ストレートスケルトン手法による３次元地形モデルの自動生成とその活用

○杉原　健一[*1]　沈　　振江[*2]

キーワード：ストレートスケルトン手法、３次元地形モデル、自動生成、等高線、自動作図、整備案

１．はじめに

復興まちづくり、あるいは、今後の南海トラフ巨大地震対策のために、デザイナーや専門家は、安全地区への集団移転とする整備案の検討を地図上で行う。そのとき、可能な限り環境負荷を低減し、生態系ネットワークに配慮した例えば、「地区に隣接する丘陵地と一体的な整備」等の整備案を地図と共に提案する。ここで、図１右のイメージ図に示すような整備案を具体的な形にする「３Ｄモデル」は、現実に出来るであろう「整備案」を分かりやすく周知し、合意形成に役立ち、「防災まちづくり」を支援する。しかし、整備案の３Ｄ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、それらを正確な直角ポリゴンに整形し、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)3)]。本研究では、「整備案の３Ｄモデル」を構成する整備した地形の元になる等高線群を自動作図し、「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（straight skeleton）手法」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（図１参照）。

２．合意形成のための３次元都市モデルについて

防災・環境政策を推進する整備計画の構想段階から住民等の関係者に参加してもらい、行政、住民、地権者、デザイナー等の専門家で、図１右のイメージ図に示すような「街区単位の整備案」の出来上がりのイメージを共有し、整備案を協議・検討していくことがより良い整備計画につながる。このとき、「実際に出来上がる整備事業」に近い「整備案の３Ｄモデル」が、時間をかけずに自動的に出来上がれば、協議で変更された案を関係者で共通認識し、円滑に合意形成を実現することが可能である。効率よく整備案の３Ｄモデルが構築できるということは、複数の人の提案を具体的な形にすることができることになり、人々は複数の整備案の中から、一番望ましい整備案を選ぶことができる。整備案を具体的な形にする「３次元都市モデル」（図１右）は、現実に出来るであろう「整備案」を分かりやすく周知し、社会的な合意形成を図るための住民参加の場として利活用が期待される重要な「情報基盤」である。

３．既往の研究

「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

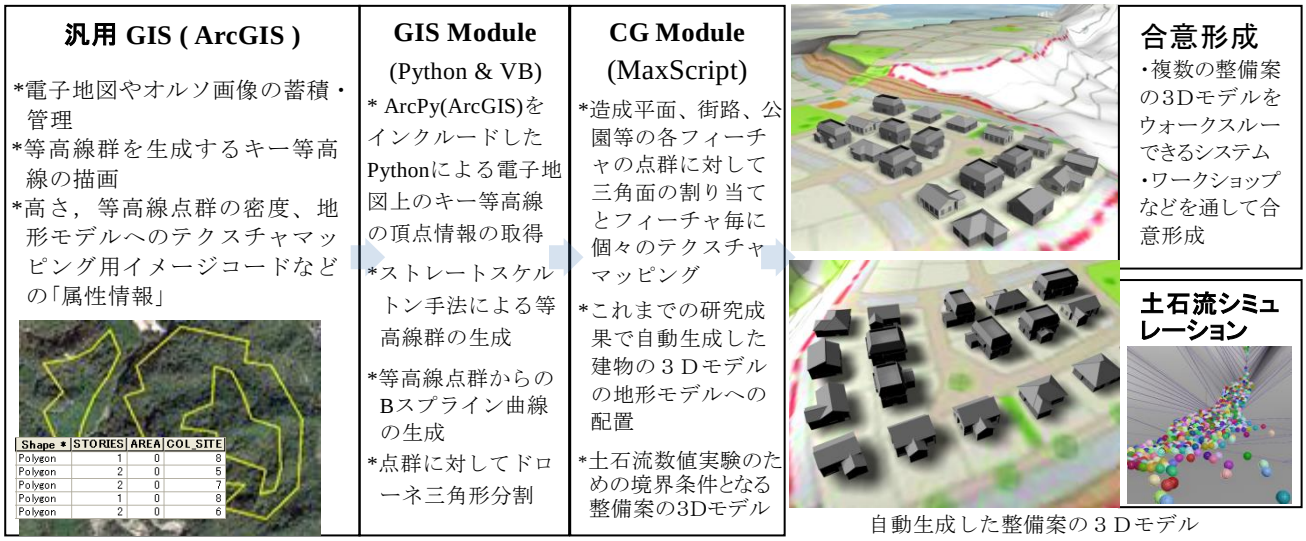


図１　整備案の３Ｄモデルの自動生成システムの構成との自動生成のプロセス

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[4]。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。

