

3次元Delaunay三角分割によるCG用地形モデルの高速生成

岡山大学工学部

正会員 ○谷口健男

岡山大学工学部

学生員 岩崎和也

東急建設(株)情報システム部

正会員 二宮 功

東急建設(株)土木設計部

正会員 小澤靖一

1. はじめに

近年土木工学分野でも、ゴルフ場やスキー場、橋梁、高速道路、宅地造成などの計画をコンピュータグラフィックス(CG)を用いて、プレゼンテーションする事が日常的になりつつある。このCG利用の目的は、ゴルフ場の完成予想、橋梁の景観検討、工法や工事の説明資料など多種多様である。現在、CGの作成には、CADシステムが広く用いられているが、土木では不可欠である地形のCG化は、人工物と異なりCADシステムを用いて表すことは、一般に困難である。この困難さを克服する一つの方法として、2次元デラウニー三角分割を用いる方法が既に提案されている。¹⁾

そこで、本研究の目的は、CADシステムの利用が困難な地形のCG化について、新たに3次元Delaunay三角分割に基づいた手法を提案することにある。

2. デラウニー三角分割^{2) 3) 4)}と表面形状の生成

2. 1 デラウニー三角分割における3次元表面

デラウニー三角分割は、3次元空間に任意に設定された節点群から正四面体に最も近い四面体に分割された凸多面体を作成することができる。そのため、対象領域に凹凸があってもそれらを包括する凸多面体となり、生成された表面は領域の表面には一致しない。

そこで、凹凸のある領域のデラウニー三角分割における3次元表面を作成する方法として、デラウニー三角分割によって作成された、四面体の面である三角形を適切に組み合わせることで領域の表面を三角形で覆い尽くすことを考える。なお、表面生成によって得られた三角形は、デラウニー三角分割を利用しているために正三角形に近い形状をしている。

入力節点データについては、対象領域表面の幾何学的特性を十分に表現し得るだけの節点、つまり、曲率が小さい部分では疎に、そして曲率が大きな部分では密に点が分布するように節点群を配置するようにすることが望ましい。このように配置された節点群を用いてデラウニー三角分割を行うと、密に配置された節点どうしは接続される可能性が高くなるため、曲率の大きな部分についても表面となる三角形が作り出されることになる。

上述したように、本研究で提案する方法ではデラウニー三角分割法を基にしているため基本的には、「表面上に位置する点群の座標値」だけを入力データとする。なお、本研究では地形モデルを作成することを意図していることより、デラウニー三角分割の要求する節点のひろい方として(1)等高線上の節点(2)航空写真測量より得られた格子点の2種類を用いる。

2. 2 表面三角形の作成基準⁵⁾

ここでは、デラウニー三角分割によって生成された四面体の面である三角形を適切に組み合わせ、対象領域の表面を生成していくための三角形選択基準を説明する。

対象が滑らかな表面であると仮定すると、その表面を覆う2個の隣接した三角形は次のような性質を持つことが期待できる。

(1) 各々の三角形を構成する3個の点は互いに近傍に位置する。

(2) 2個の三角形の交角は大きい。

いま、表面上に位置する1個の三角形Lが与えられ、それに隣接する三角形Rを新たに設定しようとするれば、三角形Lの一つの辺を基にして上記2個の条件を満たすような1個の点を選択すればよいと考えられる。

(図1の点P) このようにして選択された点Pと基準とした辺からできた三角形Rとする。

次に、3次元体表面が滑らかでない表面で覆われている場合について考える。この場合上記条件の内、(2)が成立するとはいえない。

従って、条件(1)だけで点を選択しなければならない。

以上のことをまとめると、既に決定された三角形Lを基にしてそれに隣接する三角形Rを決定するために必要な点Pの選択基準として次式に示されるCを最大にさせる点とする。

$$C = \alpha \log \theta + \beta \log \phi$$

ここで θ は、三角形Lと三角形Rの交角を、 ϕ は節点Pと辺a bとの距離を示す値であり、また α は滑らかさ、 β は近傍度に関する重みである。

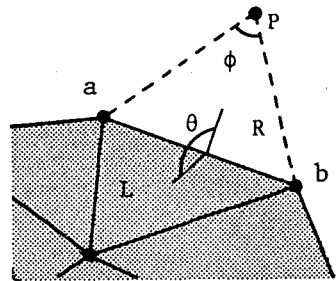


図1 節点選択基準

(図1参照) もし対象領域が滑らかな面である場合には、重み α を β に比べて相対的に大きく、また面が滑らかさに欠けるような場合には、逆に重みを設定すれば、対象物の幾何学的性質に関わらず表面決定を行うことができる。図2は、この判定条件において重みを変えることで表面決定が適切になされた例である。

