説

ナビゲーションシステム

Navigation System

西村 茂樹* 津田 新吾* 大橋 紳悟* 香川 浩司*

長尾 真伸* 松本 達治* *住友電気工業株式会社 ITS 研究所

Shigeki Nishimura*, Shingo Tsuda*, Shingo Ohashi*, Kouji Kagawa*,

Masanobu Nagao* and Tatsuji Matumoto* *Intelligent Transport Systems Laboratories, Sumitomo Electric Industries, Ltd.

1. 緒 言

自動車の情報化のキーデバイスとなりつつあるナビゲーションシステムは、1980年代から一般車向けに市販されてきたが、当初は位置検出などのシステム性能が安価では確保できなかったため、高級車に限った装備であった。しかし、近年のエレクトロニクス技術の発達により低価格化がすすみ、機能的にも本来のナビゲーションの意味である「経路案内」機能を実現することが可能となり、出荷台数累計は350万台程度と、日本の全自動車保有台数の5%程度にもはる装着率となる見通しである。

本稿では、はじめにナビゲーションシステムの構成、機能全体について概説を行う。そのあと、目的地を定めるだけで道路ネットワークデータを参照して、車両が最短時間で到達する経路を算出する経路探索手法、および音声などを使った経路案内手法を中心に紹介する。

2. ナビゲーションシステムと最近の技術概観

一般的なナビゲーションシステムの構成を図1に示す。GPS衛星からの電波によって現在位置を検出するためのGPS受信機とそのアンテナ、進行方向の変化を検出するジャイロ、車の移動速度に同期した車速パルスから移動距離を算出する回路、操作のリモコンスイッチ、地図を記憶するCD-ROMとその再生装置、地図描画などを行うナビゲーションコンピュータ、現在位置や目的地までの経路を地図上に表示するための液晶ディスプレイなどから構成される。

また、近年では渋滞情報などを受信するためのVICS受信機、GPSの位置精度を数十[m]から数[m]に向上させるための位置補正情報を受信するFM多重受信機、CD-ROMの代わりに約10倍の容量のDVD-ROMを有し、街区図やビル内の各フロアのオフィス名を表示、検索できるタイプ、音声による案内だけでなく、リモコンスイッチの代わ

りに音声による入力機能を有するタイプ、一部には面倒な車速パルスの取り出しと接続を不要にするため、加速度センサにより移動速度を算出するタイプ、加速度センサにより傾斜角を算出するタイプもある。

特に最近のナビゲーションシステムではそのほとんどがVICS受信機を接続可能になっている。図2にはそのVICSのシステム構成図を示す。VICS (Vehicle Informa-

図1 ナビゲーションシステムの構成例

図2 VICS

原稿受付 1999年1月4日

キーワード: Navigation, Route Calculation, Route Guidance

*〒554-0024 大阪市此花区島屋1-1-3

*Konohana-Ku, Osaka-shi, Osaka

tion and Communication System) は 1996 年 4 月に首都圏、および東名・名神高速道路全線を皮切りに情報提供を開始し、年々各府県に拡大し、ほとんどすべての高速道路でもサービスされている。交通管制センターの情報は日本道路交通情報センター経由で VICS センターに集められ、電波ビーコン、光ビーコンおよび FM 多重放送の 3 メディアで提供されている。VICS からの提供情報を受信した場合には文字や図形からなる渋滞情報や規制情報を地図画面に重ね合わせて表示したり、車両感知器により収集されたリンク旅行時間を利用して混雑している経路を避け、空いている経路を自動的に探索することができる。

さらに、モデムが接続可能になっており、携帯電話を利用することにより、インターネットに接続して、ホームページの検索と閲覧や、ホームページ上から行き先の位置情報をダウンロードして、目的地までの経路探索を自動的に行ったり、電子メールを読むことができる最新システムもある。

また、車両の制御系と連携することで、速度と現在位置を元に地図データから判断できる前方のカーブ形状などから、走行安全性を高めることができる構成を採るシステムもある。

上に述べたように、最近のナビゲーションシステムはますます高機能化しているが、最も基本的な技術は、①自車の現在位置を検出する技術、②目的地までの経路を探索する技術、③地図を表示し、現在位置や目的地までの経路を地図上で運転者に知らせる技術、などがある。

