

# 階層化された不均一矩形状分割ネットワーク データに基づく道路網の最適経路探索手法

石田 裕三    加藤 誠巳  
(上智大学理工学部)

大規模な道路網ネットワークに対して、Dijkstra 法<sup>[1]</sup>を用いて遠隔 2 地点の最小コスト経路探索を行う場合、あらゆる方向に対して探索を行うため多大な探索時間がかかることがある。この探索時間を減少させるために、前処理として任意の 2 つの不均一矩形状分割された領域間のすべての最小コスト経路を算出し、そのすべての経路が通過する不均一矩形状分割された領域とその領域内に存在するリンクの最下位階層コードを求め、それを基にして探索領域限定用テーブルを作成し、そのデータを参照して必要十分な探索領域のみのネットワークデータを用いて経路探索する手法を提案する。

## An Optimal Route Search Method for Road Networks Based on Hierarchical Network Data divided into Nonuniform Rectangles

Hiromitsu ISHIDA    Masami KATO  
Faculty of Science and Technology, Sophia University  
7-1, Kioi-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 102 Japan

In case of large road networks, Dijkstra method requires a considerable amount of time to find the optimal route to the destination far from the origin, because that method investigates for all direction. In this paper, the nationwide road networks of Japan are divided into nonuniform rectangles having almost the same number of network links. A look-up table showing which rectangles are necessary and sufficient in order to calculate the optimal route was constructed off-line. This table also includes the hierarchy code of the road networks to be read from the hard disk storage. The feature of the proposed method is that the network data to be loaded into RAM is reduced as small as possible and that the route obtained is guaranteed to be optimal.

## 1 まえがき

大規模な道路網ネットワークを対象として、Dijkstra 法<sup>[1]</sup>を用いて遠隔 2 地点の最小コスト経路探索を行う場合、あらゆる方向に対して探索を行うため膨大な時間がかかる。この探索時間を減少させるために、探索領域を必要十分な範囲に限定することが考えられる。例えば目的地方向の直線路にある程度の幅をもたせた領域、例えば楕円形や矩形などで探索領域を限定する手法があるが、その領域内に湾などが存在しそこを行き来するための橋が無いような場合には、経路を見つけることは不可能であるだけでなく、求まったとしても最適である保証はない。

また、探索領域を限定して経路探索する手法の一つに、地形的特性を考慮に入れて探索領域を郡レベル行政区域で限定する経路探索手法<sup>[2]</sup>がある。この場合、限定される領域が郡レベル行政区域単位なので、郡レベル行政区域内で新たに道路網が増加した場合限定される道路網も増加する。このような場合は道路網が増加した郡レベル行政区域を分割すれば済むが、分割する領域が多いと大変に手間がかかると予想される。そこで、不均一矩形分割した領域を基本単位とすると、分割する領域数をかなり自由に選択できるものと考えられる。また、限定された領域に道路網の階層情報を持たすことによってさらに限定された領域内の道路網を限定することができる。

本論文では、従来の経路探索手法の問題点を解決する階層化された不均一矩形状分割ネットワークデータに基づく道路網の最適経路探索の提案を行うと共に従来の手法と比較することにより本手法の有効性を明らかにする。

## 2 従来の探索領域限定法

道路ネットワークにおける経路探索において、道路ネットワーク・データの格納されているディスクへのアクセス・読み込み時間を短縮させ、またロードして探索を実行するための RAM 容量を削減し、経路算出時間を高速化するため、あまり意味がないと考えられるネットワーク・データを経路探索の対象から除外することは従来から行なわれてきた。例えば、出発点および目的点が指定されたとき、図 1(a)および図 1(b)に示すようにそれらを囲む矩形または楕円の内部に相当する道路ネットワークのみに探索領域を限定することが考えられる<sup>[3]</sup>。ほとんどの場合これで十分な結果が得られるが、例えば図 1(a)あるいは図 1(b)に示すように出発点と目的点の間の湾や川、山脈等によって経路が見い出せない場合が生じ得るし、たとえ得られたとしても最適な経路である保証はない。

