

ナビゲーションシステムと経路探索

天目 健二

1. はじめに

電子地図を利用したマップマッチング型のナビゲーションシステムが、初めて実用化されて10年以上が経ち、この間、GPSとの併用により位置検出精度が飛躍的に向上し、種々の機能が充実してきた。これにより、車両の現在位置から目的地までの経路を探索し、交差点ごとに音声で目的地への方向を案内する経路誘導システムが一般化した。

経路探索は当初、リンク（道路単位）の距離をベースとした静的（固定）な探索であったが、1996年に、通信によりリアルタイムで交通情報を提供するVICS（Vehicle Information and Communication System：道路交通情報通信システム）が実用化されて以来、リンクの旅行時間（リンクを通過するのに必要な時間）をベースとした動的経路探索へと変化してきており、道路の渋滞緩和の一助となっている。

以下では、経路探索の基本的アルゴリズムをいくつか紹介すると共に、経路誘導の形態や効果評価について報告する。

2. 経路探索アルゴリズム

2.1 経路探索の種類

ナビゲーションシステムにおける経路探索は、組み合わせ最適化における最短路問題の直接的な応用の1つである。最短路問題とは、点の集合 V と向きと長さを持った枝の集合 E で構成される有向グラフにおいて、2点 o, d が与えられたとき、 o から d までの最短路、すなわち、枝の長さの和が最小の経路を求める問題である。点 v は交差点に、枝 (v, w) は隣接する2交差点 v, w を結ぶリンクに、枝の長さ $length(v, w)$ は枝 (v, w) に対応するリンクの距離あるいは旅行時間に、点 o, d はそれぞれ車両の出発地および目的地に相当

すると考えれば理解しやすい。

道路網を表すグラフの特徴としては、各点の次数が定数オーダーの比較的粗な構造であることが挙げられる。また、リンクの距離あるいは旅行時間をリンクコストと呼ぶが、それに交差点での右折や左折にペナルティ的なコストを付加することも多い。ナビゲーションシステムで用いられる最短路問題のアルゴリズムには、表1に示すような種々のバリエーションがある。

最短路問題のアルゴリズムで最も有名なものはダイクストラ法（Dijkstra method）である。本手法は、出発地から探索を開始して、各探索では走査されたリンクの中で出発地からのコストが最小のリンクを選んで、そのリンクに接続するリンクを走査し、出発地からのコストを求めていくものである。ダイクストラ法では、各リンクは1度しか探索されることはない。アルゴリズムは以下の通りである。

ダイクストラ法

- ① o 以外の点 v について o からの仮の距離 $dist(v)=\infty$, $dist(o)=0$, すべての v について仮の親 $p(v)=null$, 走査対象点の集合 $U=\{o\}$ とする。

表1 経路探索アルゴリズム

種類	特徴
ラベル確定法	探索した仮ラベルの中から最小値を選び、ラベルを確定する
ダイクストラ法	最小値の選び方に言及しない
バケット法	仮ラベルをバケットで管理し、最小値を選定し易くする
ヒープ法	仮ラベルを親子の階層構造で管理し、最小値を選定し易くする
両方向探索法	出発地と目的地の両方向から探索する
A*法	目的地までの最短値を考慮し、その下限値を用いる
ラベル修正法	探索した仮ラベルに対してラベルを確定する方法をとらない
ポテンシャル法	仮ラベルをFIFO等の方法で取り出す
バケット法	仮ラベルをバケットで管理し、最小値に近いものを取り出す
A法	目的地までの最短値を考慮するが、下限値を用いない

てんもく けんじ
住友電気工業㈱

〒554-0024 大阪市此花区島屋1-1-3

- ② U から $\text{dist}(v)$ が最小である点 v を1つ選んで取り出す。もし $v=d$ ならば終了。
- ③ $\text{dist}(v)+\text{length}(v, w) < \text{dist}(w)$ となる枝 (v, w) に対し、 $\text{dist}(w)=\text{dist}(v)+\text{length}(v, w)$ 、 $p(w)=v$ とし、 w を U に格納する。②へ戻る。

