

## 交差点内コストを考慮した道路網における経路探索の手法と そのマルチメディア型経路案内システムへの応用†

大西 啓介<sup>††</sup> 加藤 誠 巳<sup>††</sup>

近年パーソナルコンピュータ等の情報機器の高速化および高機能化が進むと共に地図データベースが整備されつつある。このような状況の下で自動車に対し適切な経路を探索・提供するシステムが望まれているが未だ実用には至っていない。道路網における経路案内では、時間的に早く行けること、分かりやすいことが重要な要因となると考えられるが、このためには交差点における右左折等のコストを加味して経路探索を行う必要がある。本論文ではこのような交差点における右左折等のコストを導入するための道路網ネットワークのデータ構造について述べ、このデータ構造を用いて任意の出発点から任意の目的点に至る第 $k$ 番目までの最小コスト経路を探索する手法を与えている。また実用的観点から代替経路として使用し得ると考えられる第 $K$ 番目までの有効代替経路の定義と探索法についても述べている。本論文ではさらにここで示した経路探索の手法を首都圏都心部の道路網ネットワークに適用し、複数個の有効代替経路を探索し、得られた結果を地図、文章、画像、音声等のマルチメディアを用いて案内するシステムの概要についても述べている。

### 1. ま え が き

近年、コンピュータの能力の飛躍的な向上ならびに地図データベース<sup>1),2)</sup>の整備に伴い、図形処理と情報処理を統合し、経路情報を提供する地図情報システムの研究が盛んであり、既にいくつかの成果が報告されている<sup>3)-5)</sup>。一方、自動車に対し交通情報等を提供するシステムとして、警察庁による新自動車情報通信システム (AMTICS)、建設省による路車間情報システム (RACS) 等の開発が鋭意進められているが<sup>6)</sup>、これらシステムにあっては目的地に至る適切な経路情報の提供に関しては今後の課題とされている。このような自動車に対する経路案内にあっては交差点における右左折等のコスト (以後交差点内コストとよぶ) を考慮すること、最短経路だけでなく複数個の代替経路を提供することが望まれるが、従来の経路情報を提供する地図情報システム<sup>3)-5)</sup>では、これらの機能を具備していなかった。本稿では交差点内コストを考慮し、有効な代替経路を探索する手法について提案する。

本稿で述べる交差点内コストの値の選定および経路探索に関する前提と適用範囲は次のとおりである。すなわち、道路網の場合、出発地と目的地の間の経路コストは所要時間で評価するのが妥当だと考えられる。どの道路も同一平均速度で走行でき、交差点内コスト

を考慮しない場合には所要時間は総走行距離に比例するが、道路に渋滞が生じるとこの関係は成立しなくなる。しかし、道路の渋滞度 (渋滞長) と道路の走行所要時間との関係は、必ずしも単純ではなく、現状では各道路区間ごとに時間帯、曜日、天候等をパラメータとした統計値を用いることが提案されている程度である。そのため、本稿では第一近似として経路のコストを延距離で評価することにし、交差点内コストも交差点の物理的構造、時間帯、曜日等によって、各交差点ごとに統計的に求められると考えられる交差点を通過するのに要する平均所要時間に相当する道路の距離で表すものとする。また、交差点内コストは出発地の出発時刻によって定まると考えられる値を使用して経路探索を行うものとしているので出発地と目的地が極めて遠距離である場合には適していない場合がある。

交差点における右左折等のコストは交差点内ノード展開を行うことにより、筆者らが既に提案した第 $k$ 番目までの最短経路を探索する手法<sup>7)</sup>をそのまま用いることが可能であるが、交差点内ノード展開を行うと、ネットワークの構造を大幅に変更しなければならないだけでなく、一般にノード数およびリンク数が大幅に増大する欠点があった。本論文では交差点内ノード展開を行うことなく交差点内コストを導入するのに適したデータ構造を与えると共に、このデータ構造を用いて、交差点内コストを考慮に入れた第 $k$ 番目までの最小コスト経路を求める手法を提案している。ところで実際の観点からはこのようにして求められた第 $k$ 番目までの最小コスト経路がすべて有意な代替経路とは言えないことが多い。すなわち既に見出された有効な代

† A Route Search Method in a Road Network with the Intra-intersection Costs Taken into Account and Its Application to a Route Guidance System Using Multimedia by KEISUKE OHNISHI and MASAMI KATO (Department of Electrical and Electronics Engineering, Sophia University).

†† 上智大学理工学部電気電子工学科

替経路とほんのわずかしかわらない経路は冗長経路として除去することが妥当である。本稿ではこのような冗長経路を排除した第*K*番目までの有効な代替経路の定義とその探索法についても言及している。

本論文ではさらにここで示したデータ構造および経路探索の手法を首都圏都心部の道路網ネットワークに適用し、地図、画像、文章、音声等マルチメディアを用いて経路案内を行う車載ナビゲーションを指向したシステムの概要について述べている<sup>8),9)</sup>。

## 2. 道路網ネットワークのデータ構造

本章では道路網の交差点における右左折等のコストを考慮した経路探索に適したネットワークのデータ構造について述べる。

### 2.1 従来使用していたデータ構造

交差点における右左折等のコストを考えに入れない道路網は、交差点をノードとし、ノード間を結ぶ距離、時間等のコストが付与された有向リンクより成るネットワークで表現される。このようなネットワークは各リンクの始点ノードと終点ノードおよびそのコストにより規定される<sup>10),11)</sup>。例えば図1に示すネットワークの例において○はノード、□はリンク、リンクに添えた数値はリンクのコストとすると、これは表1に示すようなデータ構造で表現される。この場合リンクからノードへの検索は直ちにできるが、ノードからリンクへの検索をも容易にするため、リンクの始点

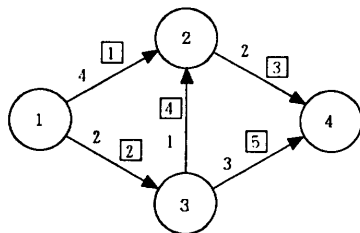


図1 ネットワークの例  
Fig. 1 An example of road network.

