道路縁データからのネットワークの生成

四茂野 英彦

A method to generate a road network from road margins data

Hidehiko YOMONO

Abstract: The road network analysis is one of important themes of geographic information processing and has been studied profoundly. In respect of large scaled road networks, i.e. the ones including alleys where cats roam, however, studies have just begun. It is halfly due to lack of structurized data of such large scaled networks. Recently digital geographic data have been produced and commerced for multi users. But in almost all the cases, road data are made as road margins, not as structurized networks. This study develops a method to transform such margins into networks and shows its feasibility with regard to "Numeric Map 10,000" by GEOGRAPHICAL SURVEY.

Keywords: 道路ネットワーク、数値地図 10,000、三角形分割

1. はじめに

地理情報処理の中で道路網の分析は既に長い歴史を持つが、区画街路を対象にした分析、特に沿道の地物や区域属性と結びつけた分析はようやく緒にいた段階にある。区画街路のネットワーク・データの不在あるいは作成の負荷がこの分野の理論的研究や実面での応用を進める上でボトルネックになっている。近年地図の数値化など地理情報の数値データとしての整備の一環として道路データの作成が各方面で行われ、その流通も図られているが、道路縁や付属道路施設の外形の数値化が主流であり、ネットワーク分析に直ちに利用できる形での供給はあまりなされていない。道路形状の視覚的提示や道路内あるいは道路に接した施設管理がさしあつたての主要な用途であること、ネットワーク・データの作成には道路中心線の判定や結節関係の判定など仕様を標準化しにくい作業がともなうことなどがその原因と考えられる。

本研究は、道路形状の数値データとして一般的な道路縁データをもとに、それからネットワーク・データを自動生成する方法を開発し、それを実際のデータに適用したものである。その際、道路縁データが潜在的に有する幅員等の情報を点と線とからなるネットワークに結びつけることも一つのテーマとした。

従来のこうした道路ネットワーク・データの自動生成方法としては、細線化や芯線化などの画像処理技法を用いた例がある。しかし細街路を含む区画街路網を処理するにはこうした技法は必ずしも向いていないし、特に結節の判定に難があつた。この研究ではそれに代わって三角形分割を基礎としたベクトル処理技法を開発した。次章では開発した方法を紹介し、3章ではそれを国土地理院刊行の数値地図 10,000 に適用した結果を報告する。

2. 方法

道路縁データとしては国土地理院の数値地図 10,000 に含まれる道路データの内、平面道路のデータ要件を満たすものを想定した。即ち自動車専用道

四茂野：〒940-21 新潟県長岡市宮関町197
長岡造形大学 Tel. 0258-21-3577
Nagaoka Institute of Design
197 Miyazeki-machi, Nagaoka-shi, Niigata 940-21

などを除く道路を平面に投影し、非道路部分の作る面分を多角形として数値化したものである。図郭内に包含される面分は閉じたポリライン（始点と終点と同じ座標）となり、図郭と交差するものは開いたポリラインとなる。なお数値地図10,000のデータ作成作業基準では道路縁の方向を特定していないが、以下の記述では方向は非道路面分を左にみるものとする。開発した方法を図1に示すテスト・データ

図1. 道路縁・点テストデータ

をもとに説明する。

2.1 三角形分割

互いに離ればなれの幾何的データ単位に対し、それら相互の位置関係により定義される対象を判定あるいは生成するのには、平面をそれらの単位に即して位相的に円盤と同相な多角形に分割するのが通常である。この研究では三角形分割を使っている。即ち、道路縁を表わす座標点列の各点（以下縁点と呼ぶ）を頂点とする三角形分割を始めに生成する。その際閉じたポリラインについては重複を避けるために終わりの点を除いておく。三角形分割法には何種類があるがここではVoronoi分割の双対であるDelaunayの三角形分割を用いた。分割結果を図2に示す。

2.2 データ構造

使用したデータ構造（演算操作のためのメモリー上でのそれ）は以下のようなものである。

図2. 縁点のDelaunay三角形分割

(1) 縁点：縁点相互はFROMとTOとからなる双方向リストでつなぎ、もとの道路縁情報を保持する。閉じたポリラインの場合は循環リストとなり、それ以外は両端で途切れるリストとなる。

(2) 三角形：Voronoi分割の頂点に相当する。Voronoi分割の方法によっては三角形とまらない場合があるが、使用したアルゴリズムが文献[1]によるものなので必ず三角形となる。なお外部領域も一つの三角形として（実際の頂点数は3より多いが）登録する。以下の操作で三角形の併合等で区分域が三角形でなくなることが起こり得るが、誤解を生じるおそれのないかぎり三角形とよぶことにする。あえて三角形とは限らないことを強調する際には多角形とよぶ。