RAM に読み込むネットワーク・データ量のおよび探索に要する CPU 時間を減少させる他の方法として階層化経路探索<sup>[4]</sup>が知られている。これは出発点および目的点の近辺でのみデータ量の多い下位の階層の道路ネットワークも使用して最寄りの上位階層の道路ネットワークへの複数個のアクセス・ポイントを見い出し、それ以外では上位の階層の道路ネットワークのみを使用して経路探索を行なうのであるが、道路階層間の遷移に制約があるため、最適な経路が求められる保証がない。

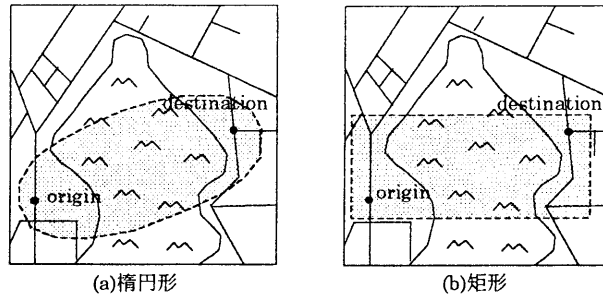


図 1 楕円形・矩形による探索領域限定

探索領域を限定して経路探索する更に他の手法として地形的特性と密接な関係があると考えられる郡レベル行政区域で限定する経路探索手法が提案されている<sup>[2]</sup>。即ち、道路ネットワークのノードは一般的なネットワークのノードとは異なり、固有の $(x, y)$ 座標を有していることに着目し、膨大なネットワークデータを複数の領域に分割し、任意の2つの領域間の最適経路を算出するために RAM にロードすべき領域を予めすべて求めて、これをルックアップ・テーブルとしている。この場合、道路ネットワークデータを複数の領域に分割する方法として郡レベルの行政区域を採用しているが、その理由は郡レベルの行政区界は一般に河川や山脈などの地形的特性と密接な関係を有していることが多く、このような行政区界を横切る道路は少ないと考えられるため、ルックアップ・テーブルの作成に要する時間を減少させるのに多少なりと有利であるというためであったが、各郡レベルの領域内の道路ネットワークのリンク本数は必ずしも均等ではない欠点があるだけでなく、郡レベルを単位としてすべての道路リンクを読み込まねばならない欠点があった。

### 3 提案する探索領域限定法

上述の通り従来のルックアップ・テーブルにより探索領域を限定する手法には問題点があった。ここで提案する探索領域限定法は、以下に述べるようなテーブルを参照することにより、必要十分な領域の階層化された道路ネットワークをディスクから RAM にロードすることにより、ディスクへのアクセス時間を短縮し、必要な RAM 容量を削減し、経路算出時間を高速化するとともに得られた経路の最適性を保証するものである。

前述の如く道路ネットワークの各データにはそれぞれ固有の $(x, y)$ 座標が対応しているので、この道路ネットワークを互いに素な複数の閉領域に容易に分割することができる。ここではこの分割に不均一矩形を採用する。分割方法は、最大不均一矩形の大きさを1次メッシュ（ほぼ80km四方）、最小不均一矩形の大きさを2次メッシュ（ほぼ10km四方）として、1つの矩形内のリンク数がある定められた閾値 $\theta$ 以下になるまで、その矩形を4分割することを繰り返す。このようにして $N$ 個の不均一矩形に全道路ネットワークを分割した場合を考える。このとき不均一矩形を形成する境界線と道路ネットワークのリンクとの交点ノードを境界ノードと呼ぶことにする。