表1 ネットワークのデータ構造  
Table 1 Data structure of the network.

始点ノード	リンクへのポインタ	リンク番号	始点ノード	終点ノード	コスト
①	①	①	①	②	4
②	③	②	①	③	2
③	④	③	②	④	2
④	φ	④	③	②	1
		⑤	③	④	3

φはnullポインタを表す。

ノード番号を若い順にソートしてリンク番号を付与し、各始点ノード番号に対し、リンクへのポインタを設けている。これにより所定のノードを始点とするリンクは容易に検索される。以上のデータ構造では所定のノードを終点とするリンクの検索は容易ではないが、筆者らが提案した一般のネットワークにおける第*k*番目までの最小コスト経路探索の手法<sup>7)</sup>ではこの情報は不要である。

### 2.2 交差点内ノード展開による交差点内コストの導入

道路網の交差点における右左折等のコストを考慮する必要がある場合、交差点内コストは交差点に相当する1つのノードを複数個の入ノードおよび出ノードに分解し、入ノードから出ノードに至る各リンクに相当するコストを付与することにより2.1節で述べたデータ構造を用いて従来の経路探索の手法<sup>7)</sup>がそのまま適用できる。例えば図2に示す四差路交差点は図3に示すように4つの入ノード、4つの出ノードおよび16本のリンクとそのコストで表現される。交差点内コストがすべて0の交差点は交差点内ノード展開する必要はないが、1つでも非零のコストがある場合には、交差点内ノード展開が要求され、元の道路網ネットワークデータを変更する必要が生じるだけでなく、一般にノード数およびリンク数が大幅に増大することにな

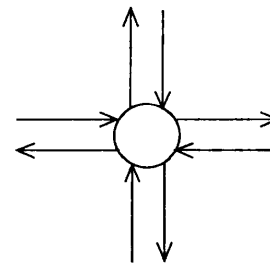


図2 四差路交差点の例  
Fig. 2 An example of an intersection.

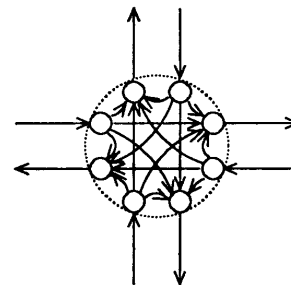


図3 交差点内ノード展開  
Fig. 3 Node expansion of an intersection.

る。

2.3 リンク間遷移コスト表による交差点内コストの導入

交差点内コストを導入するため交差点内ノード展開を行うと前述の如き問題が生じた。そのため筆者らは次のようなデータ構造を採用することにした。すなわち交差点内コストがある場合にも1つの交差点は1つのノードとして取り扱い、2.1節で述べたデータ構造を採用し、交差点内コストを考慮すべき交差点、すなわちノードにおいて非零の交差点内コストを有する入リンクと出リンクの対とそのコストをリンク間遷移コスト表として与えるものである。例えば図1の道路網ネットワークにおいて表2に示すリンク間遷移コスト表は、ノード⑧における入リンク②から出リンク⑤へのコストが4、ノード②における入リンク④から出リンク③へのコストが2であることを表している。この場合、リンク間遷移コストが0である入リンクと出リンクの対は表1のデータ構造から容易に誘導されるので表データとして与える必要はない。

このようなリンク間遷移コスト表を用いて交差点内コストを導入することの更なる利点は、交差点内コストを考慮すべき交差点数に増減等の変更があっても、元の道路網ネットワーク構造を変化させる必要がなく、リンク間遷移コスト表のみを書き換えれば良いことである。

次章ではここで述べたデータ構造を用いて交差点内コストを考慮した第k最小コスト経路探索の手法について述べる。

3. 経路探索の手法

本章では、2.1節および2.3節で示したデータ構造を用いてネットワークの任意の出発ノードから任意の目的ノードに至る右左折等のコストを考慮した第k番目までの最小コスト経路を求める一般的手法を与えると共に、その手法を小規模のネットワークに適用した場合を例にとって具体的に説明する。また、冗長経路を除去した第K番目までの有効代替経路なるものを定義すると共にその探索手法についても言及する。

表2 リンク間遷移コスト表  
Table 2 Intra-intersection costs.

入リンク	出リンク	コスト
②	⑤	4
④	③	2

3.1 第k最小コスト経路探索の基本概念

第k最小コスト経路探索の基本概念を、図4に示すネットワークの一部を用いて簡単に説明する。

出発ノード  $0_0$  から、リンク  $[L_i]$  ( $i=1\sim p$ ) を経てノード  $N$  に至る第1最小コスト経路を見出し、その第1最小コストをリンク  $[L_i]$  の離脱コスト  $\tau([L_i])$  (後述する) とする。それと共に、各リンクに対し入リンクのコスト差分 (後述する) を求める。例えば、出発ノード  $0_0$  からリンク  $[n+j-1]$  ( $j=1\sim q$ ) を経て、ノード  $B_j$  に至る第1最小コスト経路は、リンク  $[L_i]$  の離脱コスト  $\tau([L_i])$  とノード  $N$  の交差点内コストおよびリンク  $[n+j-1]$  のコストの和  $SUM([L_i], [n+j-1])$  が最小の経路に相当し、そのコストがリンク  $[n+j-1]$  の離脱コストになる。このとき  $SUM([L_i], [n+j-1])$  からリンク  $[n+j-1]$  の離脱コストを減じたものが、出リンク  $[n+j-1]$  に対する入リンク  $[L_i]$  のコスト差分であり、これはリンク  $[L_i]$  を使用して、リンク  $[n+j-1]$  によりノード  $B_j$  に入ったときの第1最小コストに対するコストの増加分を表している。本手法では、上述のリンクの離脱コストと各リンクに対する入リンクのコスト差分を有効、適切に用いることにより経路木を育て、第k最小コスト経路を求めるものである。

