

ネットワークボロノイ図を用いた指定範囲を結ぶ経路の生成および評価

木部 宏昭[†] 蒲原 智也[†] 大西 真晶[†] 上島 紳一^{††}

[†], ^{††} 関西大学大学院総合情報学研究科 〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1

E-mail: [†]{fb5m126,fb6m125,fa4d001}@edu.kansai-u.ac.jp, ^{††}ueshima@res.kutc.kansai-u.ac.jp

あらまし 近年，カーナビゲーションや歩行者ナビゲーション端末が広く普及しており，最短経路を求めるだけでなく，利用者の好みや空間状況に応じた最適経路を導くための研究がなされている．従来手法では，特定経路のコストを調整することで，利用者が指定する道路上の特定範囲をなるべく通過する経路を導くものが多く，調整のために統計調査を必要とする．そこで本稿では，指定範囲の経路コスト調整せずに，指定範囲をより多く通過する経路を導く手法を提案する．指定範囲を中心とした部分グラフを生成し，A*最短経路探索アルゴリズムを用いて経路を求める手法である．具体的な仕組みは，ボロノイ図による母点間の近傍関係から，ドロネー図を生成する仕組みを応用し，グラフ上でネットワークボロノイ図を用いることで指定範囲を中心とした部分グラフを生成する．部分グラフ上のA*最短経路探索結果に含まれる指定範囲部分が，基本グラフ上の最短経路探索の結果よりも多く含まれることを，実空間道路情報を用いて示す．また，部分グラフを用いることで経路探索ステップ数の減少も確認する．

キーワード ボロノイ図，経路探索，部分グラフ，GIS

Attributes-dependent Route Generation Scheme Using Network Voronoi Diagrams

Hiroaki KIBE[†], Tomoya KAMBARA[†], Masaaki OHNISHI[†], and Shinichi UESHIMA^{††}

[†], ^{††} Graduate School of Informatics, Kansai University 2-1-1 Ryozenji-cho, Takatsuki-shi, OSAKA, 569-1095, Japan

E-mail: [†]{fb5m126,fb6m125,fa4d001}@edu.kansai-u.ac.jp, ^{††}ueshima@res.kutc.kansai-u.ac.jp

Abstract Researches on computing an optimal route according to user's preference or spatial contexts have been gaining focus recently, as car navigation and pedestrian navigation systems are getting accustomed to be used in daily lives. In this paper, the authors propose a method to compute a path to pass through as many attributes-dependent areas as possible along its route, according to the user's needs. Specifically, the authors apply the concept to construct a Delaunay Diagram from neighbor nodes in Voronoi Diagram, and use Network Voronoi Diagram to construct a subgraph based on attributes. For route search, the authors use A* shortest path algorithm over the subgraph. To verify the efficiency of the proposed method with subgraphs, the authors perform route search over subgraphs and base graph, which was generated from the road network of the real space, and compare the results. The results show that the route search by the proposed method consist of more paths with attributes-dependent areas than those performed over the base graph. Moreover, the proposed method reduces the number of steps for path search.

Key words Voronoi Diagram, Routing Algorithm, Subgraph, GIS

1. はじめに

近年のカーナビゲーションや歩行者ナビゲーション端末の普及に伴い，最短経路を求めるだけでなく，空間状況や利用者の好みやに応じた最適経路を導くための手法が研究されている [1-4]. [1] では，利用者を特定経路に誘導するために，統計調

査に基づいて経路コストを調整し，最短経路問題として定式化している．しかし，同じような空間状況を持つ道路に対しても改めて統計調査が必要となる課題が残されていた．

そこで本稿では，GISなどの情報基盤として用いられているデジタル道路地図を利用して，道路上の空間状況やコンテキストが存在する経路集合を指定範囲と定義し，指定範囲内道路

表 1 提案手法の構成

準備	利用
数値地図	出発地・目的地の選択
道路属性	道路属性の選択
ネットワークポロノイ図	経路探索
部分グラフ	

に応じた経路探索手法を提案する．提案手法では，まず，道路網をグラフとみなし，グラフのポロノイ分割であるネットワークポロノイ図を生成することで，同じ属性を持つ道路集合を結び領域を取り出して経路探索に利用する．

ここでネットワークポロノイ図とは，よく知られた平面を分割するポロノイ図に対して，与えられたノード集合に対してグラフ上のノード集合やエッジ集合を，エッジコスト（距離コストや移動コストなど）に応じて分割する図である [5-7]．

次に，ネットワークポロノイ分割によって得られるグラフ上の母点間の隣接関係から，母点間を結ぶ経路を特定して，グラフ上のドロネー図を生成する．実際には，領域間を結ぶ経路を A* アルゴリズム [8] によって抽出し，同一属性を持つ領域と最短経路からなる部分グラフを構成して，道路属性に応じた経路探索に利用する．これにより，目的地への方向性を維持しながらダイクストラ法 [9] よりも少ないステップ数で経路を生成できる．これは，平面でドロネー辺は母点を結ぶ最短エッジを構成することに対応した経路の抽出に相当する．このように，利用者が経路を要求する以前に，デジタル地図が持つ道路属性毎に部分グラフを準備して，経路探索に利用する．

提案手法（表 1）により，デジタル道路地図を利用して，利用統計調査なしに，空間状況や利用者の好みに応じた道路をなるべく通過する経路を生成することができるものと期待される．手法の有効性を確認するため，国土地理院数値地図（空間データ基盤，1/2500 縮尺）[10] を用いて評価する．

以下，2 章では，ネットワークポロノイ図の定義と生成について述べ，3 章では，部分グラフの生成および部分グラフを用いた経路探索手法について述べる．4 章では実空間データへの適用と，シミュレータによる道路属性毎の経路探索結果について考察する．5 章では関連研究，6 章では今後の発展性や応用について述べる．

