

(78) 歩行者向け経路探索のための ハイブリッドネットワークモデルの実装

富井 建¹・蒔苗 耕司²

¹学生会員 宮城大学大学院事業構想学研究科（〒981-3298 宮城県黒川郡大和町学苑 1-1）
（国際航業株式会社 技術サービス本部（〒183-0057 東京都府中市晴見町 2-24-1））

E-mail:tatsuru_tomii@kk-grp.jp

²正会員 宮城大学教授 事業構想学群（〒981-3298 宮城県黒川郡大和町学苑 1-1）

E-mail:makanae@myu.ac.jp

カーナビゲーションにおける経路探索に用いるネットワークは、移動領域中の代表的な経路を線的に定義したネットワークで構成され、歩行者向けの経路探索システムでも同様のネットワークが用いられる。しかし、実際の移動を考えた場合、歩行者は領域上の面的な障害物を避けながら移動すると考えられる。したがって、歩行者向けのネットワークも面的に障害物を評価できるモデルが必要である。

本稿では、可視グラフとグリッドグラフを用い、それらのグラフを接続したものを歩行者向けのネットワークモデルとして定義した。また、これらのモデルを用いた経路探索アプリケーションを実装し、その評価を行った。

Key Words: pedestrian navigation, path finding, network model, visibility graph, grid graph

1. はじめに

カーナビゲーションシステムなどの一般的なナビゲーションシステムでは、移動領域を線として抽象化したネットワークモデルをもとに経路探索を行う。歩行者ナビゲーションシステムでも同様に、移動できる場所を予め線として表現したモデルが用いられることが多い¹⁾。しかし、実際の歩行者の移動を考えると、歩行者は面的な領域から効率的に移動可能な経路を選択して移動していると考えられる。移動面上には、段差や水たまり、地形の起伏など、移動に影響を及ぼす様々な要因が存在するが、予め経路が決められた線的なネットワークではこれらの環境要因を反映したナビゲーションを実現することは難しい。本稿では、移動面上において、移動に影響する要因を評価し、それに基づいた経路を探索できるネットワークモデルの検討を行い、それを実装したアプリケーションを構築し評価を行う。

2. 関連研究

平面上の最短経路は、可視グラフを利用することで求めることができる。ただし、3次元における最短経路は

障害物の辺上のどこでも経由しうするため、頂点間をリンクする可視グラフでは、最短距離を求めることができない²⁾。したがって、地形等の高低差がある3次元的な空間で可視グラフを用いるには留意が必要である。可視グラフを用いた先行事例としては、屋内環境を可視グラフによりモデル化し、ナビゲーションシステムで利用している研究がある³⁾。

可視グラフの他に、移動可能な面から線的なネットワークへ抽象化する手法として、面の中間軸（スケルトン）を生成し、ネットワークを構成する方法がある。スケルトンを生成する手法としては、ボロノイ図あるいはドロネー三角形分割によって求める手法⁴⁾⁵⁾や、straight skeleton手法⁶⁾などがある。また、ラスタ画像から移動可能な領域を定義し、モルフォロジ演算により移動可能領域を収縮させて行くことでスケルトンを得る方法⁷⁾がある。

可視グラフやスケルトンによるネットワークを利用した場合、その平面上・経路上の最短経路を求めることは可能であるが、地形の起伏や地表面上の移動にかかわる環境情報を取得して、障害物をなるべく避けながら移動するような経路を探索することは難しい。面上のコストを含めた最適な経路探索を行うには、面を格子状に細分化し、それぞれのタイルにコストを設定する手法が考えられる。面を均一に細分化するには、セルを正三角形、

正方形、正六角形のうちのいずれかの形状で分割し、隣接するセル間でリンクしたネットワーク（グリッドグラフ）を構築する。例えば正方形のセルで分割し、上下左右4方向に同じコストでリンクするグリッドグラフで最短経路探索を行った場合、マンハッタン距離と等価となるため、実際の最短経路とは異なる経路を算出してしまう可能性がある。