(3) 辺：三角形分割の辺である。縁点並びに三角形に発線、着線、左廻り線、右廻り線のポイントを用意し、それぞれについてリスト表現する。

なお、データを読み込む時にはそれぞれの要素の識別子と格納場所のアドレスを対応させるためにインデクス・ツリーの平衡管理にAVL木による探索構造を使っているが、読み込み後はすべてアドレスで操作出来るためそのための記憶領域は解放している。

2.3 縁辺の挿入

図2に破線で示したように、縁点に対する三角形分割の結果、道路縁が三角形の辺にならないことが

起こり得る。道路縁をなす縁点間の区間を以下縁辺と呼ぶ。三角形の辺になっていない縁辺を追加して三角形分割を再編する処理を行う。手順を以下に示す。

各縁点について {

TO リストの先の縁点(もしあれば)との間が
辺として登録されているかどうかを調べる;

もし登録されていなければ {

先の縁点へ方向が含まれる三角形とそ
の交差する辺を求める;

その辺の反対側の三角形を手前と併合し
辺を削除する;

先の縁点に行き着くまで {

先の三角形の残る 2 辺の内どちらと交
差するか判定する;

併合、削除処理をする;

}

縁点間に辺を挿入し、併合で出来た多角
形を二つに分割する;

二つの多角形について {

三角形分割をおこなう;

}

}

}

図 3. 縁辺挿入・再編後の三角形分割

この処理を行った結果を図 3 に示す。

なお縁辺を挿入した結果出来る二つの多角形の内
左側のものは非道路であるからここで除外できるよ

うに見えるが、他の未登録縁辺について更に処理対
象となる可能性があるため、双方とも三角形分割処
理を施す。ここでの三角形分割は多角形に対するそ
れであるが、挿入辺に対し両端部を除く多角形のボ
リラインが単調であることを利用できる。

2.4 道路外三角形の削除

この段階で三角形は道路内のものと道路外のもの
とからなり、後者を削除する処理を行う。手順は下
記の通りである。

各縁辺を有する三角形について {

もし FROM/TO リストの方向に対し左側であれば
削除する (実際には外部領域に併合する);

}

各三辺とも縁辺でない三角形について {

もし隣接領域がすべて外部領域ならば削除する
(外部領域に併合する);

}

各三辺とも縁辺でない三角形について {

二辺についての隣接領域が外部領域ならば削除す
る (外部領域に併合する);

外部領域以外の隣接三角形についてこの処理を避
ける;

}

各辺について {

両側が外部領域ならば削除する;

}

図 4. 非道路部三角形を削除した結果

なお辺の削除処理で縁辺が削除されることも起こり得る。それについては後述する。

処理結果を図4に示す。

2.5 ノード三角形の整形

ここまでの処理で三角形は辺のうち幾つが縁辺になっているかで0,1,2,3のいずれかに分類される。0の三角形はそこで道路区間が会うので以下ノード三角形とよぶ。1の三角形は道路区間に相当するので区間三角形とよぶ。2の三角形は行き止まりを表わすので行き止まり三角形とよぶ。3の三角形は系統性の無い非連結道路片であるが実際上は無視できる。なおそれ以外に外部領域に隣接する三角形があり、図郭内だけでみれば行き止まりであるが、隣接図郭との併合時にはつながる可能性があるので境界三角形として区別する。

実際の三叉路にあっては図4の矢印で示すように当該三角形が痩せてしまう場合があり、ネットワークの形状を歪める要因になる。このためノード三角形については以下の手順で整形を加える。

各ノード三角点について {

最短辺とこれに対する頂点を求める；

頂点からの一つないし二つの縁辺について

{

最短辺の垂直二等分線との交点をもとめそれが縁辺上にありかつ最短辺の二等分点との距離がもとの頂点との距離未満であったら {

交点に頂点を移し、隣接三角形に対し必要な処理を加える；

}

}

}

整形結果を図5に示す。

2.6 三角形の併合

この段階ではすべて交差点は三叉路として表現されている。実際には十字路等とみなされるものであっても三角形分割の成りゆきで三叉路に分解され

図5. ノード三角形の整形結果

てしまうのである。このためノード三角形が隣接している場合はこれを併合する。

これ以外に行き止まり三角形の問題がある。実際に行き止まりとみなしてよい場合以外に、幅員の変化する箇所やカーブ箇所道路縁がくぼむと図5の矢印で示すように行き止まり三角形が発生してしまう。そこで行き止まり三角形とノード三角形あるいは多角形が隣接する場合はこれを併合する。この場合併合相手がノード三角形であると新たに出来る多角形は区間多角形となる。ノード多角形が併合相手であるとノード多角形であっても縁辺を有するものが生じることになる。処理結果を図6に示す。