ラベル修正法は出発地から探索を開始し、各探索では幅優先探索等の位相的順序に従ってリンクを選び、そのリンクに接続するリンクを走査し、出発地からのコストを求めていく手法である。ラベル修正法では各探索においてリンクを選ぶ際にダイクストラ法のようにコスト最小のものを選ぶ手間は不要であるが、各リンクは2度以上探索される可能性がある。ラベル修正法は道路網のように各点の次数が定数オーダーであるような粗なグラフでは1回の探索当たりの処理時間と探索回数のバランスが良く有効であると考えられる。

これらの方法は、基本的に出発地から他の全リンクへのコスト最小の経路を求めるものであるため、目的地とは異なる方向のリンクにも同じように探索を広げていく。

そこで探索するリンクをなるべく出発地と目的地の間に限定し、探索回数を減らすため、出発地、目的地の両方からダイクストラ法による探索を行う両方向探索法も用いられる。

また、ダイクストラ法に、目的地に近いリンクほど小さくなるヒューリスティックなコストを付け加えたアプローチである A* 法も用いられる。A* 法では各点 v から d までの最短路の長さの下限値 $h(v)$ を用いており、 $h(v)$ の例として v から d までのユークリッド距離がある。アルゴリズムは以下の通りである。

A* 法

- ① o 以外の点 v について o からの仮の距離 $\text{dist}(v)=\infty$ 、 $\text{dist}(o)=0$ 、すべての v について仮の親 $p(v)=\text{null}$ 、走査対象点の集合 $U=\{o\}$ とする。
- ② U から $\text{dist}(v)+h(v)$ が最小である点 v を1つ選んで取り出す。もし $v=d$ ならば終了。
- ③ $\text{dist}(v)+\text{length}(v, w) < \text{dist}(w)$ となる枝 (v, w) に対し、 $\text{dist}(w)=\text{dist}(v)+\text{length}(v, w)$ 、 $p(w)=v$ とし、 w を U に格納する。②へ戻る。

また、出発地から目的地までの経路は人間にとって直感的に理解しやすいため、ナビゲーションシステムの経路探索では探索回数を減らすために、表2で示すような多くのヒューリスティックな工夫がなされている。例えば、一般に車両で走行する際には出発地、目

表2 探索回数削減アルゴリズム

種類	特徴
階層化法	出発地、目的地から離れている道路を階層的に縮退して計算に用いる
長方形法	出発地、目的地を含む適当な長方形内の道路のみを計算の対象とする
楕円法	出発地、目的地を焦点とする楕円内の道路のみを計算の対象とする
遠方縮退法	出発地から離れている道路を縮退する
分割攻略法	出発地から目的地までの経路を複数回に分割して計算する

的地周辺以外では国道や高速道路等の幹線道路を利用することが多いと考えられるため、グラフを全道路網を表現した層、幹線道路だけを表現した層のように複数の階層に分割して持ち、出発地、目的地の周辺は詳細な層、中間部分は幹線道路のみの層を用いることによって中間部分のグラフのリンク数を削減する手法(階層化法)や、探索を出発地、目的地を含む長方形や楕円形の領域に限定する手法(長方形法、楕円法)、出発地から遠方にある道路のみを縮退させる手法(遠方縮退法)等が、一般的に用いられている。

2.2 経路探索の具体例

次に、ナビゲーションシステムにおける経路探索の具体例について、通常の経路探索とは異なった例を2つ紹介する。

2.2.1 合理的な複数経路の探索

利用者の多様なニーズを満たすため、ナビゲーションシステムに対し複数の推奨経路の提供を望む意見も多い。現在のシステムでは、所要時間最小化、走行距離最小化、右折回数最小化等、異なるコストを用いて経路探索を行うことによって評価観点の異なる複数の経路を求めている。ここで紹介する方式はこのような手法ではなく、同一のコスト、同一の評価観点から異なる複数の経路を求める手法である。k番目に最短の経路を求めるk-最短路問題のアルゴリズムを道路網のグラフに適用した場合、最短経路から1ブロック分迂回した経路等、最短経路とほとんど変わらない経路が求まってしまう。そこで、新たにナビゲーションシステムにおける複数経路にふさわしい、「代替経路」の探索について紹介する。