3. 歩行者向けネットワークモデルの構築

歩行者の移動に影響する要因を考えた場合、移動領域ごとに異なる特性があり、その特性に応じて適切なネットワークモデルを適用する必要がある。そこで本稿では、領域ごとに最適なモデルを適用し、それぞれの領域の異なるモデル間をシームレスに接続して経路探索を行える歩行者向けのハイブリッドネットワークモデルを構築する。

(1) グリッドグラフ

本稿では、移動領域を均一な正方形に分割し、隣接セル同士が接続したグリッドグラフを利用する。接続する隣接セルは、上下左右と斜め4方向をあわせた8方向にリンクするグラフを用いる。

グリッドグラフは、地形の起伏や水たまりなど、領域上移動可能であるがコストが異なる領域を含む場合に用いる。

(2) 可視グラフ

可視グラフは始点、終点、及び、障害物の頂点をノードとし、各頂点間に障害物がない場合にリンクを作成して構築される。

可視グラフは、屋内のようなどこを通っても移動コストがほぼ距離に比例するような領域に用いる。したがって、移動コストを適用したい場合、グラフ上のリンクすべてに対し、一意の値を適用する。

(3) モデル間の接続

図-1 に、同一の領域上に障害物を配置したマップを設定し、グリッドグラフ、可視グラフそれぞれのモデルに基づいて経路探索を行った例を示す。ここで、グリッドグラフは整数座標でノードを配置しており、障害物の頂点 p は格子のノード間に存在している。算出結果では、可視グラフとグリッドグラフで、それぞれ別の経路を示している。グリッドグラフにおいては障害物の時計回り、反時計回りのいずれの経路においても最短経路は同一となり、探索順によりどちらか一方が選択されることになるが、可視グラフで算出される実際の最短経路は時計回

りの経路である。この例に示すように、グリッドグラフでは、格子間隔による誤差が発生し、必ずしも最短距離で経路を算出できるとは限らない。一方で、可視グラフは障害物の頂点をノードとして用いるため、草むらのような障害物内を通過するような探索を行いたい場合、適切な経路検索が難しい。したがって、これらモデルをそれぞれ適した領域に用い、モデル間を接続することで歩行者向けのネットワークを構築する。

4. ネットワークモデルの実装と検証

歩行者向けのネットワークモデルを用いた経路探索アプリケーションの実装を行い、経路探索の検証を行った。

実装にあたり、グリッドグラフでの格子は、論理的には無限に生成されうることから、評価に必要な探索空間は膨大になると考えられる。しかし実際の利用を想定すれば、出発地点から目的地までの距離はユークリッド距離よりも短くなることはないため、その距離を経路探索の枝刈りに利用をすることができる。本稿では、最短経路探索に A* アルゴリズムを用い、そこでのヒューリスティック関数に2点間のユークリッド距離を利用する。また、移動コストには障害物ごとにコスト関数 a を定義し、影響するリンクのコスト評価に用いる。あるリンク l のユークリッド距離を $L(l)$ 、リンク上の障害物を m 、リンクの属するグラフ全体のコストを $b(l)$ 、コスト係数を $a(l, m)$ としたとき、移動コスト $COST(n)$ は式(1a)により求められる。ただし、可視グラフにおいては、障害物は通過不可能なものしか扱えないため、式(1b)へと簡略化される。

$$COST(l) = L(l) * b(l) * \prod_{k=1}^m a(l, k) \quad (1a)$$

$$COST(l) = L(l) * b(l) \quad (1b)$$

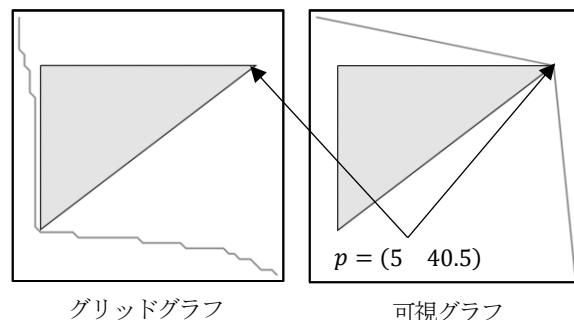


図-1 グリッドグラフと可視グラフの比較

(1) グリッドグラフの経路探索

グリッドグラフを用いた経路探索アプリケーションを実装し、検証を行った。図-2は移動できない障害物、及び、移動できるがコストが高い($\alpha = 1.1$)障害物が存在する状態を表したネットワークである。障害物が一部重複している領域はコストの総乗となる。算出結果から、なるべく障害物を避けつつ、距離も短くなるような経路を算出していることがわかる。

