

階層化されたルックアップ・テーブル式 ネットワークデータに基づく 道路網における最適経路探索手法

小倉 康夫 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を対象にして Dijkstra 法を用いて遠隔 2 地点間の経路探索を行なう場合、探索領域は出発地を中心とする同心円状の範囲に拡がるため多大な探索時間がかかることがある。これを短縮するべく探索領域を必要十分な領域に限定するために、道路を階層化することや探索範囲を限定することなどが考えられる。本論文では日本全国を郡レベルの行政区域にしたがって 513 個の領域に分割し、出発地が属する郡と目的地が属する郡との間で経路探索を行なうために必要十分な道路ネットワークを記憶したルックアップ・テーブル式ネットワークデータを読み込むことによって探索対象ネットワークを限定し、しかる後に Dijkstra 法を用いて経路探索を行なう手法を提案する。例えば北海道から九州までの経路を考えた場合、津軽海峡と関門海峡がボトルネックとなり本州を通過する経路はほぼ一義的に決定されてしまうが、ルックアップ・テーブル式ネットワークデータを郡と県の 2 階層の行政区域を組み合わせて構成することで効果的に削減できることを示す。

An Optimal Route Search Method for Road Networks Based on Look-up Table Type Hierarchical Network Data

Yasuo OGURA Masami KATO

Faculty of Science and Technology, Sophia University

7-1, Kioi-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 102 Japan

In case of searching the optimal route for large road networks by using Dijkstra method, it sometimes takes a lot of time because that method does not restrict the search area. In order to reduce the calculation time, several methods are proposed which search only the restricted network area. One example is the A^* algorithm, which restricts the search area automatically and finds the optimal route, but takes much time to calculate the estimated cost. Another example is the route search method using the conventional hierarchical network data. This method, however, does not necessarily give the optimal route. In this paper, an optimal route search method is proposed, by means of which the optimal route for the nationwide road networks of Japan is found efficiently by using the pre-calculated look-up table type hierarchical network data.

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 [1] を用いて遠隔 2 地点間の経路探索を行なう場合、探索領域が出発地を中心とする同心円状の範囲に拡がってしまうために多大な探索時間がかかることがある。この探索時間を短縮するために、探索領域を限定することにより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が考えられる。一般に大きな河川にかかる橋や山脈を横断するような道路は少なく、行政区界はこうした河川や山脈に沿って決められていることが多い。日本全国を郡レベルの行政区域にしたがって 513 個の領域に分割した道路ネットワークを対象とし、出発地が属する郡と目的地が属する郡との間で経路探索を行なうために必要十分な郡レベル行政区域を、予め作成したルックアップ・テーブルを参照することによって限定する手法 [3] については既に提案した。しかし限定された郡レベル行政区域の内部に含まれる全ての道路ネットワークを経路探索の対象とするため、限定された領域内に含まれる道路の密度が高い場合など探索領域を限定する効果が少なくなる場合がある。本論文では出発地が属する郡と目的地が属する郡との間で経路探索を行なうために必要十分な道路ネットワークを予め作成したルックアップ・テーブル式ネットワークデータから読み出し、これに対して Dijkstra 法 [1] を適用して経路探索を行なう手法を提案する。尚ここでは行政区域である郡と県とが階層的構造を持つことを利用して階層化されたルックアップ・テーブル式ネットワークデータを構成する方法を採用した。

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、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 [6]。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。