ナビゲーションシステムにおいて、ユーザーの選択のために最適経路とともに提供する代替経路に必要な条件として、

- (i) 最適経路とのコストの差が小さい
- (ii) 最適経路とはなるべく異なるリンクを通るが挙げられる。そこで、出発地から目的地までの代替

経路を以下のように定義してみる。

[定義1] 最適経路と重複するリンクのコストの和が最適経路のコストの1/2未満の経路の中で、コストが最小の経路を代替経路と定義する。

この定義に従って代替経路を求めた場合、途中で最適経路との分岐、合流を何度も繰り返すような経路が求まることがある。このような経路は利用者が最適経路と比較、選択する対象とするのにふさわしいとはいえないものである。そこで、代替経路の定義を最適経路との重複だけでなく、分岐、合流の回数も考慮して以下のように変更してみる。

[定義2] 代替経路を、最適経路とのコストの差が与えられた定数 Δ 以下かつ、最適経路との分岐、合流が1回のみを経路の中で、最適経路と重複するリンクのコストの和が最小の経路と定義する。但し、そのような経路が複数存在する場合は、その中でコスト最小のものとする。

このようにして定義した代替経路はEppsteinのk-最短路アルゴリズムを拡張することによって効率的に求めることが可能である。実験の結果、多くの場合で

利用者が最適経路と比較、選択する対象として妥当と思われる代替経路が求まった。表3は定数 Δ を変化させた場合の探索によって得られた代替経路と最適経路の重複部分の最適経路に対するコストの割合(単位:%)を示したものである。また、図1は $\Delta=100$ および120の場合の代替経路を示している。図1において経路を示す太線の内、太い方は最適経路を、細い方は代替経路を示す。

2.2.2 遠方縮退経路探索

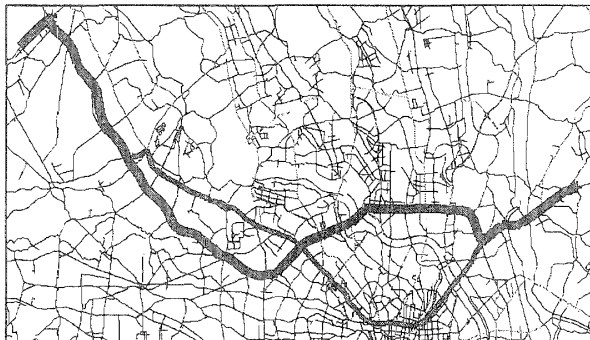
出発地と目的地との距離が長い場合、目的地の位置が多少変わったとしても、出発地付近の経路はほとんど影響を受けない。例えば、現在地が東京駅前の場合、目的地が大阪であろうと名古屋であろうと、少なくとも高速道路までの経路は同じである。このことを利用して、目的地をエリア別にグループ化して、交差点ごとに各グループへの進行方向を設定することにより、記憶容量を削減することができる。出発地から離れるにつれて、グルーピングを粗くすれば、さらに効果的である。

この考え方は、1973~1978年に自動車総合管制システムでガイドテーブルとして実験され、ある程度、最適性に関して有効であると実証されている。しかし、この方式では、動的な交通情報を考慮した経路を提供することができない、常に1つの経路しか提供することができない、等の欠点があった。そこで筆者らは、以下のような2点を改良したアルゴリズムを開発した。

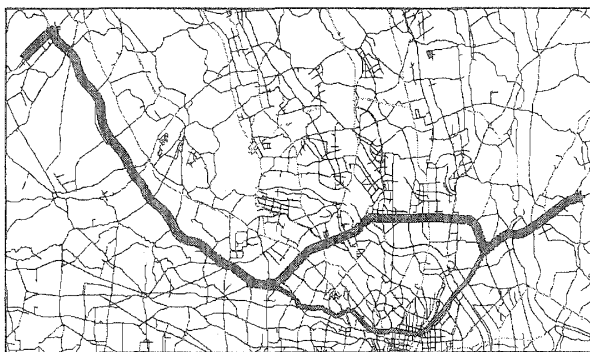
まず最初は、目的地から出発地への距離と方角によってグルーピングし、図2のように、テーブルを目的地から出発地方向に検索し、さらに経路計算と併用する点である。これにより、出発地付近の動的な交通情報を考慮して経路を求めることが可能となった。出発地から遠方では、リアルタイム情報はあまり重要でないため、テーブル検索で得られる経路でもあまり問題は無い。さらに、車両の移動に伴い、車両付近の経路を再計算することにより、常に動的な交通情報を考慮