図6. 三角形の併合の結果

2.7 ネットワーク・データの出力

ここまでの処理で(2.5,2.6は不要ならば省略する

ことも出来る) ネットワークは三角形(多角形)の隣接関係として表現されている。それを通常のネットワーク処理にそのまま使える形式で出力するために以下の手順を用いた。

```
{
  各ノード三角形(多角形)について {
    識別番号を付番し、図心座標を求めてノード・
    ファイルに出力；
    識別番号と境界座標列をノード形状ファイルに
    出力；
  }
  各境界三角形について {
    識別番号を付番し、外部領域に接する辺の中点
    をもとめてノード・ファイルに出力；
  }
  各ノード三角形(多角形)について {
    各縁辺でない辺について {
      隣が未処理であれば {
        リンク識別子を付番し隣接三角形(多角形)
        がノード三角形か境界三角形ないし行き止まり
        三角形になるまで {
          処理済みフラグを立てる；
          左右の縁辺を左縁ファイル、右縁ファイル
          に出力する；
          非縁辺の中心点を結ぶ線を中心線ファイル
          に出力する；
          三角形(多角形)の面積を中心線延長で除
          したものを区間幅員として、最大・最小を
          記録しかつ面積を累計する；
        }
        終端三角形が行き止まりのとき {
          ノード識別子を付番し、そこにはいる中心
          線の方向が交差する辺の交点を求めノード・
          ファイルに出力；
        }
      }
      リンク識別子とその起終点のノード識別子を
      位相ファイルに出力；
      リンク識別子、延長累計(起終点のいずれか
      あるいは双方がノード三角形ならばノード内
```

延長を加算する)、最小幅員、最大幅員、平均幅員(リンクに含まれる三角形(多角形)の総面積をノード内延長を除いた延長累計で除したもの)を属性ファイルに出力する；

```
}
}
```

出力内容は以下の通りである。

- (1) ノード・ファイル：ノードの識別子、座標、ノード区分(一般ノード、図郭境界点、行き止まり点)
- (2) 位相ファイル：リンクの識別子、始点ノード識別子、終点ノード識別子
- (3) 属性ファイル：リンクの識別子、延長、最小幅員、最大幅員、平均幅員
- (4) ノード形状ファイル：ノードの識別子、座標。サイクルとして表現。行き止まり点、図郭境界点については出力しない。
- (5) 中心線ファイル：リンク識別子、座標
- (6) 側線ファイル：リンク識別子、座標、左右区分
出力結果の内、中心線ファイル、ノード・ファイル、側線ファイル内容を図7に示す。

図7. 生成したネットワーク

なお、この処理ではネットワークに非連結成分があってそれにノード三角形(多角形)が含まれていない場合、その部分は出力されない。出力が必要ならそのように改めることは容易である。

3. 数値地図 10,000での検証

前章で紹介した処理系を国土地理院数値地図 10,000「新宿」に適用した。平面道路のデータ全体で、縁点数は57,627、非道路区画の総数は 3,978 である。縁点の重複、縁辺の交差についてチェックを行ったが、重複・交差とも無かった。縁辺の方向について国土地理院の作業規定では特定していないが、49 の道路縁を除いては左廻りとなっていた。方向を特定しておけばこの研究で採用した方法をそのまま適用できる。全図幅のうち局所平面直交座標系で(250,1750)-(1250,2750)の新宿西口1平方キロの区画を抽出して処理した結果を示す。この区画

図 8. 数値地図 10,000 新宿西口

に含まれる縁点は 2,238 道路縁は 198 である。

図 8 は原データをそのままプロットしたものである。新宿西口区域で西口公園内の園路、高層ビル街を含み、また周辺には住宅街も含まれる。

処理結果のうち中心線ファイル、側線ファイル、ノード・ファイルの内容を図 9 に示す。なお図の内矢印で示した西口高層ビル街の右側でネットワークが途切れているが、この部分で中央分離帯縁の方向が逆転していた結果である。