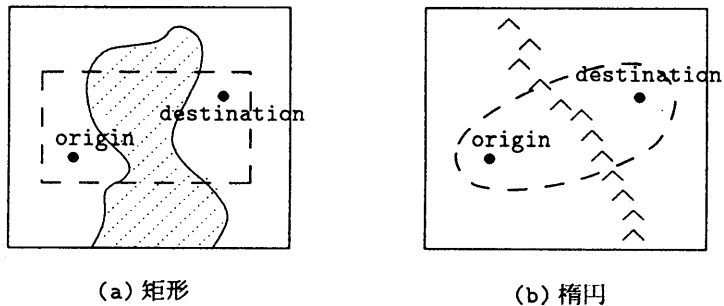


図 1 矩形・楕円による探索領域限定

探索領域を自動的に限定し、しかも最適な経路を得ることが可能な方法として A* アルゴリズムが知られている [5]. 良く知られている最適経路探索法である Dijkstra 法では、出発点からの累積コストが最小である未探索のノードから未探索のリンクを探索延伸することにより実行されるのに対し、A* アルゴリズムでは出発点からの累積コストとそのノードから目的点への推定コストの和が最小である未探索のノードから未探索のリンクを探索延伸することにより実行される。対象とするネットワークが道路ネットワークのようにノードが 2 次元の座標を有する場合、推定コストとしてそのノードと目的点との直線距離に相当するコストを採用すれば求めた経路は最適であることが保証される。この A* アルゴリズムの欠点は推定コストを算出するのに時間がかかることと、例えば日本の道路ネットワークのように細長い形状をしたネットワークを対象とした場合、九州から北海道に至る経路を探索しようとするほとんどのネットワーク・データを探索の対象としなければならないことである。

RAM に読み込むネットワーク・データ量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が知られている [2] [4]. 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アクセス・ポイントを見出し、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。

日本全国を行政区域にしたがって互いに素な複数個の閉領域に分割した道路ネットワークを対象にし、出発地および目的地が各々属する領域の間において経路探索を行なうために必要十分な領域を予め作成したルックアップ・テーブルを参照して限定する方法 [3] がある。このルックアップ・テーブルデータは任意の 2 つの閉領域間で最適経路を算出する際に RAM にロードすべき閉領域を予め全て調べてテーブルとしたものである。

道路ネットワークを N 個の領域に分割した場合 (図 2) を例にとり、このルックアップ・テーブルについて説明をおこなう。この図では領域 $\#i$ に属する出発地 O から領域 $\#j$ に属する目的地 D に至る最適経路を探索する場合を考えている。各々の領域を形成する閉曲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び、領域 $\#i, \#j$ の境界ノード数をそれぞれ k_i, k_j 、領域 $\#i, \#j$ 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。出発地 O から目的地 D に至る最適経路は領域 $\#i$ の境界ノード $n(i, i'), (i' = 1 \sim k_i)$ のいずれかから出て領域 $\#j$ 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 $n(j, j')$ に至る最適経路が図 2 中の太線のように領域 $\#p, \#q, \#r$ を通るならば、領域 $\#i$ に属する出発地 O から領域 $\#j$ に属する目的地 D に至る最適経路を探索する際に、これらの領域に属する道路ネットワーク・データが必須であることがわかる。このようにして領域 $\#i$ の k_i 個の境界ノード $n(i, i'), (i' = 1 \sim k_i)$ をそれぞれ出発地、領域 $\#j$ の k_j 個の境界ノード $n(j, j'), (j' = 1 \sim k_j)$ をそれぞれ目的地とする $k_i \times k_j$ 通りの最適経路を算出することで、領域 $\#i$ に属する任意の出発地 O から領域 $\#j$ に属する任意の目的地 D に至る最適経路を算出する場合に必要な十分な領域の集合を求めることができる。出発地と目的地が同一の閉領域の属する場合 (図 3) も同様に最適経路を求める際に必要にして十分な領域の集合を求めることができるが、領域 $\#i$ のデータのみでは不十分な場合が多いので注意が必要である。

これらの集合をすべての領域の組合せについて求め、ルックアップ・テーブルとして記録する。ただし、出発地が領域 $\#i$ に属し目的地が領域 $\#j$ に属する場合と出発地が領域 $\#j$ に属し目的地が領域 $\#i$ に属する場合では、両者の集合の違いは少ないと考えられるので両者の和集合を記録する。このテーブルのサイズは行方向 N 、列方向 $N(N+1)/2 (= \sum_{i=1}^N i)$ であり、テーブルの 0 または 1 を 1

ビットで表現することになると、

$$\frac{1}{2}N^2(N+1) \text{ ビット} \quad (1)$$

の記憶容量が必要となる。一般に N が大きいほど個々の閉領域の面積は小さくなるから 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。

