

I-6 自然な地形上に位置する土木構造物のCGデータの生成

Generation of CG data for civil structures on a natural ground surface

横山信之*¹
Nobuyuki Yokoyama

谷口健男*²
takeo taniguchi

二宮功*³
Isao Ninomiya

小澤靖一*⁴
Yasukazu Ozawa

【抄録】自然物と人工物との組み合わせ、例えば自然な地形表面上に作られた土木構造物、のCGデータの生成は今日多くの工学分野で有効に利用されているCADシステムでは取り扱いが困難である。本研究では前者をDelaunay Triangulationで、後者をCADを用いて生成し、それらのデータを組み合わせ、結合部を厳密に修正して、全体のCGデータを作り出す手法を提案し、その有効性を検討する。

【Abstract】 In this paper the authors propose new fast data generation method for the computer graphics which is effectively used in civil engineering field. The method is divided into three functions. The first function generates triangles which can cover any natural ground surface, the second function operates to generate surface of artificial 3D body, and the last function defines whole triangles of these two kind of surface. Proposed method is based on the Delaunay Triangulation. The method can generate not only all contour lines but also triangles to show actual topography. A number of test problems show the efficiency of the proposed method.

【キーワード】 コンピュータグラフィックス、CAD、デローニー三角形分割、等高線、境界

【Keyword】 computer graphics, CAD, Delaunay Triangulation, contour, boundary

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、トンネル、高速道路、宅地造成から大規模なリゾート等の計画をプレゼンテーションするにあたり、コンピュータグラフィックス（computer graphics、以下CGと略す）が無くてはならない強力なツールの一つとなりつつある。CGを利用すると、その形状を三次元的に可視化できることになり、設計図面などでは伝わりにくい全体像を掴むことが容易になるだけでなく、数値データを用いることにより、画像データの加工・保存などの処理も容易に行えるという利点がある。しかし、CGの作成はその表面的な華やかさに比べそのデータ作成には多大な労力を必要とする。現在、CGを作成するには多くの場合CADを用いて行うことが

多いが、建築、機械、造船、航空機、電気などの分野に比べ土木工学分野でのCADの導入は遅れていると言える。その最も大きな要因の1つとして、建築、機械、造船、航空機、電気などの分野では、機械の部品などに代表されるように、その形状に規則性を有するものを取り扱うことが多く、関数を利用してその境界を作り出すことができるが、土木工学分野では、地形表面などの形状の定義の困難な自然発生物を取り扱うことが多いことより、形状の表現が非常に困難であるということが挙げられる。そのためCGの作成は手作業によるところが大きく、それが土木工学でのCG化の遅れとなっている。よって地形表面などの自然発生物を含んだCGを簡便にしかも高速に作り出す画像処理システムの構築が強く望まれている。

*1 岡山大学大学院・院生

*2 岡山大学工学部・教授

*3 東急建設株式会社 情報システム部

*4 東急建設株式会社 施工本部土木設計部

連絡先 〒700 岡山市津島中3-1-1
岡山大学工学部 共通講座
谷口健男

そこで本研究では、有限個の節点座標を用いて地形表面のCGを高速に作成する手法をまず定義する。地形のCG用データは物の表面をすき間なく覆いつくす三角形であり、そのようなデータをつくる方法の1つとしてFEMでの要素自動分割法が挙げられる。本研究では二次元領域の要素分割法の中でも広く用いられてきたDelaunay Triangulation^{1), 2)}を利用して、地形表面など複雑な形状の画像処理システムの構築を行う。

Delaunay Triangulationの特色として、点座標が与えられたならば、それら点を用いて幾何学的に点群が覆う凸領域を三角形に分割できることが挙げられる。一方、地形などでは地図といった媒体を使って、地形の特色を十分に表し得るだけの点を拾い出すことは容易である。そこで、Delaunay Triangulationを直接利用した場合の問題点を挙げる。

まず、この方法を用いると対象とする領域の境界上の点を入力する必要がある。しかしながら、地図などを用いて点を拾い出すことを想定すると多くの場合、同一等高線上の点を順に入力することが多く、扱う領域の周辺を囲む点を別個に入力することは付加的な労力を要求することになる。従って、この領域を定義する方法の自動化が一つの問題である。