3.2 用語および変数の定義

ノード：ネットワーク内の点を言い、 $1, 2, \dots, n$  と番号付けされている。出発ノードを  $0_0$ 、目的ノードを  $S_0$  とする。

リンク：ノード間を結ぶ有向枝を言い、 $1, 2, \dots, m$  と番号付けされている。リンク  $a$  の始点ノードを  $\theta^+a$ 、終点ノードを  $\theta^-a$ 、非負のコストを  $d(a)$  で示す。また  $\xi^+a, \xi^-a$  はそれぞれリンク  $a$  の終点ノード  $\theta^-a$  から出ていくリンクの集合、始点ノード  $\theta^+a$  に入っ

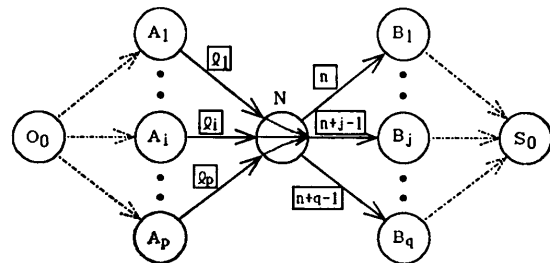


図4 ネットワークの一部  
Fig. 4 A part of network.

て来るリンクの集合を表す。

リンク間遷移コスト：道路網における交差点内コストに相当するものであり、 $\partial^-a = \partial^+b$  であるような2つのリンク  $a, b$  に対し非負のリンク間遷移コストを、 $C(a, b)$  で示す。

単純経路：ノード  $u$  からノード  $v$  へ至る単純経路とは同一リンクを一度しか使わない以下の条件を満たすリンクの順列  $P = a_0, a_1, \dots, a_l$  である。その条件とは  $\partial^+a_0 = u, \partial^-a_l = v, \partial^-a_{i-1} = \partial^+a_i$  ( $i = 1, 2, \dots, l$ ),  $a_i \neq a_j$  ( $i = 0, 1, \dots, l; j = 0, 1, \dots, l; i \neq j$ ) であり、そのコストは  $\sum_{i=0}^l d(a_i) + \sum_{i=1}^l C(a_{i-1}, a_i)$  で与えられる。

第  $k$  最小コスト経路：出発ノード  $0_0$  からノード  $v$  に至る第  $k$  最小コスト経路 ( $k \geq 1$ ) とは、ノード  $0_0$  からノード  $v$  へ至る単純経路のうち、コストが  $k$  番目に小さいものを言う。

リンクの離脱コスト：リンク  $a$  の離脱コスト  $\tau(a)$  とは、出発ノード  $0_0$  からリンク  $a$  を経由してリンク  $a$  の終点ノード  $\partial^-a$  に至る第1最小コスト経路のコストを言う。

出リンクに対する入リンクのコスト差分：リンク  $b$  の始点ノード  $\partial^+b$  に入ってくるリンクの集合  $\xi^-b$  の要素である各入リンク  $a$  に対して定義される値  $\delta(a, b)$  であり、リンク  $a$  を経由してリンク  $b$  の終点ノード  $\partial^-b$  に至る第1最小コスト経路のコスト  $\tau(a) + C(a, b) + d(b)$  と、出リンク  $b$  の終点ノード  $\partial^-b$  への第1最小コスト経路のコスト  $\tau(b)$  の差を言う。すなわち  $\delta(a, b) = \{\tau(a) + C(a, b) + d(b)\} - \tau(b)$ 。

出リンクに対する入リンクおよびコスト差分のリスト：出リンク  $b$  に入ってくる入リンクと、その入リンクのコスト差分の対を小さい順に並べておくためのリストであり、 $\Delta(b)$  で表す。

仮想ノードおよび仮想リンク：仮想ノード  $n+1$  から出発ノード  $0_0$  に、目的ノード  $S_0$  から仮想ノード  $n+2$  に至るそれぞれコスト0なる仮想リンク  $m+1$ , および  $m+2$  を便宜上定義する。

入出リンク対のポテンシャル： $\partial^-a = \partial^+b$  であるような入リンク  $a$  と出リンク  $b$  の対のポテンシャル  $p(a, b)$  とは出発ノード  $0_0$  からリンク  $a$  を通ってリンク  $b$  の終点ノード  $\partial^-b$  に至る第1最小コスト経路のコストであり、 $\tau(a) + C(a, b) + d(b)$  で与えられる。

ヒープ：入出リンク対のポテンシャルの登録領域  $H$  を言う。

探索：リンク  $a$  を探索するとはリンク  $a$  から  $\xi^+a$  に

属する各リンク  $b$  に対し、入出リンク対のポテンシャル  $p(a, b)$  を求め、ヒープ  $H$  に登録することを言う。

経路の累積コスト差分：経路  $P = a_0, a_1, \dots, a_l$  の累積コスト差分とは  $\sum_{i=1}^l \delta(a_{i-1}, a_i)$  のことを言う。

単純経路の木：ネットワーク上の  $S_0$  までの単純経路を体系的に表したものであり、各節点（ネットワーク上のノードと区別するため、木のノードは節点と呼ぶことにする）はネットワーク上のリンクに対応し、根は仮想リンク  $m+2$  に対応する。節点番号は根を1とし、以後は発生された順に番号を付与し、第  $i$  番目に生成された節点の対応するリンクを  $\lambda_i$  と記す。任意の節点  $i$  から根までさかのぼった経路は、ネットワーク上の1つの単純路を示す。この単純路を  $P_i$  とし、 $i$  から1までの節点番号を  $i, p_2, p_3, \dots, p_i, 1$  とすると  $P_i$  は次のようになる。

$$P_i = \lambda_i, \lambda_{p_2}, \lambda_{p_3}, \dots, \lambda_{p_i}, m+2$$

発芽リンク：節点  $i$  に対応するリンク  $\lambda_i$  を出リンクとする入リンクのうち、その節点から下方に未だ生成されていない入リンクの中でコスト差分が最小のリンクのことを言い、これを  $\beta_i$  で表す。もしそのような入リンクがなければ  $\beta_i = 0$  とする。