色情報が付加された「点群による建物や地形の３Ｄモデル」は３次元都市モデルの重要な情報源になるものの、現実味のある精緻な３次元都市モデルとは程遠い。「点群の３Ｄモデル」では、建物の壁や屋根は、同一平面上のカラー点群で表現されるが、点群はハフ変換や陰関数をフィティングする方法などで基本立体である薄い直方体(Box)である壁板や屋根板として認識されるべきである。同一平面上のカラー点群を屋根板と認識できれば、情報量を板の中心位置、法線方向、厚さと縦横の長さだけの情報に圧縮され、かつ、建物を精緻な３Ｄモデルで表現することが可能である。

計測した点群から建物の３Ｄモデルを構築する研究として、Saeedi[5]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、忠実度の目安としている。

ここで、ドローン等による計測で、３次元都市モデルは構築できるが、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、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、トポロジー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、制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 3D[6]、及び、ＧＩＳ(地理情報システム)で代表的な ArcGIS[7]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。この高さデータの与えられた点群を作成することがかなり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(interpolation function)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[6]。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。

例えば、ある領域で、２つのピークを持つ山に等高線が収束するような場合、２つのピークを囲むような１つの等高線が高さを上げるとともに後退していくとき、ある高さで等高線は自分自身に交差し、２つのピークを囲む２つの等高線に分離する。このとき、領域の全ての点において高さデータが与えられていれば、交差する点（鞍点：saddle point）も分かるが、高さデータが与えられていない場合は鞍点の位置を求めるのは困難である。

本研究では、高さデータを持たない平面図上のキー等高線（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において、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、当手法によって等高線群を自動作図し、３次元地形モデルを自動生成する手法を提案する。但し、Aichholzer[8] 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が持つ性質、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。

標高値(Z 値)を持つ等高線群があれば、ＣＡＤソフトや３次元ＣＧソフトは、それらを、Z 値を持ったポイントデータとして読み込み、これら点群を三角形面で覆うＴＩＮサーフェスという３次元地表面を作成する機能を持つ。但し、ＣＡＤや３次元ＣＧソフトは、数値データとなる点群データを読み込み、ＴＩＮサーフェスを作成する機能は持っていないので、本システムでは、独自に、各等高線上の点群に対して、ドローネ三角形分割で三角面を割り当て、ＴＩＮサーフェスを構築するシステムを開発した。また、３次元地形モデルは三角面メッシュを割り当てて構築するので、等高線といっても、等高線上に無限の点群があるわけではなく、等高線は、それを制

御する「有限個の点群」であるので、「既往の研究」では、前半で点群からの３次元モデル構築を調査した。

４．ストレートスケルトン手法による等高線の自動作図

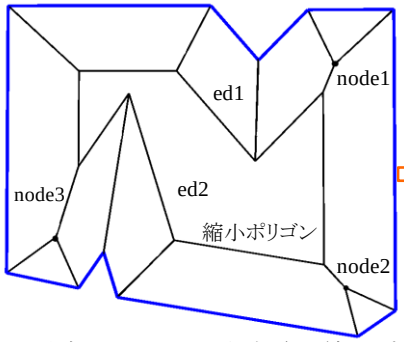
(1) ストレートスケルトン(Straight Skeleton)手法

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を形成する手法が有効である。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で得られる直線状の骨格が straight skeleton である(図３(c)の黒線で示すポリゴン内部の骨格)。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。