表3 Δ と最適経路との重複部分の割合の関係

Δ	20	40	60	80	100	120
重複部分	97.0	56.4	56.4	56.4	53.8	36.9



(1) $\Delta=100$



(2) $\Delta=120$

図1 得られた代替経路の例

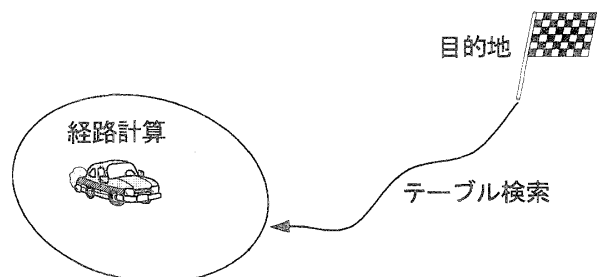


図2 テーブル検索と経路計算の併用

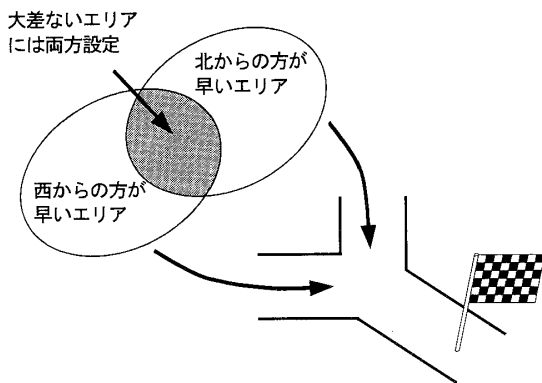


図3 複数経路のイメージ



図5 複数経路の例

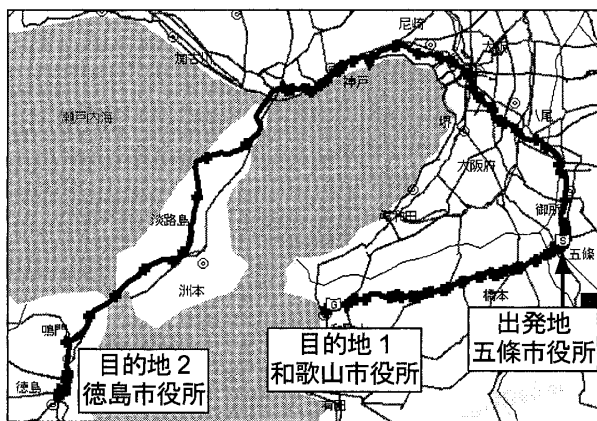


図4 距離と方角によってグルーピングされたテーブルによって求められた経路

た経路の例を図4および図5に示す。図4は、出発地を奈良県五條市役所前に、目的地を和歌山市役所前と徳島市役所前に設定した例である。わかりやすいように両方の経路を一度に図示している。出発地からそれぞれの目的地への方角はほぼ同じであるが、徳島への経路は淡路島を経由する必要がある。本アルゴリズムでは、目的地から出発地への方角だけではなく、距離も考慮した上でグルーピングし、テーブルを作成しているので、このような場合でも妥当な経路を得ることができる。

図5は、出発地が大阪駅前、目的地が山梨県の大月市役所前の例である。この場合、中央自動車道を通る経路と、名神・東名高速道路を通る経路にほとんど差がないため、大月ジャンクションにおける経路テーブルには、長野方面と静岡方面の2つの接続情報が設定されている。その結果、2通りの経路を提供することができる。

した経路を得ることができる。

次に改良した点は、図3のように、出発地と目的地との間に複数の妥当な経路が存在する場合には、それらを全てテーブルに設定することである。これは、以下のような手順で行われる。

