ネットワークVoronoi図のマテリアライズ化に関する一考察

橋本知宜・Htoo Htoo・大沢　裕・曽根原　登

A Materialization Method of Network Voronoi Diagram

Tomonori Hashimoto • Htoo Htoo • Yutaka Ohsawa • Noboru Sonehara

Abstract: Network Voronoi diagram is efficiently applied in spatial network database (SNDB) . It was implemented in various ways. However, each has weak points. In this paper, a new data structure is proposed to construct an adjacency list within a network Voronoi polygon on a road network. In this method, the adjacency list is denoted by referring the next node's position of the current node on the shortest paths that are paths from a query point to each border point surrounding the network Voronoi polygon. The proposed method is efficiently evaluated by using a real road map data.

KeyWords: Networks Voronoi Diagram, Materialization, Adjacency List, Spatial Query

1. はじめに

位置情報サービス (LBS: location based services) は，ユーザの現在位置とその位置に関連する様々な情報とを統合することによって，ユーザに付加価値を提供するサービスである [7]．LBS への関心は携帯機器の普及とともに高まっており，商業や緊急サービスの分野において徐々に普及しつつある．このサービスを実現するためには，携帯端末の測位技術や各種位置情報のデータベース化，経路検索や近接検索などの各種空間演算が不可欠である．

道路網上での距離に基づく各種演算では，2 点間の道路網を移動したときの距離を求める必要がある．これは，Dijkstra 法 [1] や A*アルゴリズム [3] などを用いて実行できるが，多くの演算コストを必要とする．そこで，次章で述べる各種マテリアライズ手法が提案されている．その１つに Network Voronoi Diagram[2]（以下では NVD と略記）を用いる方法があり，それを用いて k-NN，CkNN，ANN などを実行するアルゴリズムが提案されている．

大沢：〒 338-8570 さいたま市桜区下大久保 255
埼玉大学大学院理工学研究科数理電子情報部門
TEL: 048-858-3717
Email: ohsawa@mail.saitama-u.ac.jp

NVD の表現法には各種方式が考えられる．簡易な方式としては，各 NVD 領域の母点から境界点への距離，及び境界点同士の距離と，それらの隣接リストを作成することにより，各種検索が行える．しかし，これでは経路を得ることができない．一方，経路も得ようとすると，上記に加えて境界点同士及び母点から境界点への経路の記述が必要となる．しかし，この方式は多大なメモリー量を必要とする．

本稿では，道路網の semi-materialize 化を NVD の記述に適用することにより，少ない記憶域で経路も得られる方式を提案する．

2. 関連研究

Kolahdouzan ら [6] は，NVD を用いて地図上に位置するオブジェクト (以下では POI と略記) の k-NN 検索の為のアルゴリズム VN^3(Voronoi-based Network Nearest Neighbor) を提案している．以下に，基本的な NVD の記述法をまとめる．

1. 隣接する２つのボロノイ領域の境界点，即ち隣接する２つの母点からの距離が等しくなる道路網上の点を境界点と呼ぶ．

2. １つのポリゴンの全ての境界点の組み合わせ，及び境界点と母点の間の距離が計算されている．

このNVDに対してどのような情報を付加するかにより，データ量とそれを用いた演算量が異なる．１つの極端として，上記のデータのみを持たせる方式がある．その場合には，検索点から母点や境界点への距離やパスをDijkstra法やA*アルゴリズムなどで求める必要がある．他の極端として，ボロノイポリゴン内の全てのノード間の距離とパスを持たせる方式がある．その場合に，1つのボロノイ領域内のノード数をnとするとき，距離のみで$O(n^2)$，パスも持たせると$O(n^3)$のデータ量を必要とする．

上述のように，全てのノード間のパスを記述する場合は，$O(n^3)$のデータ量が必要なことから大規模ネットワークでは実用的ではない．そこでsemi-materializeの方式[5]が提案されている．これは，あるノードから他のノードへの最短路上で，次に訪れるノードを記述する方式である．ノード同士の全ての組み合わせに関してこれを記述する必要があることから，データ量は$O(n^2)$である．最短路の復元は，次々にノードをたどることにより，$O(n)$の処理時間で得ることができる．