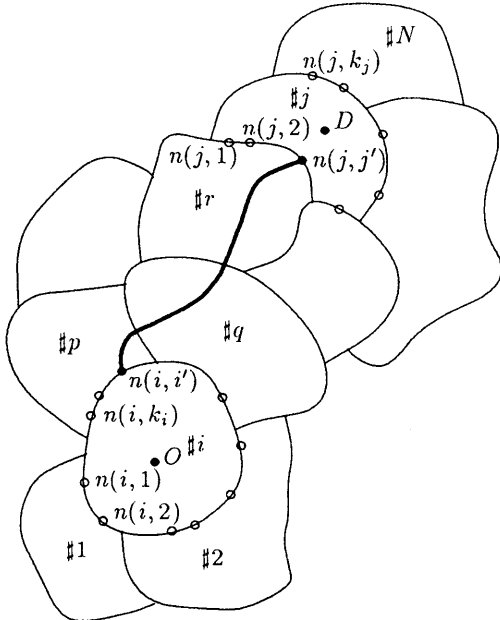


図2 複数の領域への分割

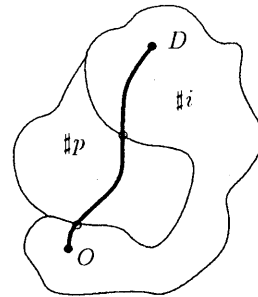


図3 特殊な例

この手法は効果的に探索領域を限定することができるが、探索領域の対象として限定された閉領域内部に含まれる全ての道路ネットワークを経路探索の対象として読み込むため、未だ無駄があると考えられる。

3 提案する探索領域限定手法

本論文で提案する探索領域限定手法は前述のルックアップ・テーブルを参照して探索領域を限定する手法を拡張したものであり、ここでは領域の単位として郡を採用するものとし、出発地が属する郡# i と目的地が属する郡# j との間で最適経路を算出する際に RAM にロードすべき道路ネットワークを予め全て調べて記憶したルックアップ・テーブル式ネットワークデータを読み込むことにより、最適経路を求めるために必要十分な道路ネットワークを限定するものである。例えば、北海道の北端から九州の南端に至る経路を探索する場合と北海道の東端から九州の南端に至る経路を探索する場合とを比較した場合、経路探索を行なうために必要十分なネットワークを表す集合の差異は僅少であると考えられる。これは津軽海峡と関門海峡がボトルネックとして作用することによって本州内部を縦貫する経路が全く一致してしまうことから容易に想像がつく。ここでは郡レベルと県レベルの2階層の行政区域を組み合わせてルックアップ・テーブル式ネットワー

クデータを構成する。以下、ルックアップ・テーブル式ネットワークデータの作成方法について説明する。

日本全国の道路ネットワークを郡レベル行政区域に従って513個の閉領域に分割した道路ネットワーク上で、出発地が属する郡#iの境界ノード個数を k_i 、目的地が属する郡#jの境界ノード個数を k_j 、郡#iが属する県 α の境界ノード個数を k_α 、郡#jが属する県 β の境界ノード個数を k_β とし、郡#i、郡#jの第 i' および第 j' 境界ノードをそれぞれ $n(i, i')$ 、 $n(j, j')$ 、県 α 、県 β の第 α' および第 β' 境界ノードをそれぞれ $n(\alpha, \alpha')$ 、 $n(\beta, \beta')$ とする。

出発地Oと目的地Dが異なる県に属する場合には、郡#iの内部の出発地Oから郡#jの内部の目的地Dに至る最適経路は、郡#iのいずれかの境界ノードを経由し、次いで県 α のいずれかの境界ノードから出て、県 β のいずれかの境界ノードから入って、次いで郡#jのいずれかの境界ノードを経由することになる。そこで2.で述べた手法と同様に、郡#iと郡#jの間で経路探索を行なうために必要十分なネットワークの集合は次のようになる。

- 郡#iの k_i 個の境界ノード $n(i, i')$ 、($i' = 1 \sim k_i$)をそれぞれ出発地、県 α の k_α 個の境界ノード $n(\alpha, \alpha')$ 、($\alpha' = 1 \sim k_\alpha$)をそれぞれ目的地とする $k_i \times k_\alpha$ 通りの最適経路を算出し、それら全ての経路が通過する県内ネットワークの集合。(図4参照)
- 県 β の k_β 個の境界ノード $n(\beta, \beta')$ 、($\beta' = 1 \sim k_\beta$)をそれぞれ出発地、郡#jの k_j 個の境界ノード $n(j, j')$ 、($j' = 1 \sim k_j$)をそれぞれ目的地とする $k_\beta \times k_j$ 通りの最適経路を算出し、それら全ての経路が通過する県内ネットワークの集合。(図4参照)
- 県 α の k_α 個の境界ノード $n(\alpha, \alpha')$ 、($\alpha' = 1 \sim k_\alpha$)をそれぞれ出発地、県 β の k_β 個の境界ノード $n(\beta, \beta')$ 、($\beta' = 1 \sim k_\beta$)をそれぞれ目的地とする $k_\alpha \times k_\beta$ 通りの最適経路を算出し、それら全ての経路が通過する県間ネットワークの集合。(図5参照)