- ① まず出発地グループの各リンクと目的地リンクとの間で代表的な経路を求める。
- ② 代表的な経路が1つしかなければ、それを唯一の経路としてテーブルに登録しておく。
- ③ 代表的な経路が複数ある場合は、それぞれの一致度を調べる。一致度が低い、すなわち大きく異なる経路がある場合には、これらを第2候補、第3候補として順次テーブルに登録していく。一致度が高い、すなわち、重複部分が多い経路しかない場合には、経路として不適当なので、登録はしない。

これにより、ドライバーの好みの経路を案内したり、天候や突発事象等による通行止めによる迂回に対応したりすることができる。

実際にテーブル検索と経路計算との併用で求められ

3. 経路誘導システムの具体例

3.1 中央決定型経路誘導と自立型経路誘導

DRGS (Dynamic Route Guidance System: 動的経路誘導システム) には、中央決定型動的経路誘導システム (C-DRGS: Centrally determined Dynamic Route Guidance System) と、自立型動的経路誘導システム (L-DRGS: Locally determined Dynamic Route Guidance System) の2通りがある。それぞれの概念図を図6と図7に示す。

前者では、誘導車両はビーコンを通過した際に、目的地、前回通過ビーコンID、実績リンク旅行時間等の情報をビーコンに送信し、逆にビーコンから目的地までの経路や目的地までの所要時間を受信する。交通管制センターは、一定のタイミングごとに各ビーコンから収集される実績リンク旅行時間を用いて、全ての

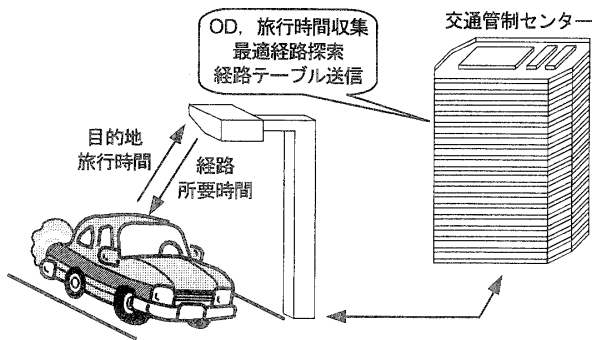


図6 C-DRGSの概念図

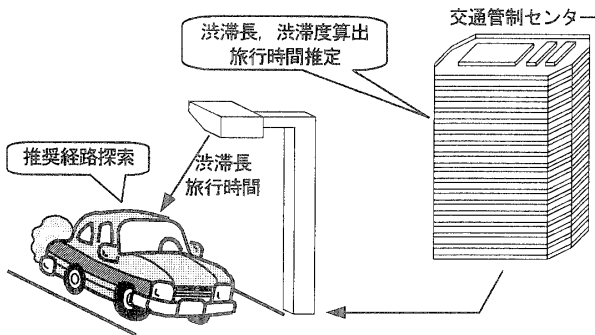


図7 L-DRGSの概念図

OD (Origin and Destination: 出発地・目的地) ペアの最適経路を求め、整理された検索テーブルを各ビーコンに送信する。なお通信手段として、ビーコンの代わりに携帯電話等を用いることも考えられる。

また後者では、VICSに代表されるように、路上の車両感知器等から収集された旅行時間や渋滞長、渋滞度が、ビーコンやFM多重放送等の通信手段を通して誘導車両に送信される。誘導車両は、それらの情報を用いて、走行すべき経路を探索する。

3.2 経路誘導の効果評価

ここでは、C-DRGSが導入された場合の効果を、交通流シミュレーションで評価した結果を示す。L-DRGSの場合でも、各車両の最適経路を求める際の使用データや評価基準が共通であれば、同様の結果が得られる。なお非誘導車両は、あらかじめ設定された静的なリンク旅行時間を用いて求められた目的地までの最短時間経路に沿って走行する。

シミュレーションの対象となる道路ネットワークは車載ナビゲーションシステムで用いられている経路探索用道路ネットワークであり、日本全国をカバーしている。今回用いたのはその中でも非常に道路密度が高い東京近郊約10 km×10 kmのエリアで、1,172本のリンクを含み、リンク総延長は約516 kmに及ぶ。