Huら[4]はk-NN検索を高速に実行するデータ構造としてdistance signature構造を提案した．これはsemi-materializeの考えをベースとして，全てのノードからPOIを目的地としたときの「次にたどるノード」のみを記述することにより，データ量の削減を図る方式である．道路網のノード数をn，POIの数をmとしたとき，$O(nm)$のデータ量で各ノードからPOIへの最短路を$O(n)$の処理量で得ることができる．しかし，この方式の問題点はPOIの追加や削除が発生したとき，その影響が全域に及ぶことである．

図1はHuらのdistance signature方式の概要を示している．この構造では，全てのノード(丸印)から全てのPOI(黒丸印)へ至る最短路をsemi-materialize方式で求める為に，全てのノードの隣接リストにおいて，各POIに至る最短路上で次にたどるノードが記述されている．そこで，あるノードからあるPOIに至るパスを得るためには，この「次にたどるノード」をPOIに至るまで次々にたどればよい．

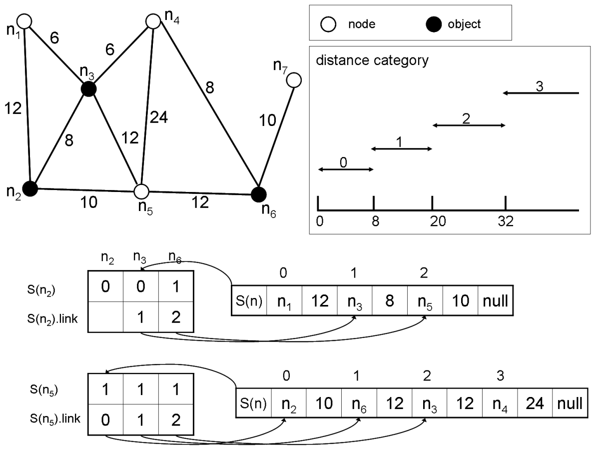

図 1: distance signature 構造

3. 提案方式

NVDを用いてk-NN検索をはじめとする，各種検索に適用する場合，ボロノイ領域内の任意点から，その領域の母点及び，その領域の境界点への最短経路を高速に求める必要がある．また，逆に母点及び境界点からボロノイ領域内の任意点への最短路を求める探索が必要となる．これらを高速に実行するために，前章で述べた．semi-materializeの考え，より具体的にはHuらのdistance signature[4]で採用されている方式を用いる．

Huらは，k-NN探索を高速に実行するために，ネットワーク中の全てのノードからPOI集合の各点への最短路上で次にたどるノードを隣接リストに記録する方式を提案した．しかし，この方式ではPOI集合に動き（追加，削除）が発生したとき，その影響は全隣接リストに及ぶ可能性がある．一方，１つのボロノイ領域が作られた状態においては，母点と境界点に動きが無い．また，新たな母点(POI)が追加，削除されるとき，局所的なボロノイ領域の修正で済む．従って，影響が及んだボロノイ領域についてのみ，semi-materializeの構造を修正すればよい．

図2に提案方式の概要を示す．図中，M_1が母点，$b_i\{i=1,\ldots,11\}$は境界点，n_jは境界点と母点以外の道路網上のノードを示している．まず，母点，境界点，一般のノード全てからなるノードの集合をPとし，境

界点と母点のみからなる集合を C とするとき，P の各要素 p_i に対して，p_i から C 中の各要素への最短路上で次にたどる P 中の要素を記述する．1 つの P 中の要素について，このデータ量は $O(|C|)$ である．また，1 つのボロノイポリゴンに対しては，$O(|C||P|)$ である．更に，ボロノイポリゴンは R 木により管理する．これは，ある検索点 q が指定され，その点が含まれるボロノイポリゴンを高速に決定するためのものである．