2. ネットワークポロノイ図

2.1 ノードとエッジのポロノイ分割

ノードとエッジで構成されたグラフ G を考える．エッジは非負値を長さとして持つものとする．この G 上で，複数のノードを母点集合として与えた時， G 上の母点以外の各ノードから他のどの母点よりも近い母点をノードの所属母点という．これにより， G のすべてのノードは，所属母点を一意に持つ．つまり，与えられた母点に対して， G のすべてのノード集合を一意に分割できる．分割した図をノードネットワークポロノイ図という．

図 1 にネットワークポロノイ図を示す．図で大きな点は母点 $\{P1, P2, P3\}$ であり，各ノードの所属母点を表 2 に示す．

また，エッジについても，エッジ上の任意の点からの母点へ

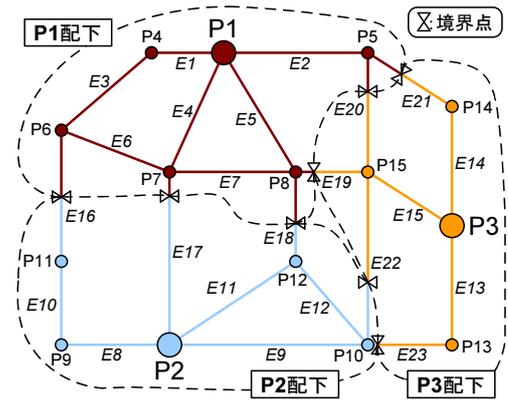


図 1 ネットワークポロノイ図の例

表 2 「図 1」各母点に所属するノード

母点 P1	P1,P4,P5,P6,P7,P8
P2	P2,P9,P10,P11,P12
P3	P3,P13,P14,P15

表 3 「図 1」各母点に所属するエッジおよび境界エッジ

母点 P1	E1,E2,E3,E4,E5,E6,E7
P2	E8,E9,E10,E11,E12
P3	E13,E14,E15
境界エッジ	E16,E17,E18,E19,E20,E21,E22,E23

の距離を考えれば，各点の所属母点を一意に決定することができる．この場合，1 つのエッジ全体が同じ母点に所属することもあるし，距離によって 1 つのエッジの途中で所属母点が変わる場合もある．エッジの母点への所属から G のすべてのエッジ集合を分割した図をエッジネットワークポロノイ図という．

図 1 母点に対して，各エッジの所属母点を表 3 に示す．また，ノード・エッジを所属母点ごとに点線で囲む．さらに， \times は 1 つのエッジの途中で所属母点が変わる位置を示す．この位置を境界点と呼ぶ．境界点をもつエッジを境界エッジとする．

ネットワークポロノイ図は，道路やその周辺における地形の制約を考慮した，道路網上の特定地点からの勢力関係を得ることができる．例えば，通学の距離を考慮した学区の決定，消防署の管轄範囲，店舗の商圈問題などに用いられている．

2.2 生成アルゴリズム

ネットワークポロノイ図を生成するには， G 上に予め与えられたノード集合に対して，各母点からダイクストラ法により，ノードやエッジがどの母点に所属するかを探索することができる．特に，複数の母点から同時にスタートして，各ダイクストラ法の探索ステップを進める順序を決定すれば，並列にノードポロノイ図とエッジポロノイ図を生成することができる．これを並列ダイクストラ法という．

2.2.1 ノードネットワークポロノイ分割

初期化 (Algorithm 1) :

並列ダイクストラ探索を行う前に，全てのノードについて，母点ノード ID，母点までの経路コスト，母点への経路となる親ノード ID が確定しているか初期化によって求める．また，初期化と同時に展開候補ノードリストを用意する．

Algorithm 1 初期化 (*init*)

```
for all  $p \in N$  do
  if  $p \in K$  then
     $V(p) \leftarrow p; D(p) \leftarrow 0; P(p) \leftarrow \text{root}; M(p) \leftarrow \text{true}; \text{insert}(h, p)$ 
  else
     $V(p) \leftarrow \text{null}; D(p) \leftarrow \infty; P(p) \leftarrow \text{null}; M(p) \leftarrow \text{false}$ 
  end if
end for
```

Algorithm 2 子ノード探索 (*expand_childnode*)

```
for all outgoing_edge( $p, w$ ) with  $M(w) = \text{false}$  do
   $\leftarrow D(p) + \text{cost}(p, w)$ 
  if  $D(w) =$  then
     $V(w) \leftarrow V(p); D(w) \leftarrow$ ;  $P(w) \leftarrow p; \text{insert}(h, w)$ 
  else if  $D(w) <$  and  $< D(w)$  then
     $V(w) \leftarrow V(p); D(w) \leftarrow$ ;  $P(w) \leftarrow p; \text{delete}(h, w); \text{insert}(h, w)$ 
  end if
end for
```

Algorithm 3 ノードネットワークポロノイ分割

```
init
while  $h$  is not empty do
   $p \leftarrow \min(h); \text{delete}(h, p); M(p) \leftarrow \text{true}; \text{expand\_childnode}$ 
end while
```

p : ノード ID, N : 全ノード集合, K : 母点ノード集合, $V(p)$: p の母点ノード ID, $D(p)$: p から $V(p)$ までの経路コスト, $P(p)$: p から $V(p)$ への経路となる p の親ノード ID, $M(p)$: p の母点が確定ならば *true*, h : 展開候補ノードリスト, *insert*(h, p): $h \wedge p$ と $D(p)$ を追加, とする.

展開ノード選択: 展開されるノードは, はじめにすべての母点ノードが選択される. 次に, 任意の母点に対して最も近隣となるノードの順に展開される.

min(h): h からコスト最小ノードかつ最小ノード ID を選択, *delete*(h, p): h から p および $D(p)$ を削除, とする.