道路ネットワーク全図を図8に示す。この中で、以

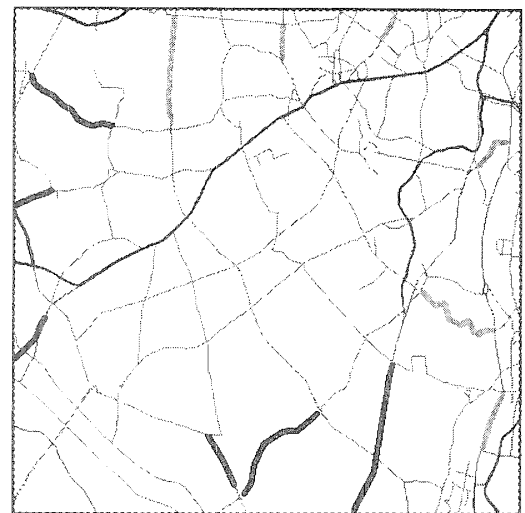


図8 シミュレーション対象ネットワーク

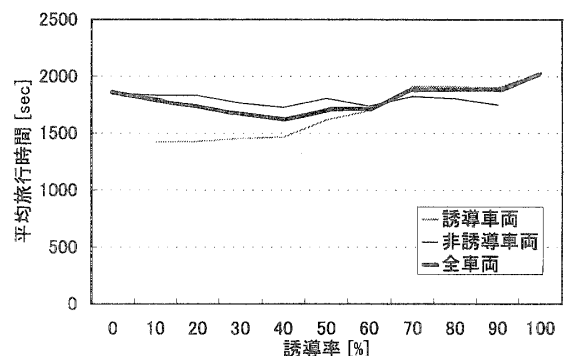


図9 誘導車両に最適経路のみを走行させた場合

下のシミュレーションで用いた出発地を黒い太線で、目的地を灰色の太線で示す。それぞれ6リンクずつあり、東京の西南方面から都心に向かって走行する。

シミュレーションでは、交通管制センターと車両との双方向通信に用いるビーコンは全リンクの始点に設置されているものとし、車線数は全リンクについて1車線のみとした。

シミュレーション結果を図9に示す。横軸は誘導車両の割合(単位:%)を、縦軸は平均旅行時間(単位:sec)を表す。この図9を見ると、誘導率が40%程度の場合に全車両の平均旅行時間が最小になっており、さらに誘導率が高くなると誘導車両の平均旅行時間が非誘導車両の平均旅行時間を上回る、いわゆるハンチング現象が起こっている。この原因として、このシミュレーションでは交通流配分を行っていないため、最適経路に誘導車両が集中することや、旅行時間の予測を行っていないことが挙げられる。

また、筆者らの評価では、情報収集や通信によって生じる遅れ時間がDRGSの効果に大きく影響を与えており、情報伝達の遅れは少ない方がよいという結果

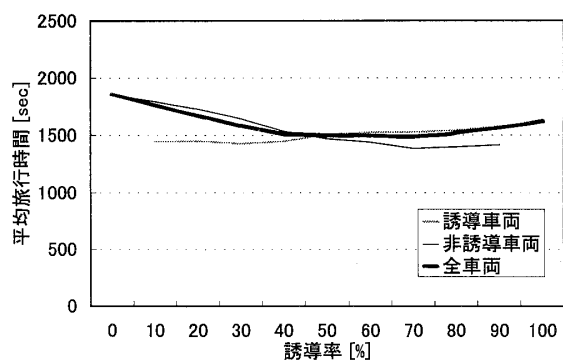


図10 誘導車両を2経路に配分した場合

になっている。

さらに、誘導車両が少ないときに最適経路の更新周期が短すぎると、1周期内に十分な数の旅行時間データが集まらず、経路探索結果の信頼性が落ちることも判明しており、最適経路の更新周期は5分程度が妥当であることがわかっている。