発芽リンクのコスト：節点  $i$  の発芽リンク  $\beta_i$  に対し、節点  $i$  から根に至る経路の累積コスト差分とリンク  $\lambda_i$  とリンク  $\beta_i$  のコスト差分  $\delta(\lambda_i, \beta_i)$  の和を言う。

第  $k$  最小コスト経路の経路木： $R_k$  を第  $k$  最小コスト経路の仮想リンク  $m+1$  に対応する節点番号とするとき、節点  $R_k, F(R_k), F(F(R_k)), \dots, 1$  に対応するリンク  $m+1, \lambda_{F(R_k)}, \dots, m+2$  が第  $k$  最小コスト経路を与える。ただし  $F(i)$  は節点  $i$  の親節点を表す。

### 3.3 第 $k$ 最小コスト経路探索のアルゴリズム

ここで提案する交差点内コスト、すなわちリンク間遷移コストを考慮した第  $k$  番目までの最小コスト経路を探索するアルゴリズムはフェーズIおよびフェーズIIの2つの部分より成っている。フェーズIではリンクの離脱コスト、出リンクに対する入リンクおよびコスト差分のリストを求め、フェーズIIではこれらの情報を利用して第  $k$  番目までの最小コスト経路の木を育てていくものである。

[フェーズI]

ステップ1：すべてのリンクを未探索とし、

$$\Delta(1) \sim \Delta(m+2) \leftarrow \phi, p(*, m+1) \leftarrow 0, H \leftarrow p(*, m+1)$$

1) とする。

ステップ2: ヒープ  $H$  が  $\phi$  ならフェーズ I を終了する。そうでなければヒープ  $H$  から最小のポテンシャル  $p(a, b)$  を取り出し, 入出リンク対  $a, b$  を求める。すなわち  $H \leftarrow H - p(a, b)$ 。

ステップ3: リンク  $b$  が既探索ならステップ4へ行く。未探索ならリンク  $b$  の離脱コスト  $\tau(b) \leftarrow p(a, b)$ , 出リンク  $b$  に対する入リンクおよびコスト差分のリストの  $\Delta(b) \leftarrow (a, 0)$  とし, リンク  $b$  を探索する。リンク  $b$  を探索するとは,  $\xi^*b$  に属する各リンク  $c$  に対し, 入出リンク対のポテンシャル  $p(b, c)$  を求め, ヒープ  $H$  に登録することである。ただし  $\xi^*b = \phi$  なら探索は行わない。その後リンク  $b$  を既探索としステップ2に戻る。

ステップ4: 出リンク  $b$  に対する入リンク  $a$  のコスト差分  $\delta(a, b)$  を求め, 出リンク  $b$  に対する入リンクおよびコスト差分のリスト  $\Delta(b) \leftarrow \Delta(b) \cup (a, \delta(a, b))$  とし, ステップ2に戻る。

[フェーズII]

ステップ1:  $k \leftarrow 0, p \leftarrow 1, i \leftarrow 1, \lambda_i \leftarrow m+2$ , 節点  $i$  の発芽リンク  $\beta_i$  を求め, リンク  $\beta_i$  を既生成とする。 $\beta_i$  が0ならば終了。

ステップ2:  $\lambda_i = m+1$  ならば,  $k \leftarrow k+1, R_k \leftarrow i$  とし,  $k$  が求めたい経路数に等しければ終了。そうでなければ発芽リンクのコストが最小の発芽リンク  $\beta_j$  を求め,  $i \leftarrow j$  とする。 $\beta_j$  が0ならば終了。

ステップ3:  $p \leftarrow p+1, \lambda_p \leftarrow \beta_i, F(p) \leftarrow i$  とし, 節点  $p$  の発芽リンク  $\beta_p$  を求め, リンク  $\beta_p$  を既生成とし,  $i \leftarrow p$  としてステップ2に戻る。

3.4 モデルを用いた手法の説明

ここでは具体的な処理を図1で与えられるネットワークにおいて表2のリンク間遷移コスト表が与えられた場合を用いて説明する。いまノード①からノード④までの第1~第3最小コスト経路を求めるものとする。まず図5に示すように仮想ノードおよび仮想リンクを付加する。このとき仮想ノード, 仮想リンクの

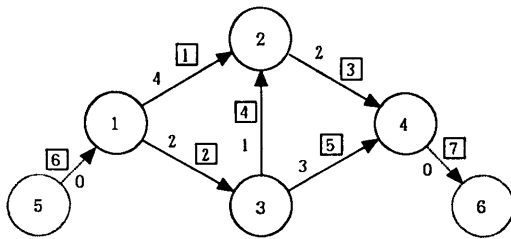


図5 仮想ノード, 仮想リンクの付加  
Fig. 5 Addition of virtual nodes and links.

データは表3のようなになる。探索には表1に表3を追加したネットワークデータと表2のリンク間遷移コストデータが用いられる。ここで表2にない入出リンク対のリンク間遷移コストは0とする。

以下で詳述するように, フェーズ I により, 表4に示すとき出リンクの離脱コストならびに出リンクに対する入リンクおよびコスト差分のリストが得られる。

フェーズ I をモデルに従って説明する。図5のように出発地および目的地に対し, 仮想リンクを設けると, 出発地①の距離は0であるから, 仮想リンク⑥のリンクの離脱コスト  $\tau(\text{⑥})$  は0である。①の交差点内コストは⑥から①へ対しても, ⑥から②に対しても0であるから,  $p(\text{⑥}, \text{①})=4, p(\text{⑥}, \text{②})=2$  となり, これらのリンク対をヒープに登録する。次に, ヒープに登録されているリンク対の中で最小のポテンシャルをもつリンク対を取り出す。リンク対 (⑥, ②) が取り出され, このときの出リンク②は未探索であるから, ②の離脱コスト  $\tau(\text{②})=2$  とし, ⑥を②のコスト差分のリストに, コスト差分0で登録し, 探索を行う。探索とは, ②を入リンクとするすべての入出リンク対のポテンシャルを求め, ヒープに登録することである。ポテンシャルは3.2節で述べた定義に従って以下のように求める。 $p(\text{②}, \text{④})=3, p(\text{②}, \text{⑤})=9$ 。これらをヒープに登録し, ②を既探索とする。このステップ3が終了した後, ステップ2に戻り, ヒープが空になるまで同様の作業を行う。以上に説明したところからフェーズ I が終了するまでの, 各ステップによって求まった

表3 仮想ノード, 仮想リンクデータ  
Table 3 Virtual nodes and links.