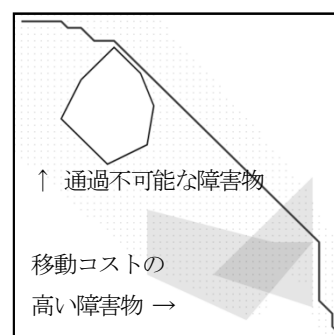


図-2 障害物を配置したグリッドグラフでの経路探索

(2) グリッドグラフと可視グラフを接続したネットワークの経路探索

図-3は可視グラフとグリッドグラフを接続したネットワークであり、可視グラフの左右4箇所ずつ、合計8箇所にグラフ間のリンクを設定している。そのグラフに4パターンのコスト設定をしたネットワークを定義し、検証を行った。これら条件を整理したものを表-1に示す。

(a)では可視グラフを経由した経路を算出しており、これがネットワーク上の距離としては最短の経路であることがわかる。(b)では可視グラフを経由しない経路を算出しており、グリッドグラフのみで移動したほうが低いコストであることを示している。(c)では(b)と同様の経路を算出しており、なるべく障害物を避けつつもグリッドグラフを移動したほうが低いコストであることを示している。(d)ではグリッドグラフの障害物のコストが高いため、可視グラフの経路を選択していることがわかる。

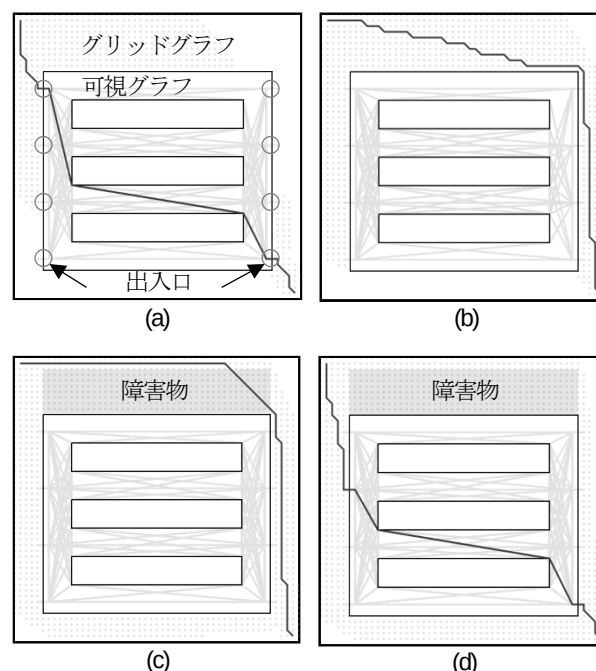


図-3 可視グラフとグリッドグラフの接続

(3) 考察

グリッドグラフによる経路探索では、なるべく障害物を避けつつ、距離も短くなるような経路を算出することができた。その応用例としてグリッドグラフの各セルに標高値をコストとして与えたネットワークを図-4に示す。このネットワークでは、色の薄い領域が標高の高い部分、色の濃い部分が標高の低い部分、白線が探索結果の経路であり、登りを高いコストで、降りを低いコストで設定している。算出された経路は、なるべく登りの少ない経路を選択していることが分かる。以上のことから、グリッドグラフは、障害物上の移動にかかる面的なコストを評価したい場合に有用だと考えられる。

可視グラフとグリッドグラフを接続したネットワークについての検証では、各ネットワーク上のコスト変化に応じて、経路も変化するような結果を得ることができた。グリッドグラフを屋外、可視グラフを屋内と見立てた場合、屋外の天候状況や屋内の混雑具合のように移動コストが変化する状況下において、そのときどきの状況に応じた最適な経路を動的に算出できると考えられる。