子ノード探索 (Algorithm2): 展開ノード選択により選ばれたノードの子ノードをみる. 子ノードは展開候補ノードリストに追加され, 展開ノードとして選択されるときを待つことになる.

w : 子ノード, *outgoing_edge*(p, w): p に接続するエッジによって隣接する w , *cost*(p, w): p, w 間エッジコスト, とする.

以上より, 初期化, 展開ノード選択, 子ノード探索を組み合わせたものがノードネットワークポロノイ分割を行う並列ダイクストラ法 (Algorithm3) である.

2.2.2 エッジネットワークポロノイ分割

エッジネットワークポロノイ分割によって, すべてのエッジについて母点ノードを決定する. また, 境界エッジについては, 境界点の片方のノードから境界点までのコストを求める.

e : エッジ ID, E : エッジ集合, *cost*(e): e のエッジコスト, b : 境界点, とする. e の両端ノードを $p1, p2$ ($p1 < p2$), それぞれの母点ノードを $V(p1), V(p2)$ とおく. *cost*(m, n) をノード m とノード n 間の最短経路コストとすると, *cost*($p1, b$) を求めることでエッジ上境界点の位置が確定する (Algorithm4).

Algorithm 4 エッジネットワークポロノイ分割

```
for all  $e \in E$  do
  if  $V(p1) = V(p2)$  then
     $V(e) \leftarrow V(p1)$ 
  else
     $\text{cost}(p1, b) = \{\text{cost}(e) - \text{cost}(V(p1), p1) + \text{cost}(p2, V(p2))\}2$ 
  end if
end for
```

表 4 部分グラフ生成に用いるフィルターの組合せ

	フィルター				
	a	b	c	d	e
レベル 1					
レベル 2					
レベル 3					
レベル 4					

以上, ノードとエッジのネットワークポロノイ図を生成する.

3. 部分グラフの生成と利用

3.1 考え方

本稿では 4 種類の部分グラフレベル 1~4 を作成する. 部分グラフの共通の特徴は, 指定範囲間を結ぶ経路候補を絞ることである. 部分グラフを構成するための, エッジを選択する (不要なエッジを削除する) 5 種類の機能をフィルター $a \sim e$ とする. 部分グラフごとに用いるフィルター機能を表 4 に示す.

レベル 2~4 については例グラフを図示する (図 2, 3, 5). 3 図共通である基本グラフは細線と太線, 各図の部分グラフを太線で表す. 指定範囲内エッジ {E1...E12} の両端ノードから, 母点ノード {P1...P15} とする. 図 2 にはエッジのコストを括弧内に記す. また, 指定範囲から属性エッジを決定するイメージを図 3 内に点線で示す.

3.1.1 4 種類の部分グラフ

部分グラフの特徴を, 4 種類のレベルごとに述べる.

レベル 1: 全境界生成経路集合

境界エッジによって隣接母点間を結ぶ経路を生成する仕組みを, すべての境界エッジについて行う結果のエッジ集合で部分グラフレベル 1 を構成する. 行き止まりになるエッジや, 母点間経路とならないエッジは含まれない.

境界エッジは, その両端ノードの 2 母点が, 2 母点配下のノードやエッジを経由して隣接関係にあることを示す. また, 第 3 者の母点および母点配下のノードやエッジを経由する必要はない. 2 母点間を結ぶ経路は, ネットワークポロノイ図の結果を用いて, 境界エッジの両端ノードから親ノードを, 母点ノードまでたどることで生成する.

レベル 2: 境界生成最小経路集合 (図 2)

レベル 1 より, 同一組合せ 2 母点の隣接関係を示す境界エッジが複数存在する場合, 母点間最小経路を構成するもとなる境界エッジのみが選択される. 選択されたすべての境界エッジについて, 2 母点間を結ぶ経路を生成する結果のエッジ集合で部分グラフレベル 2 を構成する. 選択されない境界エッジを基