仮想リンク	始点ノード	終点ノード	コスト
⑥	⑤	①	0
⑦	④	⑥	0

表4 フェーズ I の結果  
Table 4 The result of phase I.

出リンク	リンクの離脱コスト	入リンクおよびコスト差分のリスト
①	4	⑥(0)
②	2	⑥(0)
③	6	①(0), ④(1)
④	3	②(0)
⑤	9	②(0)
⑥	0	$\phi$
⑦	6	③(0), ⑤(3)

変数の状態を以下に述べる。

上述したステップ3が終了した時点でヒープの内容は  $H: \{(\textcircled{6}, \textcircled{1}) 4, (\textcircled{2}, \textcircled{4}) 3, (\textcircled{2}, \textcircled{5}) 9\}$  で、リンク対の右に付した数値は入出リンク対のポテンシャルである。

ステップ2  $a=\textcircled{2}, b=\textcircled{4}$

$H: \{(\textcircled{6}, \textcircled{1}) 4, (\textcircled{2}, \textcircled{5}) 9\}$

ステップ3  $\tau(\textcircled{4})=3, \Delta(\textcircled{4}): \{(\textcircled{2}, 0)\}$

$H: \{(\textcircled{6}, \textcircled{1}) 4, (\textcircled{2}, \textcircled{5}) 9, (\textcircled{4}, \textcircled{3}) 7\}$

ステップ2  $a=\textcircled{6}, b=\textcircled{1}$

$H: \{(\textcircled{2}, \textcircled{5}) 9, (\textcircled{4}, \textcircled{3}) 7\}$

ステップ3  $\tau(\textcircled{1})=4, \Delta(\textcircled{1}): \{(\textcircled{6}, 0)\}$

$H: \{(\textcircled{2}, \textcircled{5}) 9, (\textcircled{4}, \textcircled{3}) 7, (\textcircled{1}, \textcircled{3}) 6\}$

ステップ2  $a=\textcircled{1}, b=\textcircled{3}$

$H: \{(\textcircled{2}, \textcircled{5}) 9, (\textcircled{4}, \textcircled{3}) 7\}$

ステップ3  $\tau(\textcircled{3})=6, \Delta(\textcircled{3}): \{(\textcircled{1}, 0)\}$

$H: \{(\textcircled{2}, \textcircled{5}) 9, (\textcircled{4}, \textcircled{3}) 7, (\textcircled{3}, \textcircled{7}) 6\}$

ステップ2  $a=\textcircled{3}, b=\textcircled{7}$

$H: \{(\textcircled{2}, \textcircled{5}) 9, (\textcircled{4}, \textcircled{3}) 7\}$

ステップ3  $\tau(\textcircled{7})=6, \Delta(\textcircled{7}): \{(\textcircled{3}, 0)\}$

$H: \{(\textcircled{2}, \textcircled{5}) 9, (\textcircled{4}, \textcircled{3}) 7\}$

ステップ2  $a=\textcircled{4}, b=\textcircled{3}$

$H: \{(\textcircled{2}, \textcircled{5}) 9\}$

ステップ4  $\Delta(\textcircled{3}): \{(\textcircled{1}, 0), (\textcircled{4}, 1)\}$

ステップ2  $a=\textcircled{2}, b=\textcircled{5}$

$H: \{ \}$

ステップ3  $\tau(\textcircled{5})=9, \Delta(\textcircled{5}): \{(\textcircled{2}, 0)\}$

$H: \{(\textcircled{5}, \textcircled{7}) 9\}$

ステップ2  $a=\textcircled{5}, b=\textcircled{7}$

$H: \{ \}$

ステップ4  $\Delta(\textcircled{7}): \{(\textcircled{3}, 0), (\textcircled{5}, 3)\}$

ステップ2 ヒープが空になったので終了。

フェーズIIに従い発芽リンクのコストが最小のリンクを求め、節点を逐次生成することにより図6~8に示すように第1~3最小コスト経路が見出される。

フェーズIIをモデルに従って説明する。まず目的地から出る仮想リンク⑦を節1に登録し、⑦にコスト差分0で入ってくるリンク③を節2に登録する。次に③にコスト差分0で入ってくる①を節3に登録する。①には出発地へ入る仮想リンク⑥がコスト差分0で入ってくるので、第1最小コスト経路の木は図6のようになる。経路木の円は節を表し、円内の上の数字は節番号、下は対応するリンク番号を示している。経路木の脇に描かれた矢印は経路の方向を表している。点線で

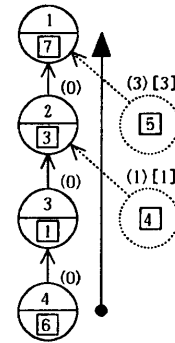


図6 第1最小コスト経路  
Fig. 6 The best route.

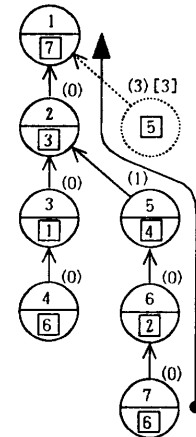


図7 第2最小コスト経路  
Fig. 7 The second best route.

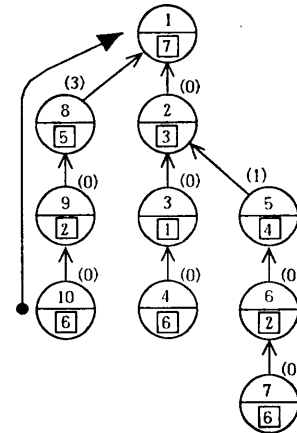


図8 第3最小コスト経路  
Fig. 8 The third best route.