表-1 図-3における各グラフの移動コスト（グリッドグラフの数値は障害物上の移動コストを示す）

	コスト(a)	
	可視グラフ	グリッドグラフ
(a)	1.0	障害物なし
(b)	1.2	障害物なし
(c)	1.2	1.1
(d)	1.2	1.3

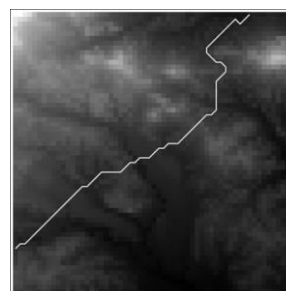


図-4 標高値を設定したグリッドグラフ（国土地理院の数値標高モデルを利用）

5. おわりに

本稿では、歩行者向け経路探索のためのネットワークモデルとして、可視グラフ、グリッドグラフのモデルを用い、領域ごとの特性に合ったモデルを適切に選択することを提案した。起伏や水たまりなど、通過可能な障害物を経路探索に反映させる必要がある場合にはグリッドグラフを用い、領域上のどの面も移動コストが一定の領域については可視グラフを用いることで適切な経路探索を行うことができる。また、それらのモデル間を接続することで、領域ごとの特性に合った最適な経路探索を実現できた。

また、ここで提案するネットワークモデルを利用した経路探索アプリケーションを実装し、その評価を行った。グリッドグラフを用いた検証では、通過可能な障害物を評価した経路探索を行いたい場合に有用であることを確認した。また、可視グラフとグリッドグラフと接続したネットワークを用いた検証では、それぞれの領域の特性を反映しながら、総合的に移動しやすい経路を算出することができた。

本稿では可視グラフとグリッドグラフ、2種類のグラフモデルを用いたが、電車や道路ネットワークのような、一般的な代表線のグラフとも接続が可能である。これらのネットワークと接続することで、乗換えも意識した、より幅広い歩行者ナビゲーションへ応用できると考えられる。

また今回の検証では、簡易なネットワークに基づいた検証に留まったが、今後は現実の空間情報を適用したネットワークでの検証・評価が必要である。ここで懸念されることは、探索空間が大きくなることによる計算量の増大である。障害物や移動体の大きさを念頭に置いた、

格子密度の適切な設定が必要と考えられる。また、実際のサービスへの実現を念頭に置いた場合、移動に影響を与える障害物の定義や観測手法も検討が必要となる。気象や混雑状況、横断歩道の信号などは時間により動的に変化するため、それら動的な情報をリアルタイムに反映するための手法の開発とシステムへの実装が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省：歩行空間ネットワークデータ等整備仕様案、<<http://www.mlit.go.jp/common/001177504.pdf>>、(入手 2017.5.22)。
- 2) M. ドバーク, O. チョン, M. ファンクリベルド, M. オーバマーズ (浅野哲夫訳)：コンピュータ・ジオメトリ 計算機科学：アルゴリズムと応用 第3版, pp.367-378, 近代科学社, 2010.
- 3) 岩名地良太, 新田知之, 石川和明, 柳澤政生, 戸川望：歩行者の視点情報に基づく屋内経路案内, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2016 論文集, pp.1748-1756, 2016.
- 4) Roberts, S.A., Hall, G.B. and Boots, B.: Street centerline generation with an approximated area Voronoi diagram, *Proc. Developments in Spatial Data Handling*, pp.435-446, 2004.
- 5) Chithambaram, R., Beard, K., and Barrera, R.: Skeletonizing polygons for map generalization, *Technical Papers, ACSM-ASPRS Convention, Cartography and GIS/LIS, Vol. 2*, pp.44-55, 1991.
- 6) Aichholzer O., Alberts, D., Aurenhammer, F. and Gärtner, B.: A Novel Type of Skeleton for Polygons, *Journal of Universal Computer Science*, 1(12), pp.752-761, 1995.
- 7) Walter, V., Kada, M. and Chen, H.: Shortest path analyses in raster maps for pedestrian navigation in location based systems, *International Symposium on "Geospatial Databases for Sustainable Development", ISPRS Technical Commission IV*, CD-ROM, 2006.