例えば図2に示す如く不均一矩形# $i$ に属する出発点 $O$ から不均一矩形# $j$ に属する目的点 $D$ に至る最適経路を探索することを考える。不均一矩形# $i$ , # $j$ の境界ノード数をそれぞれ $k_i$ ,  $k_j$ とし、不均一矩形# $i$ , # $j$ の第 $i'$ および第 $j'$ 境界ノードをそれぞれ $n(i, i')$ ,  $n(j, j')$ とする。出発点 $O$ と目的点 $D$ が異なる不均一矩形に属する場合、すなわち $i \neq j$ のとき、出発点 $O$ から目的点 $D$ に至る最適経路は不均一矩形# $i$ の境界ノード $n(i, i')$ , ( $i'=1 \sim k_i$ )のいずれかから出て、不均一矩形# $j$ の境界ノード $n(j, j')$ , ( $j'=1 \sim k_j$ )のいずれかから入ることは明らかである。例えば境界ノード $n(i, i')$ から $n(j, j')$ に至る最適経路が不均一矩形# $p$ , # $q$ , # $r$ , # $s$ を通るならば、これらの不均一矩形は不均一矩形# $i$ に属する出発点 $O$ から不均一矩形# $j$ に属する目的点 $D$ に至る最適経路を探索する場合に、不均一矩形# $p$ , # $q$ , # $r$ , # $s$ に属する道路ネットワーク・データは必須であることがわかる。このようにして不均一矩形# $i$ の $k_i$ 個の境界ノード $n(i, i')$ , ( $i'=1 \sim k_i$ )をそれぞれ出発点、不均一矩形# $j$ の $k_j$ 個の境界ノード $n(j, j')$ , ( $j'=1 \sim k_j$ )をそれぞれ目的点とする $k_i \times k_j$ 通りの最適経路を算出し、それらすべての経路が通過する不均一矩形の集合が、不均一矩形# $i$ に属する任意の出発点 $O$ から不均一矩形# $j$ に属する任意の目的点 $D$ に至る最適経路を算出する場合に必要な十分な不均一矩形の集合となる。その際、最適経路が通過する各々の不均一矩形に4で述べる3段階に分けたリンク階層コード1,2または3の最大値を付与し、経路が通過しない不均一矩形にはリンク階層コード0を付与する。

道路ネットワークが双方向性のときは、出発点が不均一矩形# $i$ 、目的点が不均一矩形# $j$ に属する場合に必要な十分な不均一矩形の集合と、出発点が不均一矩形# $j$ 、目的点が不均一矩形# $i$ に属する場合に必要な十分な不均一矩形の集合は同一であるが、双方向性が成り立たないときは2つの集合は異なるがその差異は僅少であると考えられるので記憶容量を削減するため、ここでは両集合の和集合を用いることにした。よって、リンク階層コードはその最大値をとった。

また出発点 $O$ と目的点 $D$ が同一の不均一矩形# $i$ に属する場合にも同様にして最適経路を求めらるのに必要十分な不均一矩形の集合が求められるが、不均一矩形# $i$ のみのデータでは十分でない場合が多いことに注意する必要がある。

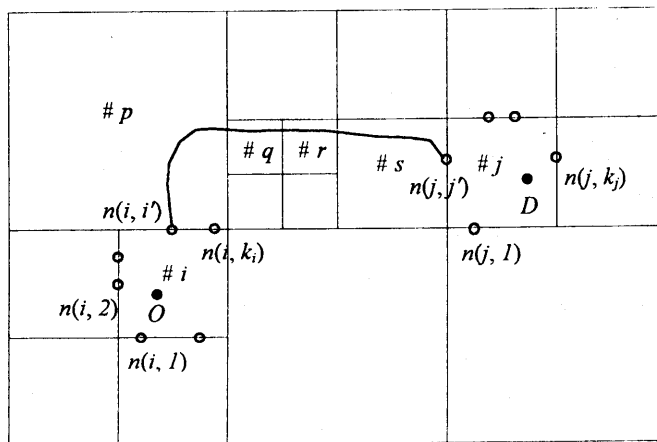


図2 不均一矩形への分割

このようにして表 1 に示すような不均一矩形 $i$  と不均一矩形 $j$  の間の最適経路を探索するのに必要にして十分な不均一矩形の集合を表現するテーブル（これを不均一矩形限定用テーブルと呼ぶ）が形成される。このテーブルのサイズは行方向  $N$ 、列方向  $N(N+1)/2$  であり、テーブルのリンク階層コード 0 から 3 を 2 ビットで表現することになると、

$$N^2(N+1) \text{ ビット}$$

の記憶容量を必要とすることになる。

$N$  が大きいほど、一般に RAM にロードすべきデータは減少するが、テーブル・データが膨大となり適当な大きさの  $N$  を選定する必要がある。ここでは日本全国を郡レベルの行政区域で分けた場合 513 領域であることから、分割数もそれに近い 516 個 ( $\theta=8,000$ ) とした。 $N=516$  のときの不均一矩形限定用テーブルの容量は、17.2MB となる。