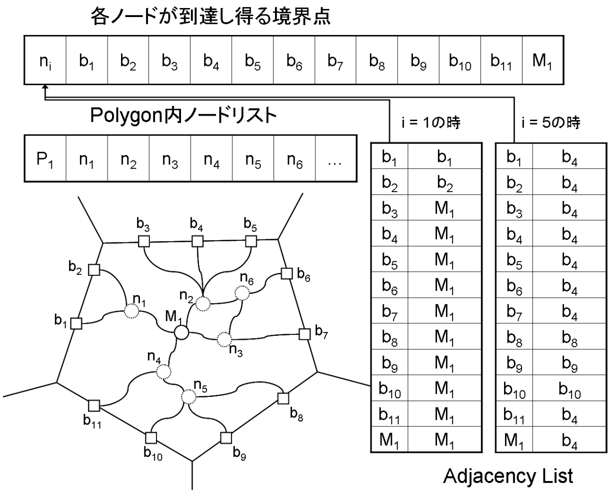

図 2: ポリゴン内のノードの管理

検索点 q が与えられ，その点の k-NN の POI を求める演算は次のように実行される．まず，R 木により q が含まれるボロノイポリゴンが決定される．ボロノイ図において，1 NN は q が含まれるポリゴンの母点である（これを p とする）．q から p への最短路は q から p への最短路上で次にたどるノード r を隣接リストを用いて探し，以下この処理を r が p に達するまで繰り返せばよい．

一方，任意の k に対する k-NN の探索は，VN^3 を用いて決定することができる．その際に，単に通過するボロノイ領域に関しては入りと出の境界ノードが得られる．また，k-NN に含まれる POI のボロノイポリゴンについては，そのポリゴンの境界ノードが得られる．2 つの境界ノード b_i と b_j 間の最短路と，境界ノード b_i から母点への最短路は上で述べたのと同じ処理で実行できる．

4. 実験

4.1. 実験方法

本稿で提案したデータ構造についてのデータ量に関する評価実験を行った．実験環境は，Intel(R) Core(TM) i7 CPU 920, 2.67GHz，12GB RAM．OS は Windows7 Ultimate である．

使用した地図データは，25,586 個の道路セグメント (この数を $|N|$ とする) からなる数値地図である．使用した地図上で母点の数 5 でネットワークボロノイ領域を求めた例を図 3 に示す．

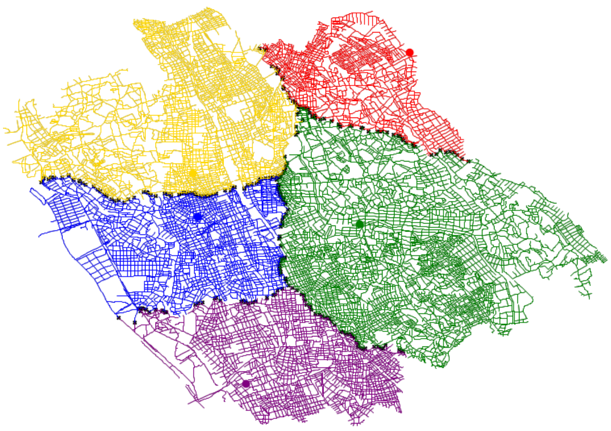

図 3: Network Voronoi Diagram

POI データは擬似乱数を用いて作成した．作成手順は以下のとおりである．

1. 擬似乱数を用いて，n 個の道路オブジェクトからオブジェクトを無作為に 1 個選ぶ．各道路オブジェクトが選ばれる確率は，各道路の長さを $l_k(0 \leq k < n)$ とするとき，$l_k/\sum_{i=0}^{n-1} l_i$ である．

2. 選んだ道路オブジェクトの道路セグメントの長さを l とする．0 以上 l 以下の整数 l_r を擬似乱数を用いて取得し，道路セグメントの始点からの道のりが l_r となる点の座標を計算する．