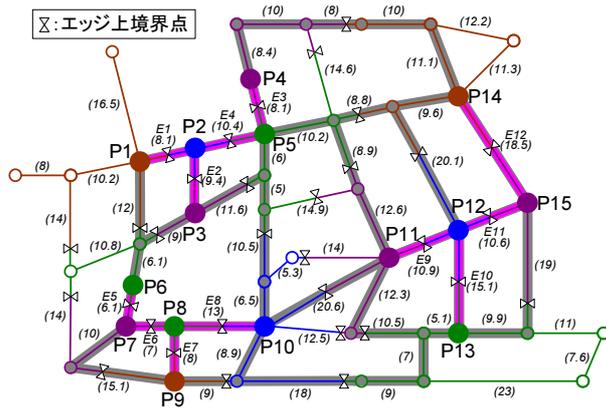


図 2 部分グラフ：レベル 2

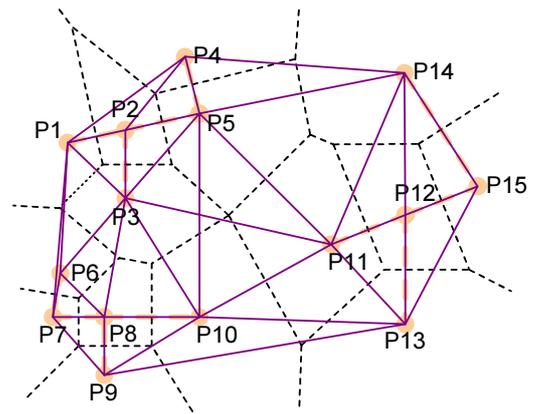


図 4 平面のボロノイ図からドロネー図を生成

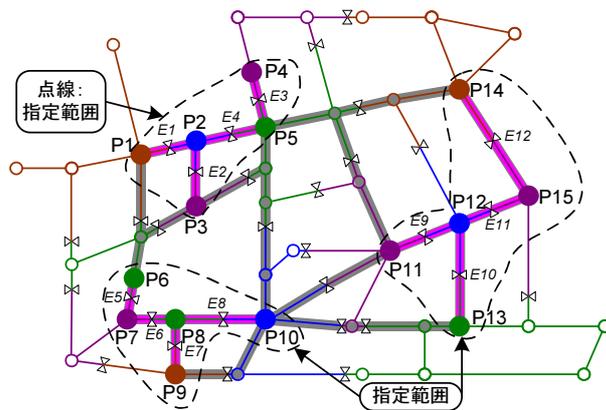


図 3 部分グラフ：レベル 3

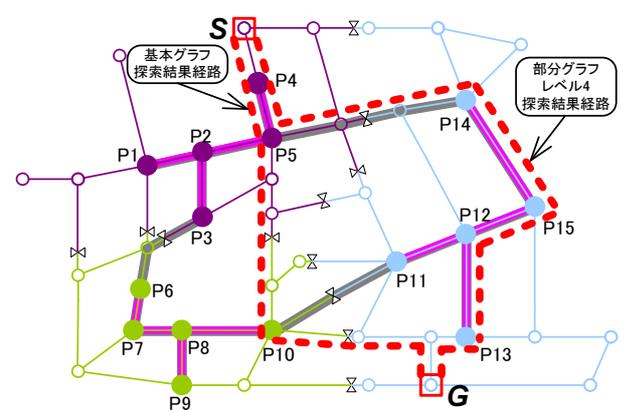


図 5 部分グラフ：レベル 4

とした経路が省かれる。すなわち、レベル 1 の部分集合である。レベル 3：A*探索最短経路集合（図 3）

境界エッジから得られる隣接 2 母点間について、2 母点間の最短経路集合で構成する。行き止まりになるエッジや、母点間経路とならないエッジは含まれない。

部分グラフレベル 1，レベル 2 を構成する母点間経路は、2 母点配下のノードやエッジを経由した経路集合である。しかし、実際には、第 3 者の母点配下のノードやエッジを通過するほうが、2 母点をさらに短く結び経路となる場合が考えられる。

例としてサンプルグラフと同じ座標にある母点について、平面におけるボロノイ図およびドロネー図を生成した（図 4）。ドロネー辺は隣接 2 母点間を線で結び、最小距離を成す。また、2 母点以外の領域を通過するドロネー辺も存在する。

そこで、同様にグラフ上で適応するため、隣接母点間について最短経路探索を行う。最短経路集合が部分グラフレベル 3 であり、グラフ上のドロネー図とみなすことができる。

母点間の隣接関係を元に A*最短経路探索をするのであれば、はじめから母点間最短経路探索をすればいいのではないかと思われるかもしれない。単純に可能性のある母点間の隣接関係に対して A*探索を行うよりも、ボロノイ分割さらにはネットワークボロノイ分割によって、隣接状態にある母点の組み合わせ数を限定させ、A*経路探索回数を減らすことが可能だからである。例として、図 2 サンプルグラフ（母点数:15）では、単純な 2 母点の組み合わせは 105 組ある。図 4 のようにボロノイ分

割した場合は 36 組、ネットワークボロノイ分割した場合は、図 2 のように 26 組となり、ネットワークボロノイ分割によって、探索数の減少を期待できる。

レベル 4：母点グループ間境界生成最小経路集合（図 5）

はじめに、連続した属性有りのエッジからなる母点を 1 つのグループとして区別する。

図 5 を例として説明する。母点を構成するエッジ $\{E1...E12\}$ のうち、連続しているエッジでグループ分けすると $\{E1...E4\}$ ， $\{E5...E8\}$ ， $\{E9...E12\}$ の 3 グループに分けられる。よって、これらのエッジの両端ノードが母点であるから、母点ノードを 3 つのグループ $g1\{P1...P5\}$ ， $g2\{P6...P10\}$ ， $g3\{P11...P15\}$ に分けられる。

次に、境界エッジが隣接関係を示す母点について、この母点の含まれるグループをみる。境界エッジがグループ間の隣接関係を示すと考える。グループを結び経路の基となる境界エッジが複数存在する場合、最小経路を構成する境界エッジのみに絞られ、境界エッジから母点間経路集合が生成される。この母点間経路が、グループ間経路となる。グループ間経路集合が部分グラフレベル 4 を構成する。その他の境界エッジを基とした経路は省かれる。レベル 2 の部分集合である。

3.2 部分グラフの生成手順

3.2.1 フィルター機能

基本グラフから部分グラフを構成するためのフィルターについて述べる。フィルターを組み合わせることによって、異なる

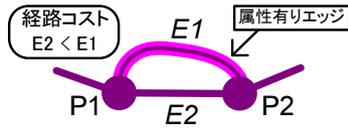


図 6 前提条件が必要となるグラフ例

部分グラフを生成する。

前提条件：母点を構成する指定範囲内エッジ集合

すべての部分グラフについて前提として適用する。母点を構成する指定範囲内エッジをすべて部分グラフに含むものとする。

例えば、図 6 は、母点構成エッジと通常エッジが同一 2 母点 $P1, P2$ を結ぶ。このとき、属性有りエッジ $E1$ よりも、通常エッジ $E2$ のほうが経路コストが小さい場合、後述の部分グラフ適用フィルターによって、母点構成エッジが省かれることを、本前提によって防ぐことができる。