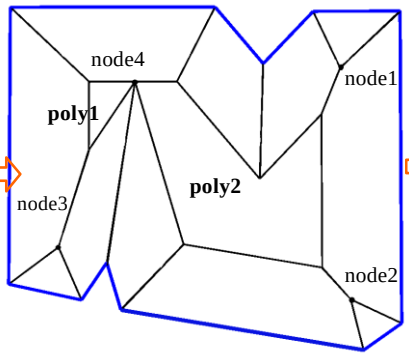
1) **辺消失イベント**（Edge イベント）：辺が縮小して消失する。消失辺の両側の辺が、以降は接することになる。

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。

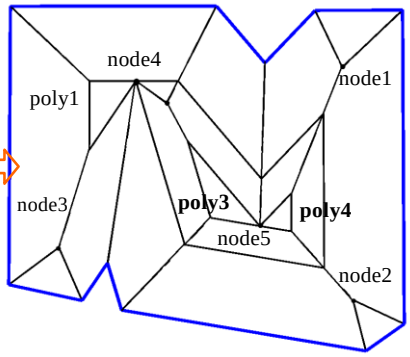
Straight Skeleton は一定速度でのポリゴンの縮小プロセスにおいて、各頂点が辿る頂角の二等分線(angular bisector)と以上の２つのイベントを経て生じるノード（線分と線分をつなぐ頂点）の集まりとして形成される。図２(a)は、縮小処理が進み、Reflex 頂点からの二等分線が伸びて、分割イベントが発生する直前の縮小ポリゴンを示す。図２(b)では、二等分線と対向する辺がノード(node4)で交差して、分割イベントが発生し、ポリゴンは分割される、図２(c)では、分割されたポリゴンで、さらに、分割イベントが発生し、２つのポリゴンに分割、図２(d)では、等速度で縮小するポリゴン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



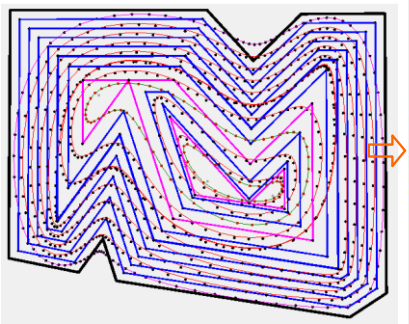
(a) 分割イベント発生直前の縮小ポリゴン、辺消失イベントで生じたノード：node1～node3



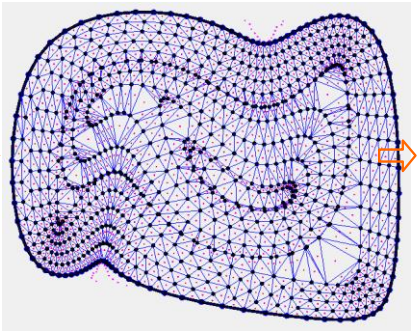
(b) 分割イベントが発生して、ポリゴンは２つのポリゴン(poly1 と poly2)に分割



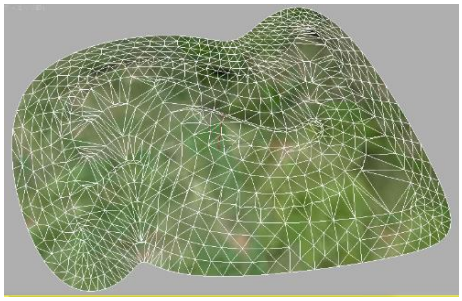
(c) 分割されたポリゴンで、さらに、分割イベントが発生し、２つのポリゴン(poly3 と poly4)に分割



(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

本システムでは、３次元ＣＧソフト(オートデスク社の3ds MAX)のスクリプト言語で精緻な３次元都市モデルを自動的に作成するが、３次元ＣＧ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(MaxScript)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、汎用ＧＩＳで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。

（２）Straight Skelton 手法の詳細

図２のポリゴンの縮小プロセスにおいて、ポリゴンの全ての辺の長さが短くなるわけではなく、図２(a) のReflex頂点を端点にもつ辺 ed1とed2 のように、縮小処理で、辺長が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。