表 1 不均一矩形限定用テーブル

| 出発<br>不均一<br>矩形 | 目的<br>不均一<br>矩形 | #1  | #2  | #3  | #4  | ... | ... | ... | ... | #N  |
|-----------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| #1              | #1              | 3   | *   | *   | *   | ... | ... | ... | ... | *   |
|                 | #2              | 3   | 3   | *   | *   | ... | ... | ... | ... | *   |
|                 | #3              | 3   | *   | 3   | *   | ... | ... | ... | ... | *   |
|                 | #4              | 3   | *   | *   | 3   | ... | ... | ... | ... | *   |
|                 | ...             | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
|                 | #N              | 3   | *   | *   | *   | ... | ... | ... | ... | 3   |
| #2              | #2              | *   | 3   | *   | *   | ... | ... | ... | ... | *   |
|                 | #3              | *   | 3   | 3   | *   | ... | ... | ... | ... | *   |
|                 | #4              | *   | 3   | *   | 3   | ... | ... | ... | ... | *   |
|                 | ...             | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
|                 | #N              | *   | 3   | *   | *   | ... | ... | ... | ... | 3   |
| #3              | #3              | *   | *   | 3   | *   | ... | ... | ... | ... | *   |
|                 | #4              | *   | *   | 3   | 3   | ... | ... | ... | ... | *   |
|                 | ...             | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
|                 | #N              | *   | *   | 3   | *   | ... | ... | ... | ... | 3   |
| ...             | ...             | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| #N              | #N              | *   | *   | *   | *   | ... | ... | ... | ... | 3   |

\* : 0~3

#### 4 データ生成の方法

本稿で対象とした道路ネットワークは、日本デジタル道路地図協会の日本全国の基本道路、すなわち都道府県道以上の道路、都道府県道以下の道路幅員が 5.5m 以上の道路およびこれらの道路間を連結する道路で構成されており、ノード数は 583,361、リンク本数は 1,641,444 である。

リンクの階層は、上から高速自動車国道、都市高速道路、一般国道、主要地方道、一般都道府県道、その他の道路になっており、上位階層コード 1 を都市高速道路以上、中間階層コード 2 を一般都道府県道以上、下位階層コード 3 を全道路する 3 階層のリンク階層コードを使用した。上位階層 1 に属するリンク本数は 38,104、中間階層 2 に属するリンク本数は、598,860 であった。

日本デジタル道路地図協会のデータは 2 次メッシュ単位で管理されているので、前述した 516 の不均一矩形を一つの閉領域としてまとめることは容易にできる。また、この場合 516 の閉領域の境界ノード総数は 16,645 である。

このようにして得られた不均一矩形を単位とするネットワーク・データは階層化された不均一矩形毎に 1 から順にノード番号が付与され、各リンクの始点ノード番号、終点ノード番号、そのコストならびに属性等を一括して読み込めるようにした。この場合、これら 516 の領域より成るネットワーク・データは下位階層は全体としてディスク中で約 30MB の容量を占めており、上位階層と中間階層のそれは約 10MB である。

3 で述べた不均一矩形限定用テーブルは日本全国の道路ネットワーク・データに対し、閉領域の境界ノード総数に等しい 16,645 回出発点をかえて他の 16,644 点に至る最適経路を求め、求まった経路を構成するリンクがどの不均一矩形に属するかリンクの階層コードは何であるかを調べる必要があるため、ワークステーション SPARCstation 20 を用いて約 240 時間を要した。

## 5 最適経路探索の手順

本論文で提案する階層化されたルックアップ・テーブルにより探索領域を限定した経路探索の処理の手順は次の通りである。

ステップ 1: 出発点、目的点が属する不均一矩形 $\#i, \#j$ を求める。

ステップ 2: ディスク中にある不均一矩形限定用テーブルの $(\#i, \#j)$ 行( $i \leq j$  のとき)、または $(\#j, \#i)$ 行( $i > j$  のとき)を読み込む。