第二の問題はDelaunay Triangulationは単なる幾何学的な三角形分割であり、従って等高線が厳密に生成されるとは限らないという点である。

第三の問題点は第二の問題と同じ原因で地形的に凹部であっても、複雑な地形ではその凹部を表現できず、いわゆる棚田を生成してしまう点である。

以上の考察より、

境界上の節点入力を必要としない。

等高線を表示できるような三角形に分割できる。

地形状態を表示できる様な三角形群を生成できる。

という条件を満足させることができるように、

Delaunay Triangulationを修正できればよい。

さらに土木構造物などの人工物のCGは市販のCADで作成できるので、地形表面のCGと土木構造物のCADデータとを合成し地形表面を加工することによって、自然な地形上に位置する土木構造物のCGを作成する手法を提案する。ここでは、従来の画像処理システムで表現が困難であった地形表面と土木構造物との結合部分を厳密に表現する。

2. 地形表面の作成

2. 1 Delaunay Triangulation

平面上において任意に分布した点を結んで三角形分割して、形状を表現する問題は、工学の分野、特に有限要素解析で頻繁に生じ、その研究・開発が進められてきた。その中でもDelaunay Triangulationは

・対象とする節点群の存在位置を問うことなくそれら節点をすべて用いて三角形を生成することができる。

・作成された三角形の外接円内部には他の節点を含まないという数学的保証が与えられている。(つまり、Delaunay Triangulationでは正三角形に近い三角形が作成される)

といった点で優れているので広く用いられてきた。しかしこの手法にも次のような欠点がある。

・幾何学的に複雑な凹凸のある境界に囲まれた任意領域に対しては適用できない。すなわち、境界の凹部といった領域外部についても三角形分割を行ってしまう。

・複雑な境界を形作る境界上の辺を生成できない場合が発生する。

・多連結領域(穴のような内部境界を有する)の場合、三角形分割の不要な穴の内部についても三角形分割してしまう。

以上示した欠点を取り除き、任意領域の内部だけを三角形分割できるように改良した修正Delaunay Triangulation³⁾が既に提案されている。しかし既存の修正Delaunay Triangulationでは、境界条件を入力データとして必要なため、総節点数、境界個数、各境界上の節点数および節点番号、節点座標値を入力しなければならない。そのため入力データの作成に多大な時間と労力が必要であると同時に計算に大量のメモリーと時間を必要とし、膨大な地形データを取り扱う場合には不向きであった。そこで、本研究ではDelaunay Triangulationを改良し、境界を境界データを入力しないで作成し、地形データを三角形分割する手法を提案する。

本研究ではまず x, y 座標を用いて二次元Delaunay Triangulationを適用し、領域を三角形分割しその後三角形を修正することによって地形表面を生成する。

2. 2 境界の生成

まず対象とする地形データの外周の境界を生成しなければならない図1の辺 a, b のように境界を構成する辺が等高線をまたいでいるとき、その三角形 X を取り

除き、代わりに辺 $a c$ 、 $b c$ が境界の辺になる。これを境界に等高線をまたいだ辺が無くなるまで続けることによって境界を生成できる。しかし任意の境界形状を取り扱うことを目的とするので境界が図2 (1)のように凹曲し

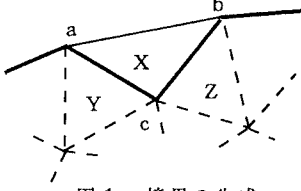


図1 境界の生成

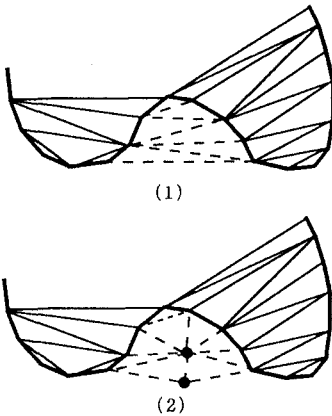


図2 境界外側の不要な三角形の削除

ていて、しかも全て同じ高さの点のとき境界外側に不要な三角形が必然的にできてしまう。この三角形は図2 (2)のように周りの点と等高線の高さの間隔以上に高さの差のある点を配置することによって消すことができる。ただし、ここではユーザーに入力データに点を追加してもらわなければならない。

