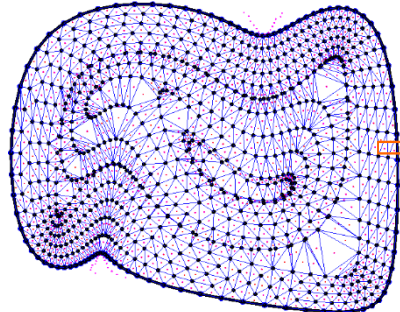
(a) 分割イベント発生直前の縮小ポリゴン、辺消失イベントで生じたノード：node1～node3

(b) 分割イベントが発生して、ポリゴンは2つのポリゴン(poly1 と poly2)に分割

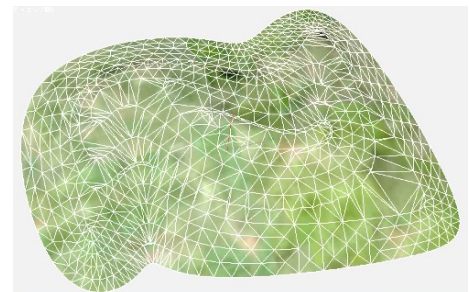
(c) 分割されたポリゴンで、さらに、分割イベントが発生し、2つのポリゴン(poly3 と poly4)に分割



(d) 一定速度で後退する全ポリゴン：辺消失イベントと分割イベント(pink)が生じてトポロジーが変化：B スプライン曲線(pale pink)生成



(e) 縮小ポリゴンから B スプライン曲線を生成し、B-スプライン曲線上の点群に対してドローネ三角形分割



(f) 点群より生成されたドローネ三角形に 3 次元 CG ソフトで三角面を割り当て、テクスチャマッピングして自動生成した 3 次元地形モデル

図-2 等高線生成のためのポリゴンの縮小プロセスと分割イベント、生成された点群にドローネ三角形分割、三角形群に三角面の割り当て、テクスチャマッピングして自動生成した 3 次元地形モデル

(2) SS法におけるイベントとは

図-2のポリゴンの縮小プロセスにおいて、ポリゴンの全辺の長さが短くなるわけではなく、長くなる辺も存在する。辺の両端の頂点の内角の和が360度以上であれば、その辺の長さは縮小処理で長くなり、内角の和が360度未満であれば、短くなり、分割イベントが起こらないかぎり、「辺消失イベント」でノードに収束する。縮小処理を一意に決めるパラメータは、縮小処理前後の辺間の距離：「縮小距離(=d_{shri})」である。分割イベントが生じないとして、i番目の辺に対して、「辺消失イベント」が生じる距離(=e_{d_{shri}})は次の式で与えられる。

$$e_{d_{shri}} = \frac{L_i}{(\cot(0.5 * \theta_i) + \cot(0.5 * \theta_{i+1}))} \quad (1)$$

ここで、 L_i は辺長、 θ_i 、 θ_{i+1} は辺両端の内角を表す。但し、辺両端の頂点の内角を2等分する線がポリゴン内部で交わるために、 $0.5 * \theta_i + 0.5 * \theta_{i+1} < 180^\circ$ となる必要がある。この条件を満たす全ての辺について、 d_{shri} を式(1)で求める。分割イベントが生じなければ、これらの d_{shri} の中で最小となる値が、「最初に辺消失イベント」が生じる縮小距離(d_{shri})となり、その辺が最初に消失する辺となる。本研究では、「分割イベント」は、縮小処理において最初に「辺消失イベント」が生じるまでの「 $e_{d_{shri}}$ 」の間において、分割イベントが生じるかどうかを調べ、分割イベントが生じた場合、その結果生じるノード(分割ノード)の位置を Reflex 頂点からの二等分線と交差する辺と Reflex 頂点の両側の辺との二等分線の交点として求め、2つの分割されたポリゴンを生成する。

4. まとめ

これまでの研究で、地形を囲む外周線であるキー等高線から、それに囲まれる「盛り上り」である3次元地形モデルを自動生成するシステムを開発した。本研究では、この3次元地形モデルに断層などのレイヤーを持たせることを目指した。そのためにキー等高線から、3次元地形モデルの基になる等速度線群を自動作成し、土石流や土砂崩れなどの土砂移動現象をシュミレートできる要素を「等速度線群」上に配置し、レイヤーを持つ3次元地形モデルを自動生成した。本システムは非常に効率よく内部構造を持つ3次元地形モデルを自動生成する。