ステップ 3: 読み込まれた不均一矩形限定用データに応じて、必要十分な階層化された不均一矩形ネットワーク・データをディスクから読み込み、ノードおよびリンクに連続番号を付与する。その際、隣接する不均一矩形が存在する場合には、相応する境界ノード間をコスト 0 の仮想リンクにより相互接続する。

ステップ 4: 得られたネットワーク・データに対して Dijkstra 法を適用して最適経路を求める。

## 6 経路探索の実行例と評価

ここで提案した手法の利点を明らかにするために、日本全国の道路ネットワーク・データを RAM に読み込んだ後、通常の Dijkstra 法を適用した場合（標準探索）と、本手法でリンクの階層を考慮しないで最下層のデータを読み込む場合（単純探索）との比較を行なった。評価項目としてはディスク中の道路ネットワーク・データへのアクセス・読み込み時間、必要とされる RAM

領域に比例すると考えられる RAM 中に読み込まれたリンク本数、ならびに最適経路を探索するのに要した CPU 時間を用いた。また探索に要する実時間にはほぼ比例すると考えられる既探索とされたリンク本数も示した。

例 1 は出発点=九州佐多岬、目的点=北海道知床岬、

例 2 は出発点=愛知県伊良湖岬、目的点=能登半島先端、

例 3 は出発点=東京駅、目的点=横浜駅であり、

時間をコストとして最適経路の探索を行なった結果を表に示す。なお探索の実行には PC-9821As2 を使用した。

図 3、図 4 および図 5 に、それぞれ例 1、例 2 および例 3 に対し本手法により RAM 上にロードした階層化された不均一矩形と算出された最適経路を示す。

表 2 各探索手法の比較

|     | 探索手法 | ディスクアクセス読み込み時間(sec) | 読み込まれたリンク数(本) | 既探索とされたリンク本数(本) | CPU 時間(sec) |
|-----|------|---------------------|---------------|-----------------|-------------|
| 例 1 | 本手法  | 5.7                 | 56,108        | 51,630          | 28.4        |
|     | 単純   | 51.3                | 585,543       | 581,073         | 372.4       |
|     | 標準   | 60.0                | 1,641,444     | 1,634,735       | 1850.1      |
| 例 2 | 本手法  | 4.8                 | 30,171        | 29,548          | 22.1        |
|     | 単純   | 9.3                 | 95,509        | 94,984          | 66.1        |
|     | 標準   | 60.0                | 1,641,444     | 966,626         | 1048.5      |
| 例 3 | 本手法  | 6.2                 | 95,172        | 83,932          | 53.0        |
|     | 単純   | 6.5                 | 96,012        | 84,812          | 53.3        |
|     | 標準   | 60.0                | 1,641,444     | 101,207         | 83.8        |