描かれた節は発芽リンクである。各節右上の( )内の数字は出リンクに対する入リンクのコスト差分で、[ ]内は発芽リンクのコストである。この経路木より仮想リンクを除いた①→③が第1最小コスト経路である。第1最小コスト経路木より第2最小コスト経路を

発生させるためには、発芽リンクのコストが最小の節より新たな経路木を発生させれば良い。図6の場合、発芽リンクコストが最小であるのは、④であるから、④を経路木の節5に登録し、以後仮想リンク⑥が現れるまで表4を参照して、コスト差分0のリンクを接続していく。同様にして、第3最小コスト経路を生成することができる。

### 3.5 第 $K$ 有効経路の探索

3.3節で述べたアルゴリズムを用いて求められた第  $k$  番目までの最小コスト経路は実際的な観点からはすべてが有意な代替経路とは言えないことが多い。すなわち、既に見出された有効な代替経路と比較してほんのわずかしか異ならない経路は冗長経路として除去することが妥当であると考えられる。このような観点からここでは1つの有効代替経路の定義を与えと共に、第  $K$  番目までの有効性経路を見出す手順を以下に示す。

ステップ1: 第1最小コスト経路を第1有効経路とし、 $I \leftarrow 1$ ,  $i \leftarrow 2$  とする。

ステップ2:  $I$  が求めたい有効経路数  $K$  に等しければ終了。そうでなければ第  $i$  最小コスト経路を構成するリンクのコストの総和 (リンク間遷移コストを含まない) を  $C_i$ , 第  $i$  最小コスト経路を構成するリンクのうち、第  $J$  有効経路 ( $J=1, 2, \dots, I$ ) を構成するリンクでもあるリンクのコストの総和を  $C'_J$ , として  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha < 1$ ) を与えられた定数とすると、

$$C'_J / C_i \leq \alpha \quad (J=1, 2, \dots, I) \quad (1)$$

が成立するならば第  $i$  最小コスト経路を第  $I+1$  有効経路とし、 $I \leftarrow I+1$ ,  $i \leftarrow i+1$  としてステップ2に戻る。式(1)が成立しない場合は  $i \leftarrow i+1$  としてステップ2に戻る。

## 4. 評価および検討

本章では対象とするネットワークを道路網とした場合につき、交差点内コストを考慮する場合としない場合の計算量の比較、有効経路探索における  $\alpha$  の導入の有効性、 $\alpha$  の影響度に対する評価を行う。

### 4.1 計算量の検討

まず、フェーズIについて交差点内コストを考慮した場合としない場合の計算量の比較を行う。従来の手法<sup>7)</sup>を用いて交差点内コストを考慮しない場合、計算量はヒープに登録するリンク数に比例する<sup>7)</sup>。一方、本手法を用いて交差点内コストを考慮した場合、計算量はヒープに登録する入出リンク対数に比例する。入

出リンク対数は、道路網の場合四差路が多いので、リンク数の約4倍になる。したがって、交差点内コストを考慮すると4倍程度に計算量が増えることになる。

次に、フェーズIIで要する時間は節(経路木のノード)の数に比例する<sup>7)</sup>。また、道路網のように平面のネットワークの場合、1つの経路に含まれるノードの数は  $n^{1/2}$  ( $n$  はノード総数) 程度であるが<sup>7)</sup>、交差点内コストを考慮しない場合、節にはノード番号が入るので、計算時間は  $kn^{1/2}$  に比例することになる。ここで  $k$  は求めようとする代替経路数である。交差点内コストを考慮する場合は、節にはリンク番号が入るので、計算時間は  $kl^{1/2}$  に比例することになる。ここで  $l$  はリンク数であり、前述のごとく  $l=4n$  であるから、交差点内コストを考慮しない場合の約2倍の計算量を要することになる。

しかし、 $n \gg k$  である場合フェーズIIに要する時間に比べフェーズIに要する時間のほうが支配的であるので<sup>7)</sup>、交差点内コストを考慮しても、考慮しない場合の探索に比べ約4倍程度の計算量で探索を終了することができるといえる。実際に図13に示す千代田区の道路網(ノード数223, リンク数706)を用いてパーソナルコンピュータ上で実験した結果、本手法のフェーズIにかかった時間は0.5秒程度であり、 $k$  が10以下の場合にはフェーズIIに要する時間は実用的に無視し得る程度であった。

### 4.2 交差点内コストと $\alpha$ に関する検討

まず、交差点内コストを考慮する場合としない場合に求められた経路の比較を行う。

交差点内コストを考慮しないで経路探索を行った例を図9に示す。交差点内コストを考慮しないと、このように右左折の多い煩雑な経路が第1最小コスト経路として求まる可能性がある。そこで、右左折にかかるコストを直進より大きく設定し、交差点内コストを考慮した経路探索を行えば、経路の累積リンクコスト長が同程度である場合、右左折の回数が少ない経路が求まりやすくなる。図9と同じ出発地・目的地で、すべての交差点に対し右折コスト100m, 左折コスト30m, 直進コスト10mとして探索を行った結果を図10に示す。交差点内コストを考慮すると図10に示すように、第1最小コスト経路として1回だけ右折する単純な経路が求まった。つまり、交差点内コストを考慮しなかった場合、図9に示す第1最小コスト経路は3,026mであったが、交差点内コストを考慮することによって、全コスト長が3,336m(右折2回, 左折1

回、直進 8 回のコストを加算した) となり、図 10 の第 1 最小コスト経路全コスト長 3,313m (全リンクコスト長 3,113m に右折 1 回、直進 10 回のコストを加算した) のほうが小さくなったためである。