出発地Oと目的地Dが同じ県内に属する場合には、郡#iの内部の出発地Oから郡#jの内部の目的地Dに至る経路は郡#iの境界ノードのいずれかを経由して出て、郡#jの境界ノードのいずれかを経由して入ることになる。それらの経路のうち途中で県 α の境界ノードを出入りする可能性があることに留意すると2.で述べた手法と同様に、郡#iと郡#jの間で経路探索を行なうために必要十分なネットワークの集合は次のようになる。

- 郡iの k_i 個の境界ノード $n(i, i')$ 、($i' = 1 \sim k_i$)をそれぞれ出発地、郡jの k_j 個の境界ノード $n(j, j')$ 、($j' = 1 \sim k_j$)をそれぞれ目的地とする $k_i \times k_j$ 通りの最適経路を算出し、それら全ての経路が通過するネットワークのうち県 α の内部に属する県内ネットワークの集合。
- 郡iの k_i 個の境界ノード $n(i, i')$ 、($i' = 1 \sim k_i$)をそれぞれ出発地、郡jの k_j 個の境界ノード $n(j, j')$ 、($j' = 1 \sim k_j$)をそれぞれ目的地とする $k_i \times k_j$ 通りの最適経路を算出し、それら全ての経路が通過するネットワークのうち県 α の内部に属さないものの集合。この道路ネットワークは郡#iの境界ノードのいずれかを経由して出て、郡#jの境界ノードのいずれかを経由して入ることになるが、県 α に属するすべての郡についてこれらのネットワークを算出したものの論理和をとった県間ネットワークに相当する集合。