2.3 等高線の生成

ここで作成された三角形は数学的に正三角形に近いだけなので、その後 z 座標を用いてその三角形をチェックし、等高線をまたいでいる辺を持つ三角形を修正することによって三角形の辺によって全ての等高線を表示するようにしなければならない。その修正の手法は、図3 (1)のような三角形 $a b c$ の辺 $a c$ を考える

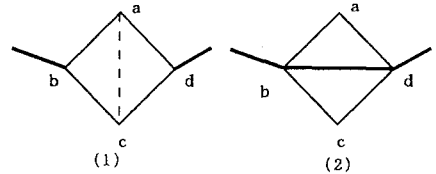


図3 等高線の生成

と、点 a 、 c の高さの差が等高線の高さの間隔より大きいとき辺 $a c$ で三角形 $a b c$ に接する三角 $a c d$ を用いて図3 (2)のように切り直す。等高線をまたいだ辺が無くなるまで続けることによって等高線がすべて三角形の辺によって表現できる。ここまでのアルゴリズムで作成された地形の図を図4~6に示す。

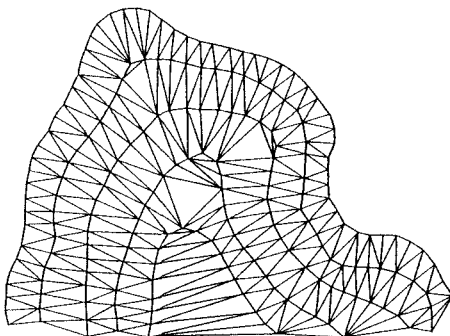


図4 地形表面 (2次元表示)

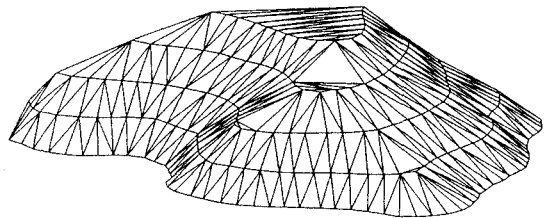


図5 図4に隠線処理を行った結果 (3次元表示)

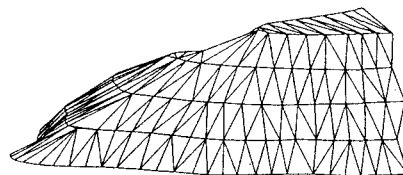


図6 図4に隠線処理を行った結果 (3次元表示)

2. 4 柵田の解消

2. 3までで等高線は表現できたが、等高線が凹型に湾曲しているところでは三頂点とも同じ高さの点で構成された三角形ができ、斜面なのに平面（柵田状）のようなところが出てしまう。これはCG化したとき実際の地形表面と食い違ってくる。また、メッシュ法で土工量計算を行った場合にもその算定量が違ってくる。このため、切り直す必要がある。以下にその手法を示す。

まず三頂点とも同じ高さの三角形の集合図7 (1)の多角形 a b c d e のような図形を探し出す。この三角形群に f, g のようにまだ等高線の続きがあるとき、

これは平面ではないので図7 (2) のように切り直す。

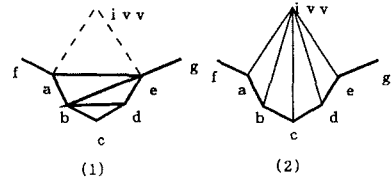


図7 柵田の解消

作成された図を図8～13に示す。図4と図8、図5と図9、図6と図10を比較すると柵田が解消されたことがよく解る。図11～13は節点数の多い大規模な地形の図である。