次に、有効な代替経路を探索するための定数  $\alpha$  について検討を行う。  $\alpha$  が 1 の場合、第  $k$  最小コスト経路探索によって求めたすべての経路は有効経路となる。すると図 10 のように、ほんのわずかしかわらない経路が代替経路として現れてしまう。しかし  $\alpha$  を小さくすれば、類似した経路が代替経路として採用されにくくなるのが考えられる。  $\alpha$  の値を 0.5 にしたときの経路を図 11 に、0.15 にしたときの経路を図 12 に示す。  $\alpha$  の値はネットワークの構造にも依存するが、経験的に 0.1 から 0.5 程度にすると妥当な結果が得られた。

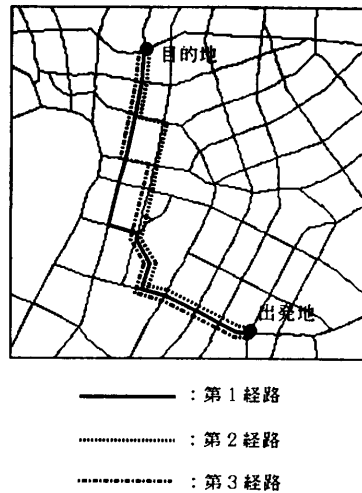


図 9 交差点内コストを考慮しない経路探索  
 Fig. 9 Routes without intra-intersection costs.

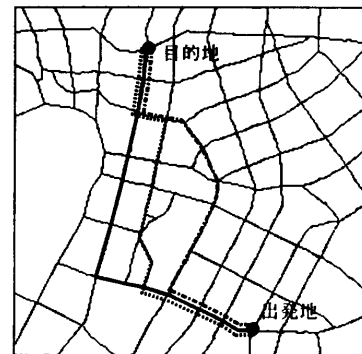


図 11  $\alpha$  が 0.5 のときの有効経路  
 Fig. 11 Effective routes at  $\alpha=0.5$ .

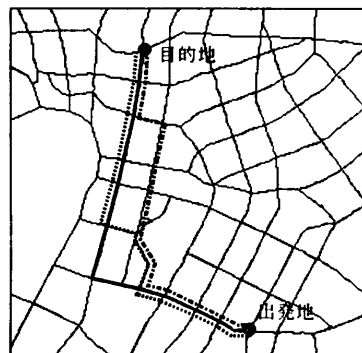


図 10 交差点内コストを考慮した経路探索  
 Fig. 10 Routes using intra-intersection costs.

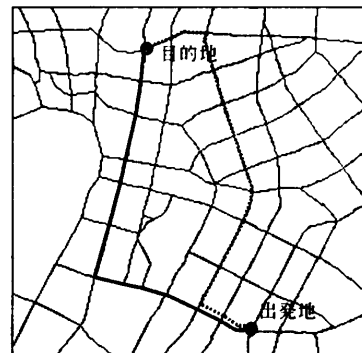


図 12  $\alpha$  が 0.15 のときの有効経路  
 Fig. 12 Effective routes at  $\alpha=0.15$ .

## 5. 経路案内システムへの応用<sup>8),9)</sup>

2.3 節で述べた道路網ネットワークのデータ構造を用いて交差点における右左折等コストを考慮に入れ、3.5 節で述べた第  $K$  番目までの有効経路を探索提供すると共に、文章、地図、映像、音声等のマルチメディアを用いて情報を提供する自動車用の経路案内システムのプロトタイプをパーソナルコンピュータ PC 9801 を用いて実現したので、本章ではその概要について述べる。

ここで対象とした道路網地図データは図 13 に示すように千代田区を完全にカバーするネットワークデータである。道路網ネットワークデータの構造は基本的には 2 章で述べたものを採用しているが、道路には幹線と支線の二階層の属性を付与している。この場合幹線道路のノード数は 223 個、リンク数は 706 本、支線のノード数は約 9,000 個、リンク数は約 32,000 本であり、実際の一方通行、右左折禁止規制を考慮に入れている。また交差点内コストはここでは幹線の交差点のみに適用した。出発点、目的点が指定されると 3 章



で述べた手順により第 $K$ 番目までの有効経路が探索提供されるのであるが、出発点、目的点が支線上にある場合には周囲の幹線交差点に至る経路をまず見出して幹線ネットワークに組み込んで経路探索を行うようにしている<sup>9)</sup>。

出発地を「二番町」、目的地を「東京駅中央口」とした場合の第1有効経路を全域図による経路案内のディスプレイ画面例を図13に示す。このような全域図による案内だけでなく経路に沿ってメッシュ単位で拡大した経路案内も行うことができる。また本システムでは経路上の主要交差点のステル写真画像も提供し得るようになっていいる。そのディスプレイ画面例を図14に示す。

本システムではさらにGPS、地磁気センサ、車輪速センサ、光ファイバジャイロ等から得られる情報とマップマッチング技法により車位置が同定できることを想定し、合成音声を用いてドライバに情報を提供し得るようになっていいる。音声による道案内システムについては既に報告がなされているが<sup>4)</sup>、ここで採用した基本文章パターンは次のとおりである。

- ① 〈右,左〉折 後 〈右,左〉 沿いに走って下さい。
- ② 次の交差点を 〈右,左〉折 して下さい。
- ③ 距離 m 先の 交差点名 交差点を 〈右,左〉折 して下さい。
- ④ 〈右,左〉 に寄って下さい。
- ⑤ 交差点名 交差点まで 距離 m です。

現在のところ上述の基本文型のみを使用しているが、ランドマークのデータベース化が進めば、案内に極めて有効と考えられるランドマーク指示等を行う必要があると考えられる。

## 6. む す び

道路網ネットワークにおいて交差点における交差点内コストを導入するためのデータ構造を与え、そのデータ構造に基づいて交差点内コストを考慮に入れた第 $k$ 最小コスト経路、さらには第 $K$ 有効代替経路を探索する手法を提案し、都心部の実際の道路網ネット

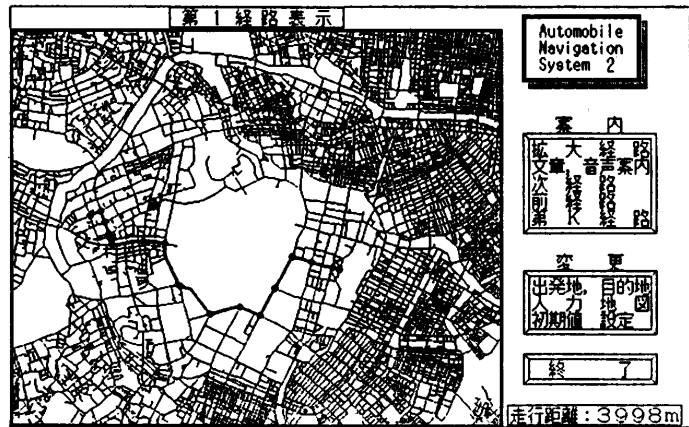


図13 第1有効経路  
Fig. 13 The most effective route.