a. 境界エッジ両端ノードから母点ノードまでの経路集合

境界エッジの両端ノードの母点間を結ぶ経路集合を得る。母点間経路は、境界エッジの両端ノードそれぞれの親ノードをたどることで得られる。

b. フィルター a で得た経路のうち同一母点間最小経路集合

フィルター a で生成される経路には、同一の組み合わせの 2 母点間を結ぶ経路が 2 本以上生成されることがある。この場合、経路コストが最小となる経路のみを残す。

c. 境界エッジから得られる母点間の最短経路集合

境界エッジから得られる隣接 2 母点間について、最短経路探索によって 2 母点間を最小コストで結ぶ経路集合を得る。

d. 母点を集合としてグループ化

1 指定範囲内の母点ノードやエッジを 1 つのグループとして区別する。すべての母点ノードがいずれかのグループに割り当てられることになる。

e. フィルター b で得た経路のうち同一グループ間最小経路集合

フィルター d から、グループ内の母点を同一のものとし、フィルター b から得た経路のうち最小コストとなる母点間経路をグループ間隣接経路とする。

3.2.2 フィルターのアルゴリズム

4 種類の部分グラフが構成するエッジは、基本グラフから 5 種類のフィルターを組み合わせることで得ることができる。以下、各フィルターのエッジ選択アルゴリズムについて述べる。

フィルター a (Algorithm5): $e(b)$: 境界エッジ, $p1 \cdot p2$: 境界エッジの両端ノード, $P(p)$: p の親ノード, $edge(m, n)$: ノード m, n を結ぶエッジ, $PathEdgeList(e(b))$: 境界エッジ $e(b)$ から生成される経路を構成するエッジ集合。

フィルター b (Algorithm6): $pathcost(e(b))$: $e(b)$ が構成する母点間経路コスト, $FilterB_BisectorEdges$: フィルター b で経路生成対象となる境界エッジ集合。

フィルター c: 境界エッジから得られる母点隣接関係をもとに、2 母点間の最短経路を構成するエッジ集合を、 A^* アルゴリズム探索によって生成する。

フィルター d (Algorithm7): i : グループ ID, V : 母点ノード ID, $GeneratorSets$: グループ化したい属性の母点ノード集合、

Algorithm 5 境界エッジから母点間経路生成 (*make_path*)

```

add  $e(b)$  to  $PathEdgeList(e(b))$ 
while  $p1 \neq V(p1)$  do
  add  $Edge(p1, P(p1))$  to  $PathEdgeList(e(b)); p1 \leftarrow P(p1)$ 
end while
while  $p2 \neq V(p2)$  do
  add  $Edge(N2, P(N2))$  to  $PathEdgeList(e(b)); p2 \leftarrow P(p2)$ 
end while

```

Algorithm 6 フィルター a を隣接 2 母点につき 1 経路

```

for all  $e(b)$  do
   $pathcost(e(b)) \leftarrow cost(V(p1), p1) + cost(e(b)) + cost(p2, V(p2))$ 
  Bisector edges for  $V(p1), V(p2)$  with same combination
  add  $e(b)$  of  $\min(pathcost(e(b)))$  to  $FilterB\_BisectorEdges$ 
end for
for all  $e(b)$  of  $FilterB\_BisectorEdges$  do
  make_path
end for

```

Algorithm 7 母点をグループ化

```

 $i = 0$ 
repeat
  move  $V$  from  $GeneratorSets$  to  $AdjacentGeneratorList$ 
  repeat
    move  $V$  from  $AdjacentGeneratorList$  to  $GroupNodeList(i)$ 
    for all  $e$  from  $EdgeSetsWithAttributes$  such has  $V$  do
      move another  $V$  of  $e$  from  $GeneratorSets$ 
        to  $AdjacentGeneratorList$ 
      move  $e$  from  $EdgeSetsWithAttributes$ 
        to  $GroupEdgeList(i)$ 
    end for
  until  $AdjacentGeneratorList$  is empty
   $i \leftarrow i + 1$ 
until  $GeneratorList$  is empty

```

$EdgeSetsWithAttributes$: グループ化したい属性の有るエッジ集合, $GroupNodeList(i)$: グループ i に含まれるノード集合, $GroupEdgeList(i)$: グループ i に含まれるエッジ集合。フィルター e (Algorithm8): $g(p)$: ノード p が含まれるグループ, $FilterE_BisectorEdges$: フィルター e で経路生成対象となる境界エッジ集合。

3.3 部分グラフを用いた経路探索

本手法では、経路探索に A^* アルゴリズムを利用する。特定経路をなるべく通るために、特定経路のコストを減らして経路探索した場合、 A^* アルゴリズムでも探索できるが、見込み値も減らす必要がある。そのため、特定経路コストが下がるほど、アルゴリズムの性質がダイクストラ法に近くなる。

しかし、本手法では特定経路コストを調整せずに探索を行うため、 A^* アルゴリズムの見込み値の性質を有意義に活用でき、ダイクストラ法に比べ、ステップ数の減少が期待できる。

3.3.1 基本グラフ上で経路探索

基本グラフ上の任意のノードを始点および終点として選択する。経路探索から 2 ノード間の最短経路を導く。

Algorithm 8 隣接グループ母点間につきフィルター b 経路

```

for all  $e(b)$  of FilterB_BisectorEdges from filter b do
  if  $g(p1) = g(p2)$  then
    delete  $e(b)$  from FilterB_BisectorEdges
  end if
end for
for all  $e(b)$  of FilterB_BisectorEdges do
  Bisector edges for  $g(p1), g(p2)$  with same combination
  add  $e(b)$  of  $\min(\text{pathcost}(e(b)))$  to FilterE_BisectorEdges
end for
for all  $e(b)$  of FilterE_BisectorEdges do
  make_path
end for