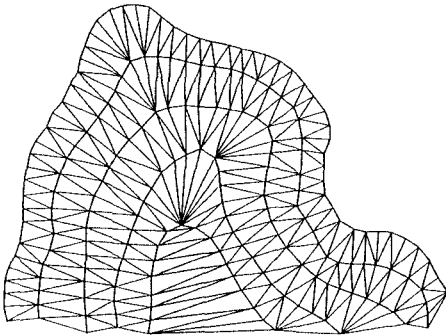


図8 地形表面（2次元表示）

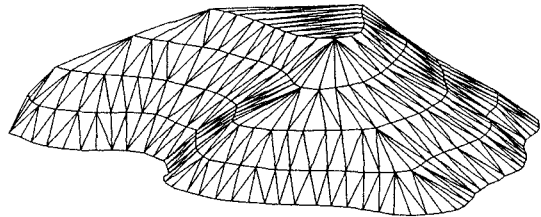


図9 図8に隠線処理を行った結果（3次元表示）

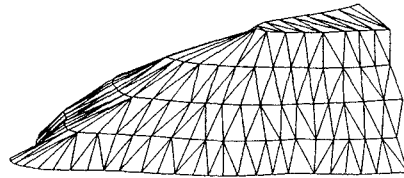


図10 図8に隠線処理を行った結果（3次元表示）

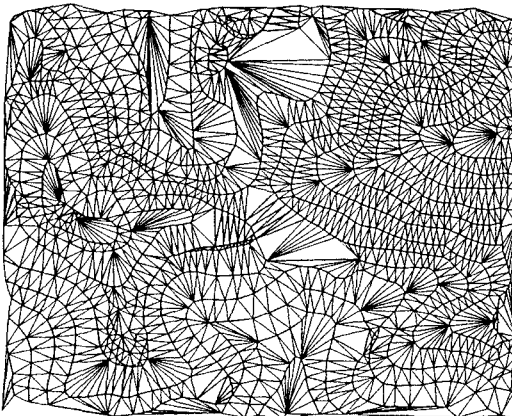


図11 地形表面（2次元表示）

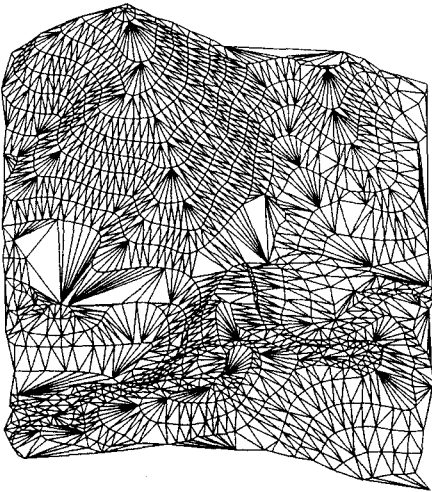


図12 地形表面（3次元表示）

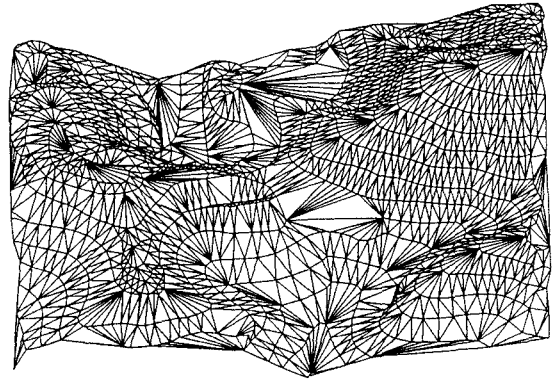


図13 地形表面（3次元表示）

3. CADによる人工物の作成

近年の土木工学以外の分野のCADはある程度確立されていて、構造物などの人工物のCGは市販のCADを利用して容易に作成できる。しかし、地形と人工物の2つのCGを合成するにはそれらデータの等一が必要である。CADの図面データは非常に圧縮された形式で記憶されているので、他のプログラムに直接読ませることは困難である。また、異なった計算機や異なったCADのデータの内部形式も異なっている。そこで本研究では汎用性を高めるためにCAD側のデータを一度DXFファイルに変換し、そのDXFファイルをプログラムに読み込ませることによって、CAD

で作成された人工物のCGを2. で作成した地形表面に取り込む。DXFファイルは簡単に他のCADシステムの書式に変換したり、またその逆も行えるので本研究ではこの方式を用いる。円柱のDXFファイルを図14に示す。CADで作成された構造物のDXFファイルは三角形と四角形の集合である。また書式も文字と数字が混在している。これを地形表面に合わせて、四角形は二つの三角形に分割し、表面を覆う三角形の集合のデータに変換して取り扱う（図15）。

本研究では日本鋼管株式会社製の Design CAD 2-D/3-D Ver.3を用いてCADデータを作成した。

```

0          20          .
SECTION   -8.7442     .
2          9          .
HEADER    $EXTMAX    .
9          10         .
$ACADVER  19.0000    .
1          20         .
AC1004    8.6224     -0.0000
9          9          0
$EXTMIN   $LIMMIN   ENDSEC
10         10         0
0.4252    0.4252    EOF
    
```