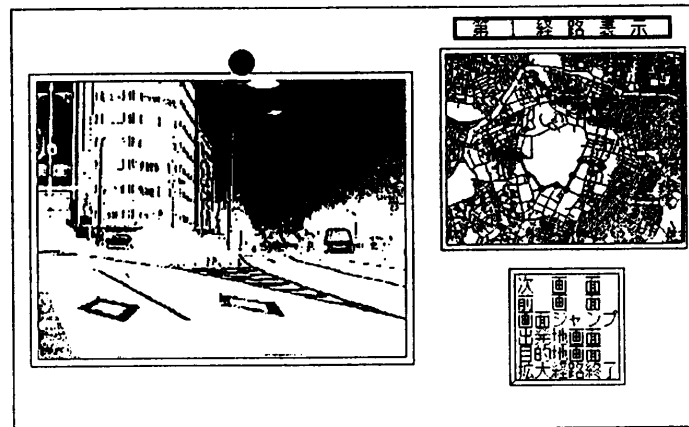


図14 交差点のステル写真画像の例  
Fig. 14 A still image for an intersection.

ワークに適用し、マルチメディアを用いて自動車用の経路情報を提供するシステムに応用した例について述べた。

ここで提供した交差点内コストの導入法を用いれば1つの交差点は1つのノードに対応するため道路網ネットワーク構造は単純であり、交差点内コストを考慮すべき交差点の追加、削除に容易に対応することができる。また本論文で提案したアルゴリズムを用いることにより最小コスト経路だけでなく代替経路としての第 $K$ 有効経路を提供することが可能となる。

今後の解決すべき課題は制限されたメモリ領域で短時間に広域にわたる経路探索を行うための手法を確立すること、ここで定義した有効経路が必ずしも妥当な代替経路と言えないことがあるので、さらに適当な有効経路の定義と探索手法を見出すこと、リアルタイム渋滞情報を考慮したダイナミックな経路探索法を開発

すること等が挙げられる。

謝辞 終りに有益なご討論いただ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

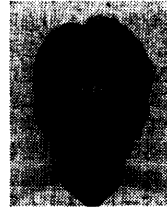
- 1) 坂内正夫, 大沢 裕: 画像データベース, p. 198, 昭晃堂 (1987).
- 2) 坂内正夫, 大沢 裕: 画像データベースにおけるデータ表現, 管理方式, 信学論, Vol. J 68-D, No. 4, pp. 434-441 (1985).
- 3) 嶋田 茂, 江尻正員: 日本語インタフェースを有する知識処理型マルチメディア地図情報処理システム GENTLE, 情報処理学会論文誌, Vol. 27, No. 12, pp. 1162-1173 (1986).
- 4) 今村賢治, 大山 実, 橋田幸雄: 音声による道案内システムにおける出力文の生成, 信学論, Vol. J 71-D, No. 5, pp. 926-929 (1988).
- 5) 丹羽寿男, 吉田雄二, 福村晃夫: 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, 情報処理学会論文誌, Vol. 31, No. 5, pp. 659-666 (1990).
- 6) 丹後 健, 織田利彦: 自動車交通情報システムについて, 電学誌, Vol. 110, No. 4, pp. 277-280 (1990).
- 7) 杉本克行, 加藤誠巳: 有向ネットワークにおいて閉路を含まない  $K$  個の最短経路を求めるための手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 26, No. 2, pp. 356-364 (1985).
- 8) 加藤誠巳, 大西啓介: 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, 信学技報, DE 89-24 (1989).
- 9) 加藤誠巳, 大西啓介: マルチメディアを用いた経路・景観・施設案内システム, 信学会第1回機能図形情報システムシンポジウム講演論文集, pp. 49-54 (1990).
- 10) 伊理正夫, 中森真理雄: 算法の最近の進歩, 信学

誌, Vol. 58, No. 4, pp. 433-445 (1975).

- 11) 伊理正夫 (編): 地理的情報の処理に関する基本アルゴリズム, p. 340, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 (1983).

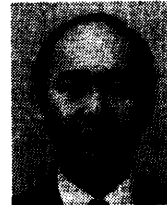
(平成3年7月1日受付)

(平成4年5月14日採録)



大西 啓介 (正会員)

昭和40年生。昭和63年上智大学理工学部電気電子工学科卒業。平成2年同大学院大学院博士前期課程修了。現在、同博士後期課程在学中。地図情報処理, コンピュータグラフィックスに興味をもつ。電子情報通信学会, 日本音響学会, 画像電子学会, 日本オペレーションズ・リサーチ学会各会員。



加藤 誠巳 (正会員)

昭和17年生。昭和40年東京大学工学部電子工学科卒業。昭和42年同大学院工学系研究科電子工学専門課程修士課程修了。同年日本電信電話公社電気通信研究所入所。東京大学工学部研究生を経て昭和48年東京大学大学院工学系研究科電子工学専門課程博士課程修了。工学博士。昭和48年上智大学理工学部電気電子工学科講師, 昭和49年同助教授, 昭和57年同教授, 現在に至る。都市交通情報提供システム, コンピュータ・グラフィックス, ニューラルネット, 画像処理, 音声信号処理, 人工知能等の研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会, 日本オペレーションズ・リサーチ学会, 日本音響学会, 日本シミュレーション学会, 電気学会各会員。