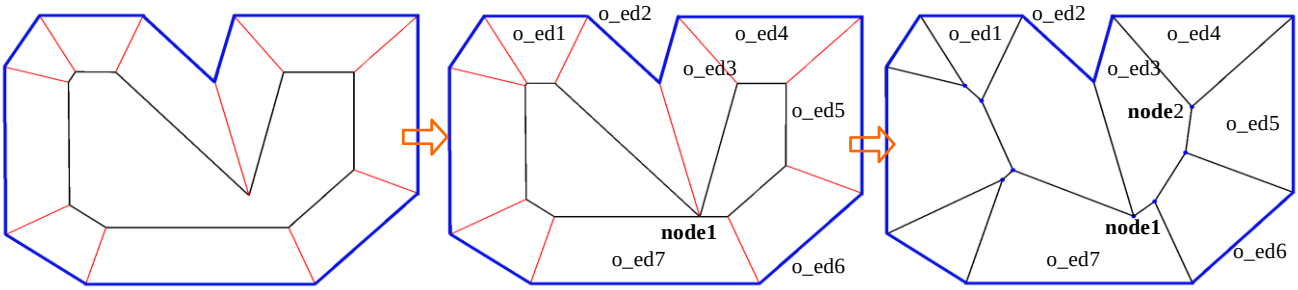
縮小処理を一意に決めるパラメータは、縮小処理前後の辺間の距離：「縮小距離(=d_{shri})」である。分割イベントが生じないとして、ｉ番目の辺に対して、「辺消失イベント」が生じる距離(=e_d_{shri})は次の式で与えられる。

$$\mathbf{e_d}_{shri} = L_i \Big/ (\cot(0.5 * \theta_i) + \cot(0.5 * \theta_{i+1})) \qquad (1)$$

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、$0.5*\theta_i + 0.5*\theta_{i+1} < 180°$ 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)の位置を求め(図３(d)参照)、ポリゴン分割することで分割イベント処理を行うこととする。

Straight Skeleton は、ｎ頂点のポリゴンのその内部をｎ個の「monotone polygons(単調変化ポリゴン)」に分割するという優れた性質を持つ。３次元地形モデルの尾根に沿った斜面となる monotone ポリゴンの形成プロセス、ノード位置の求め方を図３に示す。図３(a) と(b)では、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前後の縮小ポリゴン、二等分線と対向する辺が交差して、分割イベントが発生した様子を示す。図３(c)では、「monotone ポリゴンが」どのように形成されるかを示す。

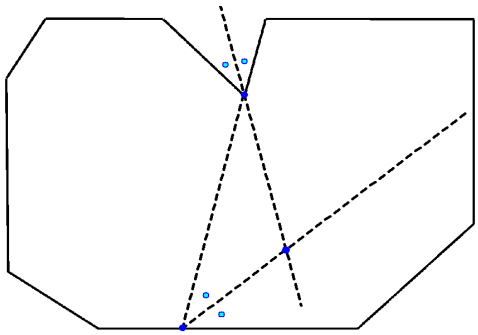
縮小プロセスが始まると、各辺は、「番号付けされた縮小プロセス前の元の辺 (original edge : o_ed_i)」からポ



(a) 分割イベント発生直前の縮小ポリゴン

(b) 分割イベントが発生して、ポリゴンは２つのポリゴンに分割

(c) ノードにどの３辺が収束したかの情報を持たせ、各辺はどのノードが同じ辺番号を持つかを調べ集め、ソートして、monotone ポリゴンを形成



(d) ノードの位置は２つの二等分線の交点で与えられる。その二等分線は、１つは Reflex 頂点からの二等分線と、２つ目は、それに交差する辺と Reflex 頂点を端点とする辺が交差する点からの二等分線。

図３　分割イベントにおけるノード位置の求め方と各 monotone ポリゴンの形成プロセス

リゴン内側へ、長さを変えてスイープ(移動)する。ノードは、辺消失イベントまたは分割イベントが起こって生じる。例えば、図３(c)にて、ノードである node2 は「辺消失イベント」で生じ、元の辺である o_ed3 から o_ed5 までがポリゴン内側をスイープし、その収束点である。システムは、node2 に対して、o_ed3 から o_ed5 までを、「ノードに収束する元辺 (original edge)」として、それらの辺の番号を関連付ける。一方、node1 は「分割イベント」の結果、生じ、２辺 o_ed2 と o_ed3 の間の Reflex 頂点からの二等分線とそれに交差する辺 (o_ed7) の交点である。