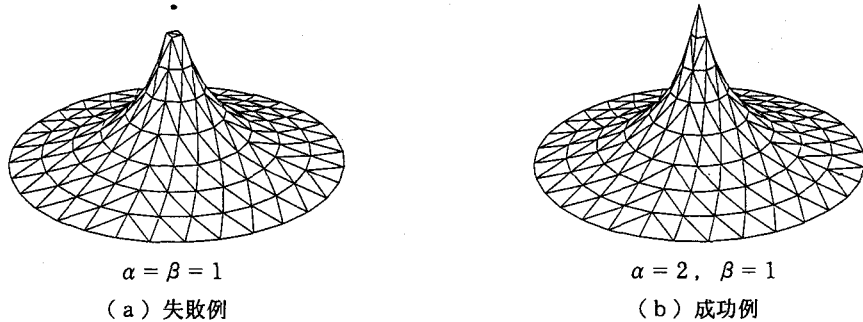


図2 表面作成例

2. 3 表面の生成

表面の生成は表面要素群の外周上に隣接する三角形要素から順番に行われ、分割にともなって図3のように表面生成が進んでいくことになる。この作業を表面上に位置することがわかっている全ての節点を使い尽くすまで繰り返し、その結果として表面領域を覆い尽くすことのできる三角形を生成していく。このようなメッシュ作成はフロントアル伝播法と呼ばれ、主に2次元領域に対して実用化されている。本研究で示した三角形の選択方法は、2次元フロントアル伝播法に2. 2節で述べた表面形状作成基準を用いて、3次元に拡張したものと言える。なお、本手法の対象とする領域は3次元体表面上の閉じた領域に限定される。それは、フロントアル伝播法の対象が閉じた曲面に限定されることによる。

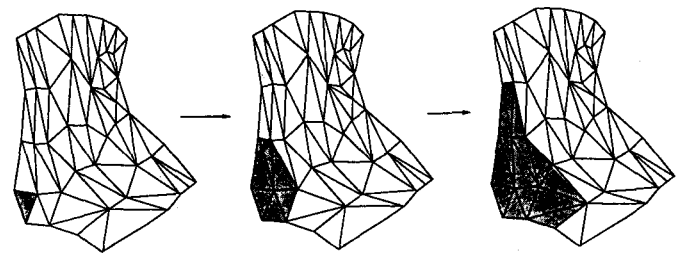


図3 表面三角形の伝播

次に部分表面生成の流れを示す。

step 1 節点-節点関係の作成

デラウニー三角分割の結果を用いて全ての節点についてその節点と接続されている節点を探し出す。これにより、仮に点Pと接続している節点が点Q、R、Sとすると、線分PQ、PR、PSはいずれかの四面体の稜線となっている。(図4)

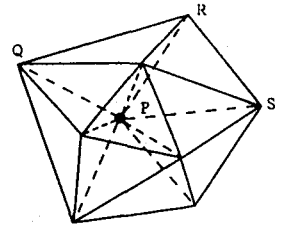


図4 節点-節点関係

step 2 基準となる境界三角形の設定

表面境界上に2点以上を持つ三角形のうち3つの節点を入力する。デラウニー三角分割の結果から四面体の面でかつ部分表面を構成する面となっているものをこの三角形要素とする。この要素を第1要素として、順次隣接要素を作成してゆく。

step 3 既に分割された要素集合によって作られる多角形の外周上の1辺と、節点選定基準により得られた節点を結んで三角形を作成する。ここで接続される節点は、step 1で求めた節点-節点関係をもとに、多角形の1辺の両端の節点のどちらにも接続した節点の内の節点選定基準を満たしたものである。

3. 地形モデルの生成法

対象とする地形モデルが幾何学的に複雑になると2. 3節で述べた基準だけでは、領域の表面が適切に作成されない場合がある。これを改善する方法は、いくつか考えられる。

1. 「対象領域を適切に表現し得る節点群」ということを考えて、適切に表面が作成されていない部分に節点をより密に配置して、デラウニー三角分割により再分割する。
2. 対象領域外の同一表面において曲率が急激に変わる場合等は、その表面内で同一の三角形節点基準の重みでは、表面を処理することは不可能である。そのためこのような場合には、対象領域を同一の重みで処理できるいくつかの部分系に分ける。次にそれぞれの部分系の表面上の点集合に対して、2. 2節の基準に対して、重みを変えて適用してその部分表面を作成する。このように、部分表面を作成した後、それぞれを境界線を用いて接合すれば、表面全体を構成することができる。