```

表 5 「図 5」ノード S, G 間の経路値

	経路コスト	指定範囲部分コスト	探索ステップ
基本グラフ	74.5	10.9	70
部分グラフ L.4	101.4	79.8	21

探索によって、2 ノード間の経路を構成するノード・エッジ、経路コスト、指定範囲部分経路コスト、探索ステップ数を得る。

3.3.2 部分グラフ上で経路探索

前項と同様に、基本グラフ上の任意のノードを始点・終点として選択する。探索結果についても、前項と同様に得られる。

基本グラフ上の、部分グラフに含まれないノードやエッジ間の経路については、指定範囲を含まないため、最短経路が最適経路をもみだす。すなわち、選択された始点、終点ノードが同一の母点配下であるときは、指定範囲を通過する意味はなく、前項の基本グラフ上での経路探索が最適経路となる。

選択された始点、終点ノードが異なる母点配下であり、かつ、部分グラフ上に存在しない場合は、それぞれノードの2母点間を部分グラフ上において経路探索する。ノードから母点への経路については、ネットワークポロノイ図生成時に得た、ノードの親ノードをだどることでノードとノードの母点間の最短経路を得られるため、改めて経路探索する必要はない。

欠点：本項の2ノード間経路は基本グラフから部分グラフに乗換え、部分グラフから基本グラフに乗換える流れで構成される。本手法では前提として、終始点ノードの母点ノードをグラフ乗換えノードとしてシミュレートする。しかし、終始点ノードの母点ノードを乗換えノードとせずに、部分グラフ上の他のノードからグラフの乗換えを行うほうが、経路によっては、より良い結果を得られる場合がある。つまり、本前提では遠回りの経路が生成される場合が考えられるのである。最適なグラフ乗換えのためのノードを選択するしくみについて、今後検討する必要がある。

3.3.3 探索結果の比較例

例として、図5ノード S, G 間の経路探索を行う。基本グラフ上の探索結果は左側破線に沿った経路、部分グラフレベル4上の探索結果は右側破線に沿った経路である。2経路について得られた値を表5に記す。

後述のシミュレーションでは、実空間道路情報を利用して、



図 7 グラフ構造化した高槻市街中心部の道路網

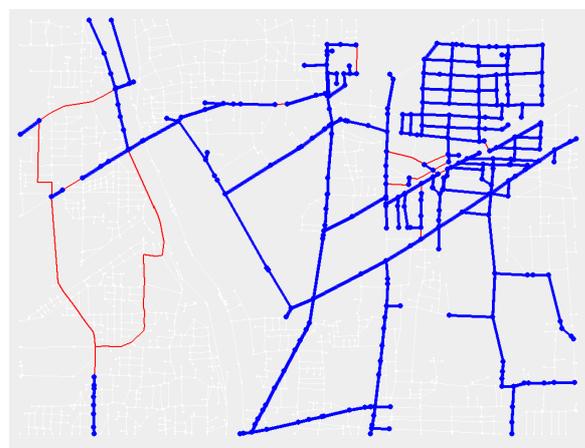


図 8 属性「街灯」部分グラフレベル 4

同一終始点組み合わせについて異なるグラフ上で、同様に経路を生成する。得られたグラフごとの経路値を比較して、部分グラフの有効性を示す。

4. 評価

提案方式のシミュレータを実装し、異なる道路状況および出発地目的地に応じた経路生成を行い、得られる提案方式の有用性を確認する。

4.1 道路地図の利用

本稿では、国土地理院数値地図 2500(空間データ基盤, 1/2500 縮尺)の高槻市街地中心部の地図を利用する。この地図の道路網のみを図7に示す。黒線が道路、黒線上の点が交差点を示す。

また、道路上の空間状況として7種類の道路属性を実地調査により用意する。この属性は、街灯の有無・人の多さ・車の多さ・屋根の有無・ガードレールの有無・坂の有無・信号の有無の7種類である。これらの情報をエッジに対し、0または1で反映させる CSV ファイルを作成する。属性値1のエッジの両端ノードをネットワークポロノイ分割の母点とする。

高槻市街マップで属性「街灯」について、部分グラフレベル4を生成した結果を示す(図8)。太線エッジは街灯のある道路を示し、細線エッジは街灯の無い道路で、連続した太線エッジのグループ間を結ぶ。ただし、通常エッジは明示していない。

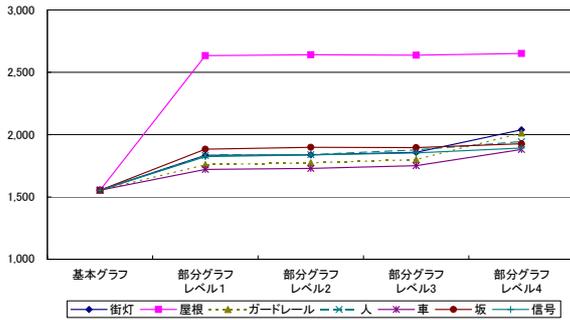


図 9 評価 1: 各段階における経路長 (単位: m)

4.2 シミュレータの構成

事前準備: 地図データの道路網情報を読み込み, 7 属性 (街灯・人・車・屋根・ガードレール・坂・信号) について, 1 属性ごとにネットワークボロノイ図を生成する. 次に, 部分グラフ生成シミュレータを利用し, レベルごとに 4 種類の部分グラフを生成する. ここで, 道路グラフについて, 基本グラフ 1 種類, 部分グラフ 28 種類が生成される.

利用者経路探索: 利用者を想定して, 基本グラフのノードから始点ノード・終点ノード 30 組をランダムに選択する. 基本グラフおよび属性・レベルごとの部分グラフ上で経路探索を行い, 終始点ノード間経路コスト, 属性部分経路コスト, 経路探索ステップ数を得る.