POI の総数を $|S|$ とするとき，$|S|/|N|$ が 0.1,0.2,0.5,1 となるような 4 種類のデータセットを作成した．

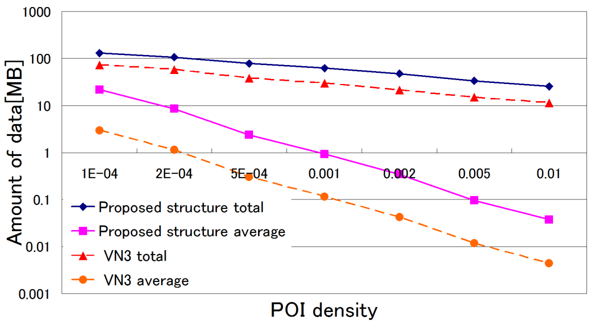

図 4: データ量の実験

4.2. 実験結果

図4は，データ量についての分析の結果である．データ量は次のような計算式で計算する．地図全体のノード数 × ノードの座標情報量 × 境界点の座標の情報量 × (境界点の座標情報量 + 次のノードが境界点なら道路セグメントの情報量も追加 + 次のノードの座標情報量) 各位置情報のデータ量は 8byte とし，道路セグメントのデータ量についても道路セグメントを構成する位置情報の数 × 8byte で計算する．

図 4 より 1 つ当たりのポリゴンにおけるデータ量は，POI 密度が高くなるにしたがって減少する．これは，1 つ当たりのポリゴン内のノード数の減少により隣接リストのサイズが小さくなるためデータ量もそれに比例し減少している．そのため全体のデータ量についても減少していく．想定されるひとつ当たりのデータ量はひとつのポリゴン内のノード数を n とすると $O\left(n^2\right)$ となることが予想できる．これより本稿で提案したデータ構造の一つの当たりのポリゴンが持つデータ量は VN^3 が持つデータ量を可算したものである $n^2 + n^2 = 2n^2$ となるので，$O\left(n^2\right)$ となることがわかる．VN^3 と比較しデータ量が同様であり，実際のデータ量についても実験結果より提案したポリゴンの管理方法が有するデータ量と VN^3 のデータ量はほぼ同じであることがわかり，実際のデータ量についても VN^3 と比較し 2 倍程度になることがわかる．

5. まとめ

本稿では，道路ネットワークを対象としたネットワークボロノイ図を用いた方式の表現方法の一つを示した．提案したデータ構造では隣接行列によってポリゴン内の情報を管理し，ユーザによりランダムに与えられる質問点に対しても柔軟に対応することができるデータ構造となっている．データ量はノード数や境界点の数に比例して大きくなる．しかし，計算機のメモリの増量によりデータ量の増大の問題は改善されつつある．加えて，本稿で示したデータ構造はネットワークボロノイ図におけるポリゴン毎にデータ構造を管理することが可能であるためデータ量の増加にも対応可能である．

参考文献

[1] E. W. Dijkstra. A note on two problems in connection with graphs. *Numeriche Mathematik*, Vol. 1, pp. 269–271, 1959.

[2] Martine Erwig. The graph Voronoi diagram with applications. *Networks*, Vol. 36, No. 3, pp. 156–163, 2000.

[3] Peter E. Hart, Nils J. Nilsson, and Bertram Raphael. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics*, Vol. ssc-4, No. 2, pp. 100–107, 1968.

[4] Haibo Hu, Dik Lun Lee, and Victor C.S. Lee. Distance indexing on road networks. In *Poc. 32nd VLDB*, pp. 894–905, 2006.

[5] Yun-Wu Huang, Ning Jing, and Elke A. Rundensteiner. A semi-materialized view approach for route guidance in intelligent vehicle highway systems. In *The Second ACM Workshop on Geographic Information Systems*, 1994.

[6] Mohammad Kolahdouzan and Cyrus Shahabi. Voronoi-based K nearest neighbor search for spatial network databases. In *Proc. 30th VLDB*, pp. 840–851, 2004.

[7] Jochen Schiller and Agnès Voisard. *Location-Based Services*. Morgan Kaufmann, 2004.