以上は、各ODに対して、動的な交通情報を用いた最適経路探索の結果に従って誘導した場合について述べたが、交通流の配分を行うと、誘導率が高くて動的経路誘導の効果が維持されると言われている。ここでは、各ODに対してあらかじめ設定された2通りずつの経路を与え、各経路の旅行時間に関して車両台数が反比例するように、誘導車両を配分した場合について、シミュレーションを行った。

シミュレーション結果を図10に示す。この図10を見ると、誘導率が高くなっても図9に比べて平均旅行時間が増加せず、例えば誘導率が80%の場合には、全車両の平均旅行時間が約20%減少していることがわかる。したがって、誘導率が高くなった場合にDRGSの効果を維持しようとする、このような簡単な配分手法を採用しても非常に有効であるといえる。

4. おわりに

ナビゲーションにおけるいくつかの経路探索アルゴリズムと、これを用いた経路誘導システムの具体例、および経路誘導の効果評価の例を紹介した。現在、経路探索は、リアルタイムや統計値の旅行時間をベースとしたものが主流であり、道路の有効利用と渋滞緩和に役立っている。しかしながら、交通分野での問題には、渋滞緩和の課題だけでなく、交通事故あるいは交通安全の課題や、空中のCO₂削減という意味で、環境整備の課題もある。

今後は、事故多発地点の走行回避、あるいは交差点での安全な右折を目指す安全性の考慮や、大型車の集

中防止、および時間差出勤や経路変更等のTDM (Traffic Demand Management: 交通需要マネジメント) による渋滞緩和等、環境面の配慮により、より生活に密着した具体的課題を、経路探索や誘導のロジックに組み込んで、来るべき21世紀のより良い道路交通を目指してゆく必要がある。

参考文献

- Barbier, M. et al. (1994), "Multirouting Strategies in Guidance Systems", Telematics for Transport, the 1st World Congress on Applications and Transport Telematics and Intelligent Vehicle-Highway Systems.
- Dial, R., Glover, F., Karney, D., and Klingman, D. (1979), "A computational analysis of alternative algorithms and labeling techniques for finding shortest path trees", Networks, 9, pp. 215-248.
- Dijkstra, E. W. (1959), "A note on two problems in connexion with graphs", Numerische Mathematik, 1, pp. 269-271.
- 土居陽一・吉井正明・厚朴靖広・天目健二・清水修・井上琢弥・長尾真伸・内田正樹 (1990) 「自動車の位置検出方式の開発」『住友電気』137, pp. 105-112.
- Eppstein, D. (1999), "Finding the k shortest paths", SIAM Journal on Computing, 28, pp. 653-674.
- Hart, P., Nilsson, N. and Rafael, B. (1968), "A formal basis for the heuristic determination of minimum cost path", IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, SSC-4, pp. 100-107.
- 泉隆・中原正道・高橋寛 (1990) 「パソコンを用いた交通情報案内システム」, 『電気学会, 道路交通研究会』RTA-90-20.
- Katoh, N., Ibaraki, I. and Mine, H. (1982), "An efficient algorithm for K shortest simple paths", Networks, 12, pp. 411-427.
- 小林祥延・平野和夫・出川裕久・橋本武夫・名倉充彦 (1992) 「推奨経路表示機能付ナビゲーションシステム」, 『住友電気』141, pp. 155-160.
- 松本俊哲・三上徹・油本暢勇・田部力 (1979) 「自動車総合管制システム」, 『電子通信学会別冊』62(8).
- 森津秀夫・大原竜也・多田典史・井上琢弥 (1991) 「経路誘導による交通ネットワークフローの変化に関する分析」, 『土木計画学研究・論文集』9.
- 柴田潤・天目健二・下浦弘 (1993) 「ストカスティック経路探索アルゴリズムの開発」, 『住友電気』143, pp. 164-173.
- Shibuya, S., Imai, H., Nishimura, S., Shimoura, H. and

Tenmoku, K. (1999), "Finding useful detours in geographical databases", E 82-D, 282-290.

下浦弘・天目健二・柴田潤・三藤邦彦 (1996) 「交通流シ

ミュレーションを用いた動的経路誘導の評価」, 『住友電気』 148, pp. 42-47.