同様に、システムは node1 に対して、Reflex 頂点を端点とする２辺(o_ed2 と o_ed3) と Reflex 頂点からの二等分線と交差する辺 (o_ed7)を、「ノードを形成する元辺」として関連付ける。このようにノードは、少なくとも３つの元辺がスイープし、イベントが発生・収束して形成される。システムは、各ノードについて、どの元辺である３辺が収束したかの情報を持たせる必要がある。そして、「monotone ポリゴン」を形成するプロセスでは、元辺を順に辿り、各ノードに関連付けられている少なくとも３つの元辺の番号を調べ、自分と同じ番号であれば、その元辺に対する「monotone ポリゴン」を構成するノードとする。このようにして、３次元地形モデルの尾根に沿った斜面となる monotone ポリゴンを形成する（図３(c)参照)。

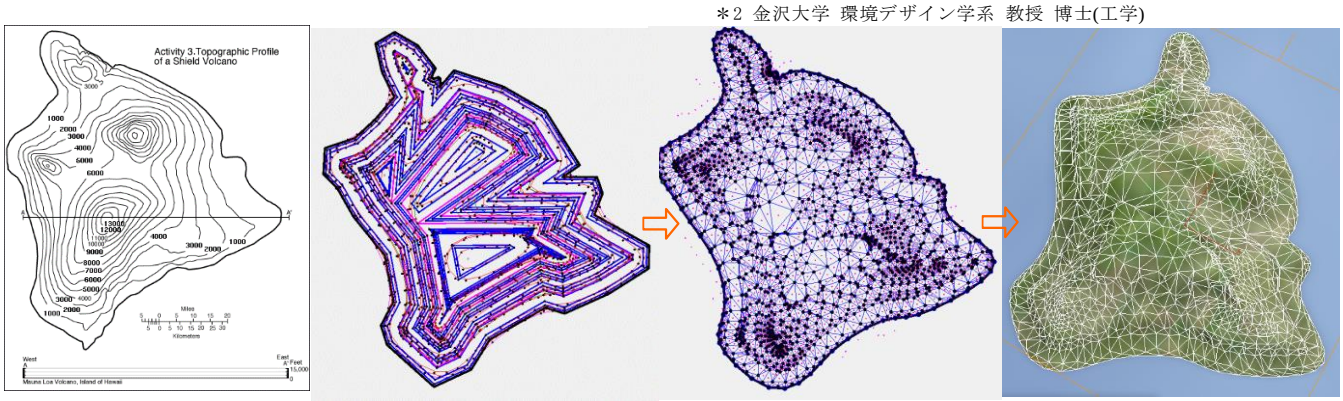
５．まとめ

復興まちづくり等の整備案を「具体的な形にする３Ｄモデル」は、現実に出来るであろう「整備案」を分かりやすく周知し、合意形成に役立つ。この整備案では、造成した地形が示されることが多い。この「造成する地形」は、これから作るものであり、ドローン等による３次元計測をするものではない。この「造成する地形」は、等高線から生成できる。本研究では、この３次元地形モデルの基になる等高線群を１本のキー等高線から自動作図するシステムを提案した。そして、本システムを適用した事例を図４に示す。本システムは非常に効率よく整備案となる３次元地形モデルを自動生成する。

[参考文献]

1) K.Sugihara, Y.Hayashi :“Automatic Generation of 3-D Building Models with Multiple Roofs”, Journal: Tsinghua Science & Technology (清華大學(中国)のジャーナル), vol. 13, pp. 368-374
2) Kenichi Sugihara and Junne Kikata: “Automatic Generation of 3D Building Models from Complicated Building Polygons”, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE (American Society of Civil Engineers、アメリカ土木学会) January 2012
3) Kenichi SUGIHARA: “Automatic Generation of 3D Building Models with Various Shapes of Roofs”, ACM SIGGRAPH ASIA 2009, Sketches, Visualization, 16-19 DEC, 2009. DOI: 10.1145/1667146.1667181
4) http://kenplatz.nikkeibp.co.jp/atcl/knpcolumn/14/546679/120700012/
5) Parvaneh Saeedi and Harold Zwick: ‘Automatic building detection in aerial and satellite images’, International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision - ICARCV, pp. 623-629, 2008, DOI: 10.1109/ICARCV.2008.4795590
6) Autodesk Knowledge Network: Autodesk AutoCAD Civil 3D: https://knowledge.autodesk.com/support/autocad-civil-3d/learn-explore/
7) ArcGIS websites: ArcGIS resources: https://pro.arcgis.com/ja/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-contouring-works.htm
8) Aichholzer, O., Aurenhammer, F., Alberts, D., and Gärtner, B.: ‘A novel type of skeleton for polygons’, Journal of Universal Computer Science, 1 (12): 752-761 (1995).h