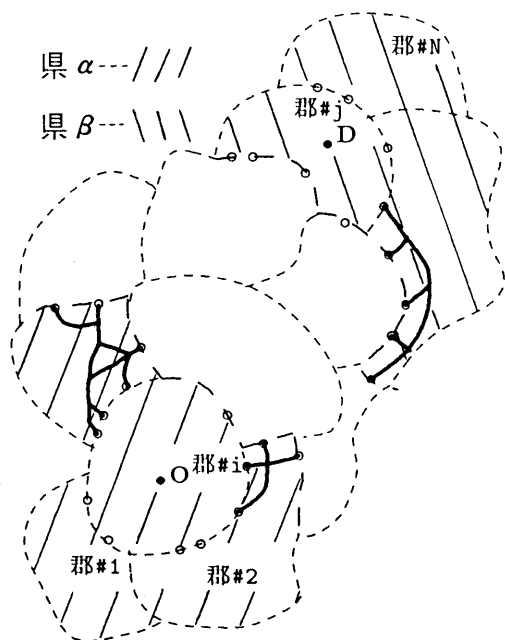


図4 県内ネットワーク

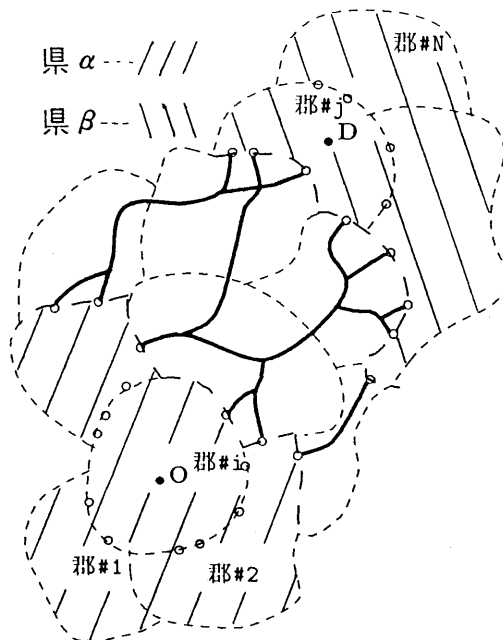


図5 県間ネットワーク

4 本手法による最適経路探索の手順

本手法では次のような手順で探索対象となる道路ネットワークを読み込み、最適経路の探索を行なう。

1. 出発地が属する郡#iの境界ノードから県αの境界ノードに至る最適経路を求めるために必要十分な、予め作成されたルックアップ・テーブル式県内ネットワークデータを読み込む
2. 県βの境界ノードから目的地が属する郡#jの境界ノードに至る最適経路を求めるために必要十分な、予め作成されたルックアップ・テーブル式県内ネットワークデータを読み込む
3. 県αの境界ノードから県βの境界ノードに至る最適経路を求めるために必要十分な、予め作成されたルックアップ・テーブル式県間ネットワークデータを読み込む
4. 出発地が属する郡#iの全てのネットワークデータを読み込む
5. 目的地が属する郡#jの全てのネットワークデータを読み込む
6. 以上のネットワークを相互接続し、Dijkstra法を用いて最適経路を得る

5 データ量に関する検討

本論文で対象とした道路ネットワークは、財団法人日本デジタル地図協会の全国デジタル道路地図をもとに日本全国の道路網を郡レベルの行政区域に従って513個の領域に分割した。これは

都道府県道以上の道路、それ以外の道路で幅員が 5.5m 以上の道路の一部、およびこれらの道路間を接続する道路で構成されており、ノード数は 226,737、リンク本数は 521,190、郡レベル行政区域の境界ノードは 7,425 個、県レベル行政区域の境界ノード数は 2,584 個であり、そのサイズは約 22MB である。

ルックアップ・テーブル式ネットワークデータは次の 4 種類のデータから構成される。出発地と目的地が異なる県に属する場合の県内ネットワークは 1,767,862 本のリンクと 1,523,574 個のノードから構成され、そのサイズは約 50MB、県間ネットワークは 3,864,163 本のリンク、3,994,314 個のノードから構成され、そのサイズは約 110MB、出発地と目的地が同一の県に属する場合の県内ネットワークは 2,423,374 本のリンクと 2,347,632 個のノードから構成され、そのサイズは約 70MB、県間ネットワークは 112,453 本のリンクと 93,983 個のノードから構成され、そのサイズは約 3MB である。これらのルックアップ・テーブル式ネットワークデータを作成するために SUN SPARC Station 20/61 を用いて約 50 時間を要した。

6 経路探索実行例

本稿で提案した手法による探索領域限定の効果を比較するために、通常の Dijkstra 法（標準探索と記す）、文献 [3] で述べられているルックアップ・テーブルを参照して探索領域を限定する手法（領域限定と記す）との比較を行なった。例 1 は出発地を北海道知床岬、目的地を鹿児島県佐多岬、例 2 は出発地を静岡県御前崎、目的地を能登半島先端、例 3 は出発地を愛知県伊良湖岬、目的地を千葉県犬吠崎とした場合であり、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 1 に示す。図 6 および 7 に例 2 の場合について夫々領域限定および本手法を用いたときに探索の対象となるリンクを示す。

表 1 メモリ中に読み込まれたリンク本数

	探索手法	ディスクアクセス 読み込み時間 (秒)	読み込まれた リンク本数 (本)	探索した リンク本数 (本)	探索に要した CPU 時間 (秒)
例 1	標準探索	82.03	530,358	529,576	25.43
	領域限定	22.89	209,522	208,518	8.86
	本手法	0.23	5,216	5,137	0.41
例 2	標準探索	48.94	373,310	360,650	18.60
	領域限定	3.54	50,378	50,109	2.32
	本手法	0.24	5,928	5,889	0.59
例 3	標準探索	39.97	308,804	291,727	15.05
	領域限定	2.46	66,244	65,866	2.97
	本手法	0.30	7,533	7,060	0.68

7 むすび

本論文ではルックアップ・テーブル式ネットワークデータを読み込むことにより最適経路を求めるために必要十分な道路ネットワークを限定し、最適経路を得る手法について述べた。このルックアップ・テーブル式ネットワークデータとは、郡レベル行政区域に従って全国を 513 個の領域に