図14 DXFファイル

```

60        116
1         2         3
1         3         4
1         4         5
32        59        60
.
.3000000D+01  -.3000000D+01  .0000000D+00
.2825200D+01  -.3000000D+01  -.1663300D+01
.2308400D+01  -.3000000D+01  -.3253900D+01
.1472100D+01  -.3000000D+01  -.4702300D+01
-.5836200D+01  -.3000000D+01  -.7956200D+01
    
```

図15 データ

4. 地形と人工物との結合

前述の2.、3.で地形表面と構造物のCGは作成できたことになる。よってこの二つを合成すれば人工物と自然物の混合したCGができあがる。ここでは今までの画像処理システムでは表現が困難であった結合部分を正確に表現する方法を考える。結合部分を正確に表現するには二つの結合部分の交線がいずれかの三角形の辺とならなければならない。そのため地形データと構造物データを結合するには、二つの図形の結合点を計算する必要がある。しかし、地形表面データも人工物データも三角形の集まりなので、これは二つの三角形の交線を計算することによって容易に求めることができるので、あとはそれぞれのデータに交点を補完して、交線を形成する二点が必ずつながるように元の三角形を再分割することによって二つの図形の結合部分を表現する。この場合元の三角形を壊さないように再分割を行う。この交線をつなぐアルゴリズムは前述の修正 Delaunay Triangulation の境界の点と点を結ぶアルゴリズムを改良することによって容易に作成できる。以下にその手法を示す。

図16のように*i*点までの辺が生成され、*i+1*番目の節点を空間においた場合を考える。もし*i+1*番目の節点を内部に含む三角形の頂点の一つが*i*であれば、*A*を*i+1*を用いた三個の小三角形に分割すれば*i*と*i+1*が結ばれ、辺の一部が生成できたことになる。もし*A*の頂点が*i*でない場合、三角形*A*をまず三個の小三角形に分割し、さらに*i*を頂点とする三角形*B*との間に位置する全ての三角形を探し出す。次に点*i*と*i+1*をつなぎ多角形を二個の部分に分割し、最後にこれら二個の部分に三角形に分割する。この三角形分割では辺*i-(i+1)*を壊さず、一番最初の三角形を壊さない限りにおいてDelaunay Triangulationを適用して三角形分割する。地形データ、構造物データの両方を再分割しおえた段階で、二つのデータを合わせて隠線処理を行うことによってCGが作成できる。

作成された図形を図17～図24に示す。図17はCADから得られた四角柱の図であり、図18は図17を図11との交線にしたがって再分割した例である。図19、20は図11と図17を合成させて隠線処理を行った