4.3 評価

シミュレーション結果について, 比較および考察する.

評価 1: 経路全体の経路長について, 基本グラフ探索と, 提案手法について比較する.

評価 1 の結果 (図 9): 指定範囲の大小にかかわらず提案手法では, 経路全体の経路長に大小があるが増大が見られた. これは, 基本グラフ探索では最短経路が求められるが, 提案手法では遠回りをするためと考えられる.

評価 2: 全経路長コストと属性あり部分経路コストについて, 基本グラフ上の探索結果平均をそれぞれ 100% として, 全 7 属性の平均値を評価する.

評価 2 の結果 (図 10): 部分グラフにおける全経路長平均は, 4 種類ともに大きな変化は見られず, レベル 1 から 4 につれて若干上昇した. それ以上に属性有り部分経路コストは, 基本グラフに比べて部分グラフレベル 1 から 3 については約 2 倍に増大し, レベル 4 については, 約 3 倍と大幅に増加した.

以上から, 部分グラフを利用した場合の経路長の増大以上に, 属性有り部分経路の増大を期待できる.

評価 3: 基本グラフ探索と提案手法での A* アルゴリズム探索時の探索ステップ数を指標 (平均値) によって評価した. ただし提案手法については, 部分グラフ上の探索ステップ数とする. 終始点の母点ノードまでの経路は既知であるため, ノード展開数には計上しない.

評価 3 の結果 (図 11): 基本グラフ探索では平均値約 400 に対し, 部分グラフレベル 1 から 4 につれて, 減少が見られた. 部分グラフを利用した提案手法のほうが, 基本グラフを用いる探索よりも探索ステップ数の減少, つまり探索時間が短くなるこ

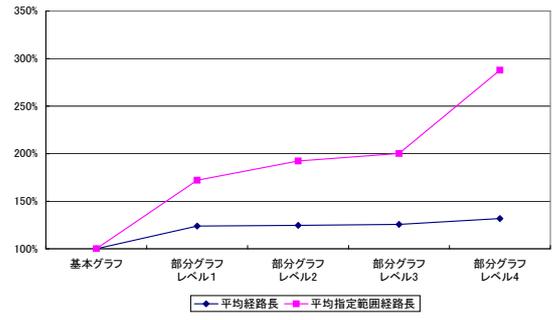


図 10 評価 2: 各段階における経路長と指定範囲経路長の変化

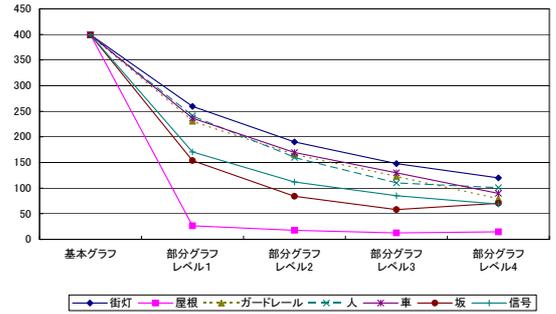


図 11 評価 3: 各段階におけるノード展開数 (単位: 回)

とがわかる.

屋根属性のステップ数が, 他の 6 属性と比較して部分グラフ 4 種類すべてにおいて値が急激に減少した. これは, 屋根属性の経路がグラフ全体に対して少ないことによって, 探索するエッジ数が少なくなるためであると考えられる.

以上の結果をふまえて: 提案手法では, 基本グラフ上での最短経路生成と比較して, 経路コストの増加増えることは不利であるが, 本稿の目的である, 指定範囲経路の増加, 探索ステップ数の減少を期待できる.

4.4 事例

実際の利用を想定して, 2 事例を考える. 出発地, 目的地は実空間において状況が合致する地点を道路地図上から選択する. 前述のシミュレータを用いて経路を生成し, 結果を考察する.
事例 1: 市街中心部の明るいところから, 郊外の暗い自宅に帰る場合, できるだけ明るい道を通って帰りたい.

基本グラフ探索では, 経路長 851m・指定範囲の通過長 247m, 部分グラフレベル 3 においては, 経路長 1140m・指定範囲の通過長 691m. 部分グラフレベル 4 では, 全経路長 1528m・指定範囲の通過長 1375m であった. 基本グラフ探索と部分グラフレベル 3, 4 を比較した場合, 経路長がレベル 3 の場合 1.34 倍に, レベル 4 の場合 1.8 倍. 指定範囲の通過長は, レベル 3 の場合 2.8 倍, レベル 4 の場合 5.57 倍となった. 経路長の増大以上に指定範囲通過長の増大が見られた (図 12).

事例 2: 川を挟んだ向こう岸にある目的地へ, できるだけ明るい道を通って行きたい.

基本グラフ探索では, 経路長 1632m・指定範囲の通過長 92m, 部分グラフレベル 3 においては, 経路長 1632m・指定範囲の通過長 92m. 部分グラフレベル 4 では, 全経路長 1663m・指定範囲の通過長 1177m であった. 基本グラフ探索と部分グラフ

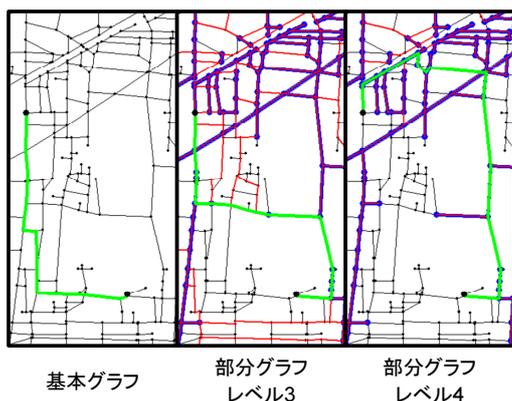


図 12 各道路地図において得られた経路 (事例 1)