表面が作成されない場合、以上に示した方法を用いて再度表面の作成を試みる。

上に述べた2の手法を用いた地形モデルの生成法は次のような流れになる。

- step 1 部分表面に位置する節点の入力
- step 2 部分表面の節点を用いたデラウニー三角分割
- step 3 デラウニー三角分割によって得られたデータを入力
- step 4 各部分表面について α 、 β の入力
- step 5 各部分表面の生成
- step 6 部分表面接合のためのデータ入力
- step 7 部分表面の接合による地形モデルの生成
- step 8 データの出力

以上に示した方法を実際の地形データに適用する。その適用例を、図5、図6に示す。図5は、等高線に沿ってデータを入力した地形モデルである。また、図6は、航空写真のデータを利用した地形表面のモデルである。両者を比較すると、同じように3次元デラウニー分割を用いても、表面生成の状況は全く異なることが判明する。その理由は、節点位置の粗密の差によることは明かである。航空写真データでは、点密度は一樣であるのに対し、等高線より得られる点密度は一般に粗密の差が場所によってある。

以上より、航空写真データに対しては、本手法を採用してもよいが、等高線より得られたデータに対しては

1) 部分的な点の追加、もしくは2) より適切な三角形分割法の開発が必要と思われる。

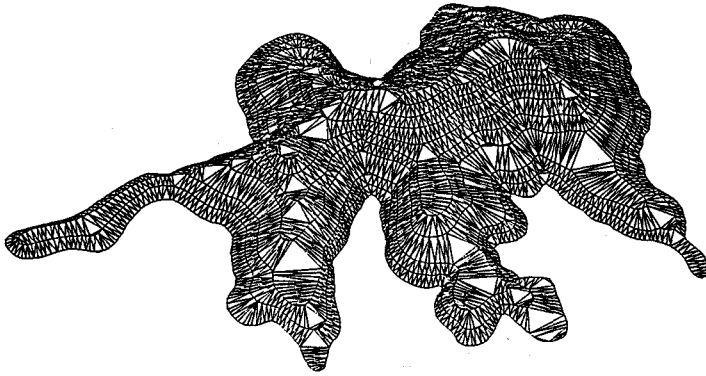


図5 等高線上の節点による地形モデル

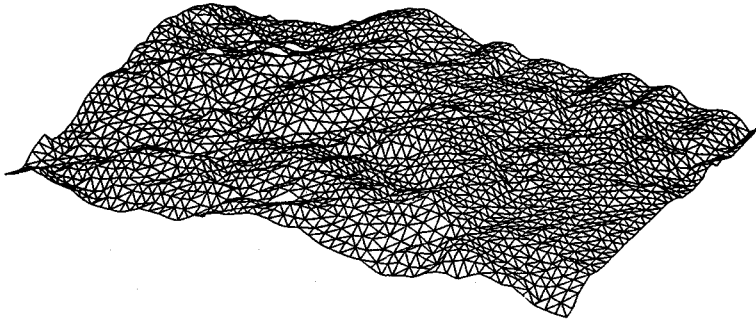


図6 航空写真測量を利用した地形モデル

4. まとめ

本研究では、デラウニー三角分割によるCG用地形モデルの高速生成法を提案した。この方法を用いると、

- (1) デラウニー三角分割を基にしているため、データの入力は容易である。
- (2) 表面の滑らかさ、および節点の近傍度についての重みを入力することで、表面形状の幾何学的性質に対応する事が可能である。
- (3) 対象とする地形モデルの表面上で、滑らかさ、節点の近傍度が変化する場合には、その面をいくつかの部分表面に分割してそれぞれの面を生成した後、それぞれを接続することでより複雑な地形モデルの表面生成が可能となった。
- (4) しかしながらデータの種類によっては、本手法を適用する際にデータの追加が必要と思われる。

参考文献

- 1) 二宮功、田村治幸、谷口健男、岩崎和也:階層構造をなす境界線を有した地形のモデリング、第8回NIC OGRAPH論文コンテスト論文集、pp. 268~273, 1992. 11
- 2) Bowyer, A.:Computing Dirichlet tessellation, The Computer Journal, Vol. 24, No. 2, pp. 162~166, 1981
- 3) Watson, D.F.:Computing n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes, The Computer Journal, Vol. 24, No. 2, pp. 167~172, 1981
- 4) 谷口健男、太田親: 3次元凸多面体の四面体有限要素自動分割、土木学会論文集 No. 432/I-16, pp. 137~144, 1991. 7
- 5) 谷口健男、太田親: 複雑な境界形状をした3次元体の要素自動生成、構造工学における数値解析シンポジウム論文集第15巻、pp. 127~132, 1991. 7