図形である。図21はCADから得られた円柱の図であり、図2、23、24は円柱を図11の山の部分にはめ込んだ図形である。

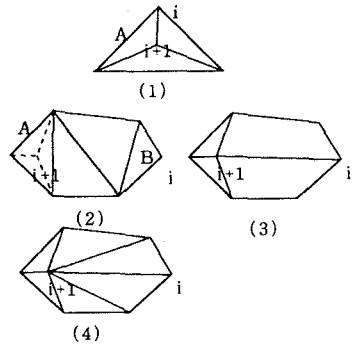


図16 点*i*と点*i+1*の結合

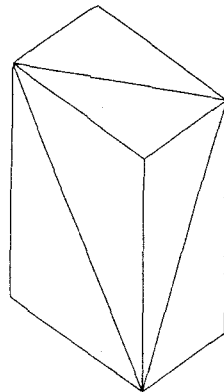


図17 四角柱

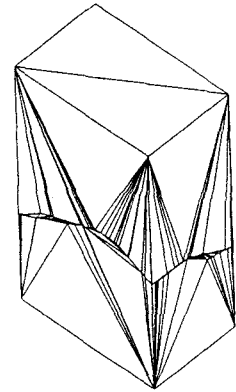


図18 再分割された四角柱

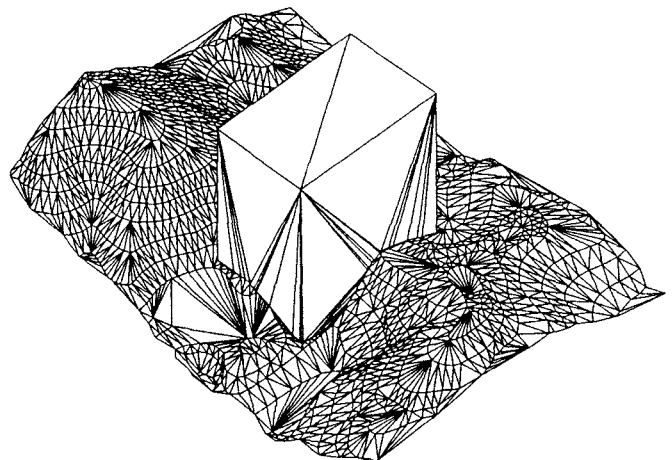


図19 地形表面と四角柱(3次元表示)