4. 考察

ここで提示したネットワーク生成アルゴリズムは

十分実用に耐えるものであると考える。最初の三角形分割以降は各段階の処理に数値や位相に関する不安定要因は特になく、頑健な方法である。計算効率については、三角形分割結果の読み込みの後、処理は三角形、辺あるいは縁点の巡行の繰り返しで行われ、一件あたりの処理コストはデータの全体の大きさ N に依存しない。即ち全体の時間コストは N に比例するオーダーで収まる。三角形分割の読み込み時には各要素識別子と格納箇所の番地を対応づけるのに AVL 木を使っていることから $N \cdot \log(N)$ のオーダーの時間を要している。この点は識別子から番地への直接変換を行うことで N に比例する程度に効率を向上することは可能である。なお残るいくつかの問題点を列挙しておく。

(1) データの幾何学的整合性について

この研究で採用したアルゴリズムが妥当するのは道路縁データが間断なくかつ一定の方向でとられているという前提のもとである。数値地図 10,000 の作成にあたってそのようなデータ要件を定めた「デジタル・マッピング標準仕様」を採用したことはその意味でも大変有意義なことであったと考えられる。ところが残念なことに道路縁の方向という最も基幹的位相要件に関してはデータ仕様に採用されなかった。この種のデータ整備に於てはいくつかの幾何学的条件、特に位相的条件を満たしておくことがその利用価値を大いに高めるのであり、また処理系とデータとの一体化という計算機工学的要請にかなうのである。ただしこの研究で使った三角形分割で内部三角形と外部三角形とが縁辺でない辺で隣接するのは矛盾であるという性質を使って方向を修正することは可能である。

(2) 図郭をまたがるネットワークについて

地理情報のデータ単位は図郭毎にファイル化されるのが通例である。その場合、図郭をまたがっての処理を保障する必要が生じる。数値地図 10,000 では座標系が図郭毎の平面直角座標系となっており、一方図郭の境界は経緯度で決められているため図郭境界上の点を矩形の垂直・水平線に正確に乗った点と

図9. 生成された道路ネットワーク

して識別することは出来ない。

この研究で提示した方法では、図郭境界のノードが識別されるので図郭の併合は容易であるが、三角形分割の結果出来る凸包の境界に合致する縁辺は削除されてしまい、隣接図郭でも同様なことが起こるためその部分の道路が欠落してしまうという問題が残っている。削除縁辺は識別可能であるからそれを生成ネットワークと結びつけて出力しておくなどの処理を考える必要がある。

(3) リンク中心線、ノード代表点の定め方

図9にみるようにこの方法で取り出した道路中心線は三角形分割に規定されて一部ジグザグな形となることがある。視覚的に不自然というだけでなく延長や幅員の値にも影響を与える。中心線は三角形分割によらず両側線から別途判定した方がよい結果が得られるであろう。

ノード代表点は図心をあてているが、系統だった路線がノード部で屈曲するなどの傾向がみられる。

なお隅切りのある交差点などでは実際には単一の交差点とみなされるものがノード三角形と区間三角形の混合になる可能性があり、改善の余地はある。

(4) 三角形分割法について

ここでは Delaunay の三角形分割を使っているが、三角形分割の方法により最終結果のネットワーク形状にどのような差異が生じるかについては未検討である。またここでは縁点による三角形分割の後で縁辺の挿入・再編を行っているが、始めから縁辺を辺に加えた三角形分割も考えられるし、その場合非道路部三角形を発生させないで処理の効率化、メモリーへの負荷の軽減を図ることも可能であろう。

(5) 立体交差

入力データの条件から生成されるネットワークが立体交差を表現していないことは当然である。この点はデータ標準の欠点とみるべきではなく、二次的加工に委ねるのが妥当と考えられる。区画街路と自動車専用道路等との結節についても同様である。

なおこの方法の応用としてラスター／ベクター変換における芯線化処理が考えられる。道路縁からのネットワーク生成と芯線化とは本質的に同じ性格をもった課題である。芯線化は等高線のように本来交差のない、あるいは例外的な対象の処理に向くが、交差部の処理に難があるとされてきた。交差箇所に局部的にここでの方法を適用することでその弱点を補えるのではないかと考えている。

末筆ではあるが、道路縁を表わす座標点の三角形分割という発想が浮かんだのは参考文献の組合せ構造を優先させることでヴォロノイ図を安定的に生成させるアルゴリズムのおかげである。いろいろご指導いただいた伊理先生、杉原先生に厚く御礼申し上げます。

なお本研究でのプログラム開発、テストはCompact Micro VAX II 上で VAX FORTRAN, VAX C を使って行った。たまたまこの環境でのまとまったプログラム開発はこれが最後となり、永年酷使した同機にいささかの哀別の念を表すのをお許し願いた

い。

参考文献

Sugihara, K., Iri, M., (1992) Construction of the Voronoi Diagram for One Million Generators in Single-Precision Arithmetic, *Proceedings of the IEEE*, 80: 9, 1471-1484.