＊1 岐阜経済大学 経営学部 教授 博士(工学)
＊2 金沢大学 環境デザイン学系 教授 博士(工学)



(a) ３次元地形モデル自動生成の目標とするハワイ諸島の Mauna Loa 火山の等高線 (andreamaryy.blogspot.com)

(b) edge-event 及び split-event を経て straight skeleton 手法による等高線の形成、縮小ポリゴンから B-スプライン曲線生成

(c) B-スプライン曲線上の点群に対してドローネ３角形分割、キー等高線を境界条件として、その中に入る３角形のみ３次元 CG ソフトへ出力

(d) 点群より生成されたドローネ３角形に３次元ＣＧソフトで３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４ 自動生成の目標とする等高線図、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、B-スプライン曲線生成、生成された点群をドローネ３角形分割、３角面を割り当てた３次元地形モデル

Automatic Generation of 3D Terrain Models by Straight Skeleton Computation

○Kenichi SUGIHARA*1 Zhenjiang SHEN*2

Keywords: Straight Skeleton Computation, 3D Terrain Models, Automatic Generation, Land Forming, Map Contour, Automatic Drawing

Japan is prone to several types of natural disaster, primarily earthquakes, typhoons and tsunamis. In 2011, Tohoku was severely hit by large-scale earthquake, and in 2016 powerful 7.0 quake has struck near Kumamoto. City officials and urban planners have drawn the maps for post-earthquake town reconstruction and large-scale earthquake countermeasure. 3D town models based on these maps are quite effective in understanding what if this alternative plan is realized. 3D town models will be constructed on the area where the town can be escaped from tsunami and landslide. For 3D town models construction, editing and modification of 3D terrain models are necessary for land formation and site preparation, and then 3D house models are placed on these sites. However, enormous time and labor has to be consumed to create these 3D models, using 3D modelling software such as 3ds Max or SketchUp. In order to automate laborious steps, we are proposing a GIS (Geographic Information System) and CG (Computer Graphics) integrated system for automatically generating 3D models, based on polygons of a digital map.

3D terrain models can be created from map contours or iso-lines. In most cases, the map contour lines are receded when the altitude increases. At the certain height, if receded map contour line is crossed by own line itself, then a contour line or a contour polygon is divided into two or more contour polygons. Accordingly, the polygon has to perform crossing detection by the polygon itself since the polygon reduces its size gradually. In this case, the straight skeleton computation is quite useful for crossing detection and shape reduction when the polygon is shrinking. The straight skeleton is defined as the union of the pieces of angular bisectors traced out by polygon vertices during a continuous shrinking process in which edges of the polygon move inward, parallel to themselves at a constant speed. The straight skeleton is unexpectedly applied to constructing general shaped roofs based on any simple building polygon, regardless of their being rectilinear or not. As shrinking process, each vertex of the polygon moves along the angular bisector of its incident edges. This situation continues until the boundary change topologically.

In our research, the straight skeleton computation is used for automatic drawing of map contour lines. Based on the map contour polygons automatically drawn, 3D terrain models are automatically generated, and then 3D house models are put on these prepared sites. For everyone, a 3D urban model is quite effective in understanding what if this alternative plan is realized, what image of a disaster prevention city will be. Traditionally, urban planners design the city layout for the future by drawing building polygons on a digital map. Depending on the building polygons, the integrated system automatically generates a 3D urban model so instantly that it meets the urgent demand to realize another alternative urban planning for disaster prevention.

*1 Professor, School of Management, Gifu Keizai University
*2 Professor, School of Environment, Kanazawa University