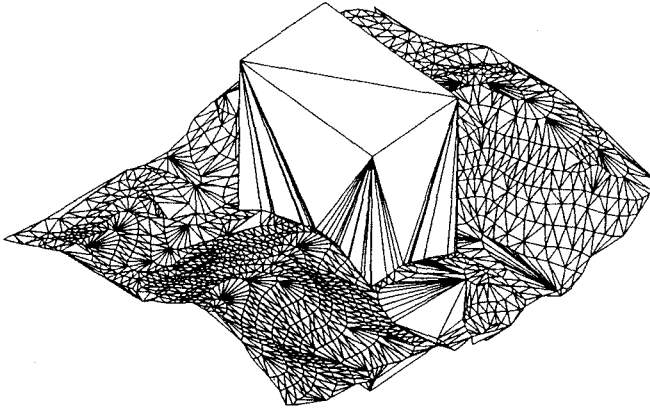


図20 地形表面と四角柱（3次元表示）

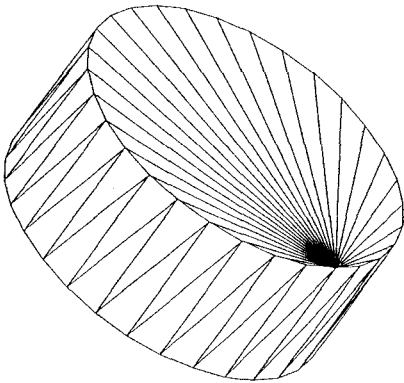


図21 円柱（3次元表示）

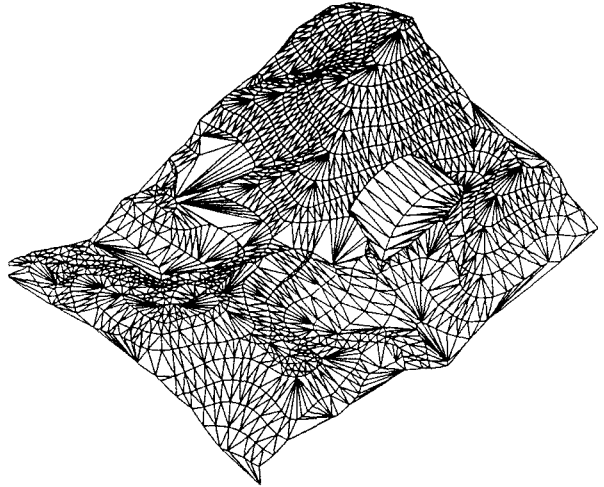


図22 地形表面と円柱（3次元表示）

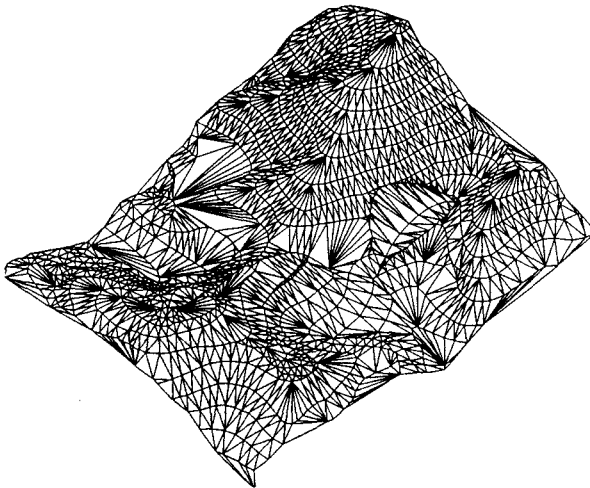


図23 地形表面と円柱（3次元表示）

5. カラーリングに関して

前述したアルゴリズムで作成された図形をCGとして利用するにはそれぞれの色ごとにグループ化し、カラーリングを行わなければならない。これは作成された三角形を部分領域ごとに分けるという作業を行うということである。それには今の入力データだけでは不可能である。そこで新たに部分領域の境界上の点列を入力し、三角形分割後、もしその境界の線が正確に生成されていない場合、4. の修正 Delaunay Triangulation の点と点を結ぶ手法で三角形を切り直す。以上により、生成された三角形をすべて部分領域ごとに区分できることになり、これでカラーリングを行うことができる。元の地形表面を図25に、グループ化した地形表面を図26に示す。

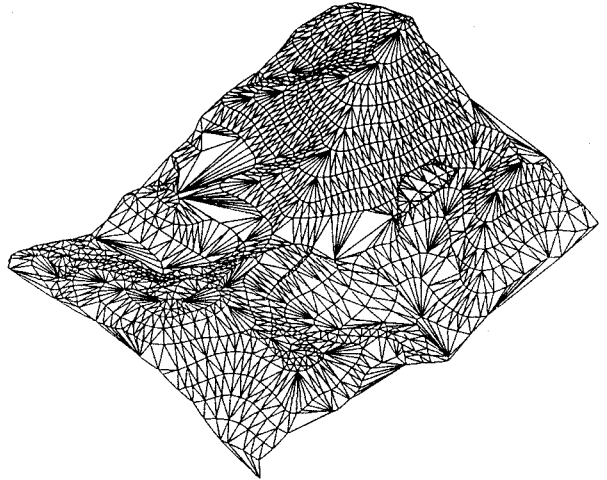


図24 地形表面と円柱（3次元表示）

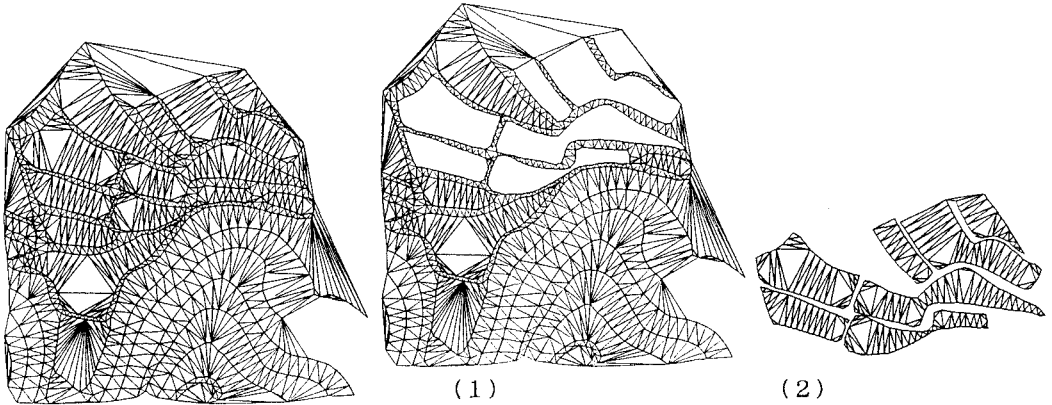


図25 地形表面（2次元表示）

図26 グループ化後（2次元表示）

6. あとがき

本研究では Delaunay Triangulation を改良することによって地形表面のCGを簡便にしかも高速に作成する画像システムの構築を行い、そのCGにCADで作成した土木構造物のCADデータを合成することによって自然発生物を含んだCGを作成する手法を提案した。この手法がCGの作成に取り入れられれば、地形表面を含んだCG作成の作業工程が大幅に削減され、土木工学分野へのCADの導入に道を開くものと思われる。最後にCGを作成するにあたり多大な御協力を賜りました岡山大学工学部共通講座・廣瀬壯一助教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) SLOAN, S.W. : A fast algorithm for computing in the plane. Advances in Engineering Software, Vol.9, No.1, pp.34-pp55, 1987
- 2) 谷口健男 : FEMのための要素自動分割, 森北出版, 1992, 9
- 3) 谷口健男, 太田親 : 直線辺で構成される任意領域への Delaunay Triangulation の適用, 土木学会論文集, No. 432/1-16, pp.66-77, 1991, 7