レベル 3・4 と比較した場合、経路長がレベル 3 の場合は変わらず、レベル 4 の場合 1.01 倍。指定範囲の通過長は、レベル 3 の場合は変わらず、レベル 4 の場合 12.79 倍。基本グラフ探索と部分グラフレベル 3 では、結果は変わらなかったが、部分グラフレベル 4 では、ほとんど経路長は変化せずに指定範囲を通過する距離が 12 倍になった。

2 事例の考察：事例では、部分グラフレベル 4 が大きな効果をもたらしている。しかし、部分グラフレベル 4 は、レベル 1~3 と比較してエッジ数が少ないため、状況によっては逆に遠回りしすぎてしまうことも考えられる。提案手法の効果は、利用者の状況によって大きく変化することがわかる。

5. 関連研究

安全性や快適性を考慮した経路探索パラメータをアンケート調査から道路情報に付与し、歩行者にとって最適な経路探索条件を優先する経路を生成する研究 [1] が行われている。この研究では、経路探索条件の経路を優先的に導くために経路コスト値を変化させて経路探索を行っている。本稿では、経路探索条件すなわち指定範囲を中心としたグラフ上にて、コスト値を変化させずに経路生成を行う。

また、最適経路探索結果の経路コスト値は最短経路探索結果の経路コスト値以上となる。しかし、前者の値が大きすぎると利用者にとって移動距離が負担となりうる。始点から終点への視野角内の移動支援設備を対象として経路を生成する研究 [2] では、視野角を変化させることによって利用者が求める移動支援設備や移動距離の増減を可能とする。本研究においては、指定範囲経路コストにパラメータを与えることで最短経路距離と比較した最適経路距離の許容範囲を利用者が指定可能とする仕組みの検討が今後必要であると考えられる。

[4] では、歩行者は車とは違って、最適経路を好むものであると述べている。この研究では、駅の中を移動する利用者が携帯電話を利用して駅の中のランドマークを頼りに道案内を受けるシステムを提案している。本稿では、屋外の属性範囲を利用してシミュレーションするが、この研究では、駅の中のさまざまなランドマークをコンテキストとして用いている。

ネットワークポロノイ図を最近傍問題にあてた研究 [11] では、事前に興味地点を母点としてネットワークポロノイ図を生成し、

ネットワークポロノイ面に含まれる境界点どうしのすべての組合せについて事前に経路を生成して、最寄りの興味地点への経路探索に利用する。本稿では、境界点から母点間の経路を事前に計算する。

ネットワークポロノイ図の生成元として、ノード (点) のみでなく、線を母点として生成する研究 [12] がある。事例として、幹線道路を母線として支線道路をネットワークポロノイ分割する手法を提案しており、1 母線が 1 母点となっている。本稿では、指定範囲情報を持つエッジの両端ノードをそれぞれ独立した母点としてネットワークポロノイ分割を行う。

6. おわりに

本稿ではネットワークポロノイ図を用いて、指定範囲に依存した部分グラフを生成する。この図はネットワーク上のドロネー図を構成する。また、有用性について、グラフ上の 2 ノード間経路探索によって、より多くの指定範囲を通過する経路が求められ、より少ないステップ数で経路探索を行うことを、実空間データを用いて示す。ネットワークポロノイ図を用いた研究は、母点ごとの支配領域の生成に主だっているものが多いが、本稿では母点間の隣接関係に着目したネットワークを構成する。

今後の課題として、経路探索以外の部分グラフの評価手法や、よりスケーラブルな空間に対応するため、分散型ネットワークポロノイ図生成についても検討する必要がある。

文 献

- [1] 松田三恵子, 杉山博史, 土井美和子, “歩行者の経路への嗜好を反映した経路生成” 電子情報通信学会論文誌, J87-A, 1, 132-139, 2004.
- [2] 多賀大泰, 細川宜秀, 高橋直久, “歩行者状況に適合する移動支援設備選択を伴う誘導ルート生成システムの実現方式” 情報処理学会 研究報告 データベースシステム vol.2005, No.42.
- [3] 別所正博, 小林真輔, 越塚登, 坂村健, “状況情報の形式的記述の可能な位置モデルに基づくヒューマンナビゲーションのための経路生成手法” 情報処理学会 研究報告 コピキタスコンピューティングシステム vol.2006, No.14.
- [4] A.Millonig, K.Schechtner, “Developing Landmark-Based Pedestrian-Navigation Systems” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.8, No.1, 43-49, 2007.
- [5] Atsuyuki Okabe, Barry Boots, Kokichi Sugihara, Sung Nok Chin, “Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams” 2nd edition “218-224, 2000.
- [6] Margot Graf, Stephan Winter, “NETWORK VORONOI DIAGRAMS” Diploma thesis, Institute for Geoinformation, Technical University Vienna, Austria, 2003.
- [7] Martin Erwig, “The Graph Voronoi Diagram with Applications” Networks, 36(3), 156-163, 2000.
- [8] Peter E.Hart, Nils J.Nilsson, Bertram Raphael, “A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths” IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, Vol.4, No.2, 100-108, 1968.
- [9] E. W. Dijkstra, “A note on two problems in connexion with graphs.” Numerische Mathematik Vol.1, 269-271, 1959.
- [10] 国土地理院, 数値地図 (空間データ基盤), <http://sdf.gsi.go.jp/>
- [11] Mohammad Kolahdouzan, Cyrus Shahabi, “Voronoi-Based K Nearest Neighbor Search for Spatial Network Databases” the 30th VLDB Conference, 78, 2004.
- [12] 佐藤俊明, 岡部篤行, “線及び面を生成元とするネットワークポロノイ図を用いた解析ツールの開発” CSIS Discussion paper, 78, 2006.