分割した道路ネットワークを対象に、出発地が属する郡と目的地が属する郡との間に県単位のネットワークデータを介在させて、最適経路を算出する際にRAMにロードすべき道路ネットワークを予め算出し記憶したものであり、郡レベル行政区域と県レベル行政区域とを階層的に組み合わせることによりデータ量を効果的に削減することが出来る。本手法によれば出発地および目的地が属する行政区域が遠く離れているほど探索ネットワークデータを削減する効果が大きくなるが、近接する場合にはこの効果が少なくなってしまうという欠点がある。この欠点を克服することが今後の課題である。

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。

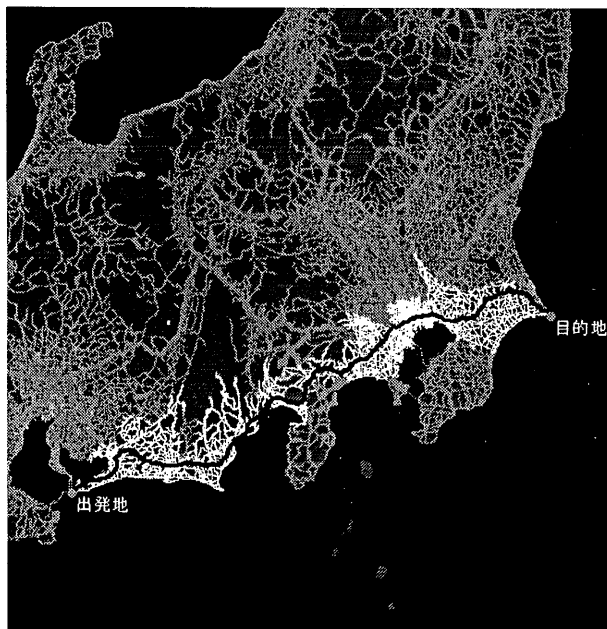


図6 経路探索実行例2 (領域限定)

参考文献

- [1] E.W.Dijkstra: "A note on two problems in connection with graphs", *Numerische Mathematik*, vol.1, pp.269-271(1959).
- [2] 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", 信学会技術研究報告, DE89-24(1989).
- [3] 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.35, No.12, pp.2831-2841(1994).
- [4] 丹羽 寿男, 吉田 雄二, 福村 見夫: "道路網の階層的表現にもとづく経路探索アルゴリズムと地図情報システムへの応用", 情処学会論文誌, Vol.31, No.5, pp.659-666(1990).
- [5] Nils J.Nilsson 著, 白井 良明, 辻井 潤一, 佐藤 泰介訳: "人工知能の原理", 日本コンピュータ協会 (1983).
- [6] 小林 祥延, 平野 和夫, 出川 裕久, 橋本 武夫, 名倉 充彦: "推奨経路表示機能付きナビゲーションシステム", 住友電気, 第141号, pp.151-160(1992).

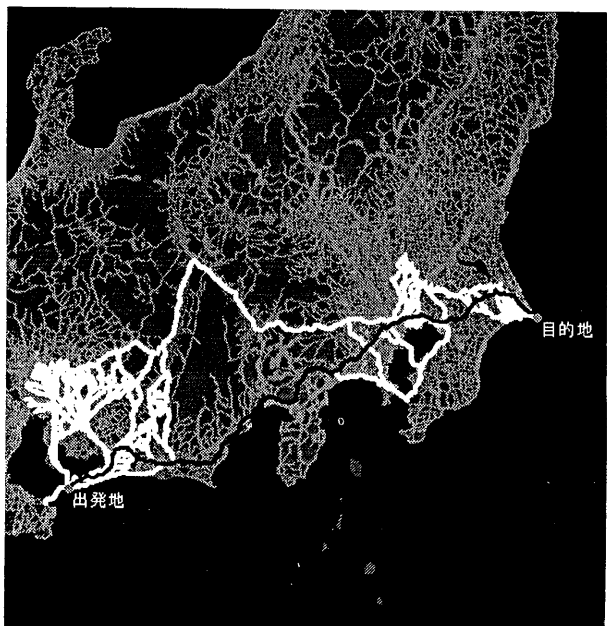


図7 経路探索実行例2 (本手法)