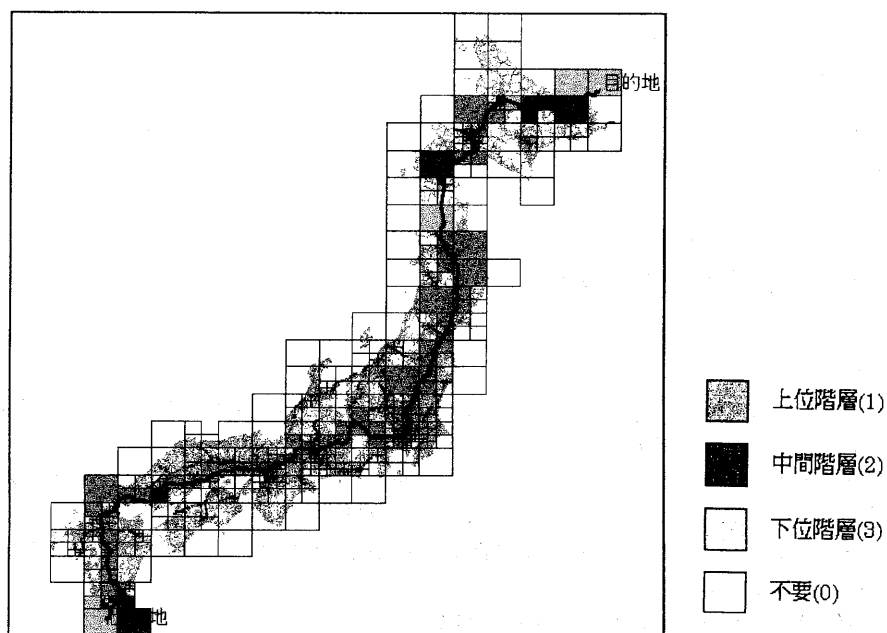


図 3 例 1

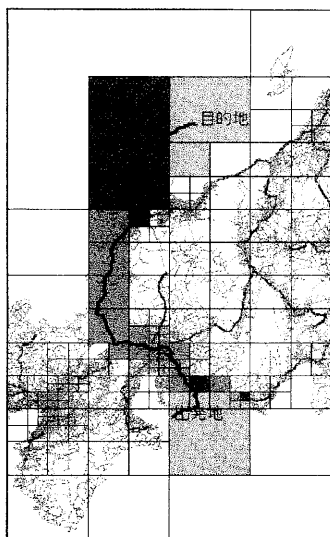


図 4 例 2

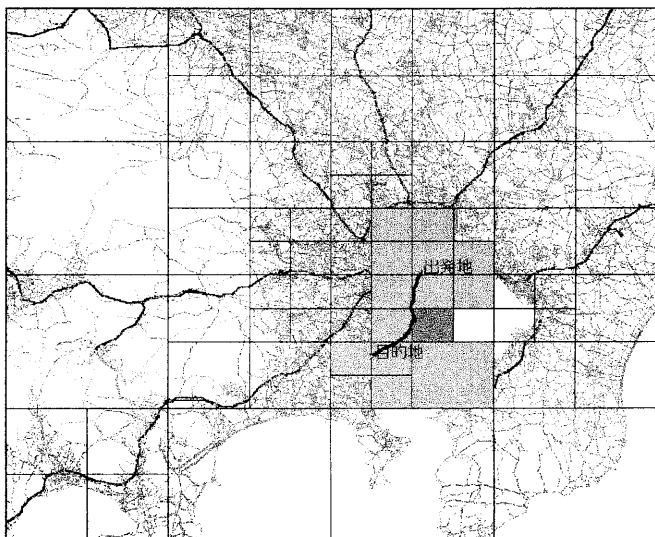


図 5 例 3

## 7 むすび

探索領域限定用テーブルを用いて不均一矩形により探索領域を限定し、かつリンク階層も限定する手法について述べた。ここで提案した手法は郡単位で探索領域を限定する経路探索手法<sup>1)</sup>に比べ、分割する領域数を可成り自由に選択することができるので、探索領域限定用データの大きさの選択に自由度が大きい利点がある。

本手法の問題点は探索領域限定用データを作成するのにかなりの時間を有すること、渋滞や事故等の時間的変動を考慮に入れられないこと等が挙げられる。また、ここでは 516 の不均一矩形に分割し 3 つのリンク階層を採用したが、さらに望ましい分割数や階層数について今後検討を行う予定である。

## 謝辞

最後に有益な御討論を戴いた本学マルチメディア・ラボの諸氏に謝意を表する。

## 参考文献

- [1] E.W.Dijkstra: "A note on two problem in connection with graphs", Numerische Mathematik, vol.1, pp.269-271(1959).
- [2] 飯村, 加藤: "ルックアップ・テーブルにより探索領域を限定した日本全国道路網における経路探索手法", 情処学会論文誌, Vol.356, No.12, pp.2831-2841(1994).
- [3] 小林, 平野, 出川, 橋本, 名倉: "推奨経路表示機能付ナビゲーションシステム", 住友電気, 第 141 号, pp.151-160(1992).
- [4] 加藤, 大西: "階層化されたデジタル地図データベースに基づく都心部自動車用経路案内システム", 電子通信学会技術研究報告, DE89-24(1989).