参考文献

- 1) Sugihara, K. and Hayashi, Y.: Automatic Generation of 3-D Building Models with Multiple Roofs, *Tsinghua Science & Technology*, vol.13, pp.368-374, 2008.
- 2) 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, 2013.
- 3) Autodesk Knowledge Network: Autodesk AutoCAD Civil 3D: <<https://knowledge.autodesk.com/support/autocad-civil-3d/learn-explore/>>, 2019-05-11.
- 4) ArcGIS resources: <<https://pro.arcgis.com/ja/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-contouring-works.htm>>, 2019-05-11.
- 5) Aichholzer, O., Aurenhammer, F., Albers, D., and Gärtner, B.: A novel type of skeleton for polygons, *Journal of Universal Computer Science*, Vol.1 (12): pp.752-761, 1995

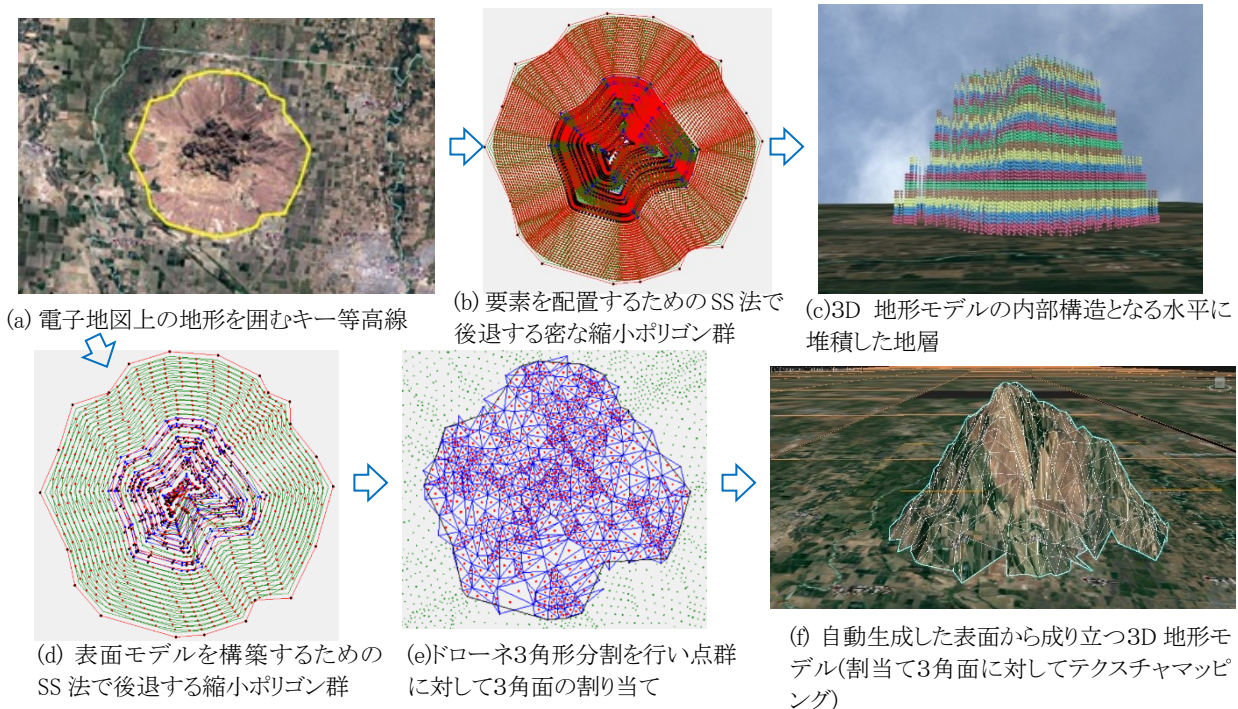


図-3 要素を配置するためのSS法で後退する密な縮小ポリゴン群、自動生成された内部構造を持つ3次元地形モデル、生成された点群にドローン三角形分割、三角形群に三角面の割り当て、テクスチャマッピングして自動生成した3次元地形モデル