以下では、経路探索と経路案内について簡単に記す。

3. 経路探索、経路案内手法

3.1 経路探索手法としての最短経路問題解決

実際のシステムでは、様々な機能を実現するためにデータやアルゴリズムの細部に工夫が施されているが、基本となるのは組み合わせ最適化問題の一つである最短経路問題のアルゴリズムである。以下では最短経路問題のアルゴリズムについてその概要を紹介する。

最短経路問題とは、点の集合 V と向きと長さを持った枝の集合 E で構成されるネットワークにおいて、2 点 o, d が与えられたとき、 o から d までの最短経路、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 を結ぶ道路に、枝の長さ $length(v, w)$ は枝 (v, w) に対応する道路の長さあるいは所要時間を表すと考えると理解しやすい。

最短経路問題のアルゴリズムで最も有名なものは 1959 年に Dijkstra によって発表された Dijkstra 法である [1]。そのアルゴリズムは以下の通りである。

Dijkstra 法

ステップ 1 (初期化): 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。

ステップ 2 (選択): U から $dist(v)$ が最小である点 v を一つ選んで取り出す。もし $v = d$ ならば終了。

ステップ 3 (走査): $dist(v) + length(v, w) < dist(w)$ となる枝 (v, w) に対し、 $dist(w) = dist(v) + length(v, w)$, $p(w) = v$ とし、 w を U に格納する。ステップ 2 へ戻る。

アルゴリズムが終了したとき、最短経路の長さは $dist(d)$ であり、実際の最短経路は d から順に $p(d)$ をたどって行くことによって逆向きに復元できる (図 3)。

Dijkstra 法におけるポイントはステップ 2 において集合 U から $dist(v)$ が最小である点 v を一つ選ぶところであり、ここでの整列操作が探索時間のボトルネックとなる。そのため、Dijkstra 法の改良のほとんどが U を実現するデータ構造に関するものであり、バケットや各種ヒープを用いたものが知られている。データ構造以外の改良としては、走査する点の数を減らすため、探索を始点からの一方方向ではなく、始点、終点の双方向から探索する Nicholson 法が知られている。

Dijkstra 法のような整列操作を行わないアルゴリズムとして、ポテンシャル法あるいは逐次反復法と呼ばれる方法がある。

ポテンシャル法では次に走査する点の選択を先入れ先出し (FIFO) などの $dist(v)$ の大きさに依存しない規則によって行う。ポテンシャル法は Dijkstra 法とは違い、同じ

Dijkstra法終了後のネットワークの例

$V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$,

$E = \{(1, 2), (1, 3), (2, 4), (3, 4), (3, 5), (4, 6), (5, 6)\}$,

枝 (v, w) (矢線) 上の数字は $length(v, w)$,

点 v (丸数字) の横の数字は上段が $dist(v)$, 下段が $p(v)$, 太矢線は最短経路を示す。

図 3 Dijkstra 法

点を複数回走査する必要があるため、適切な終了条件が必要である。ポテンシャル法の探索時間は U のデータ構造や終了条件によって大きく異なる。

Dijkstra 法に、走査する点の数を少なくするためにヒューリスティクスを加味したアルゴリズムとして、A*アルゴリズムがある [2]。

A*アルゴリズムでは各点 v から d までの最短路の長さの下限值 $h(v)$ を用いる。

A*アルゴリズム

ステップ 1 (初期化): 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。

ステップ 2 (選択): U から $dist(v) + h(v)$ が最小である点 v を一つ選んで取り出す。もし $v = d$ ならば終了。

ステップ 3 (走査): $dist(v) + length(v, w) < dist(w)$ となる枝 (v, w) に対し, $dist(w) = dist(v) + length(v, w)$, $p(w) = v$ とし, w を U に格納する。ステップ 2 へ戻る。

A*アルゴリズムでは、 $h(v)$ を用いることによって $dist(v)$ が同じであれば、 d に近い点を優先して探索するため、Dijkstra 法よりも走査する点の数が少なくなる。その効果は $h(v)$ が真値に近いほど大きいため、精度の良い $h(v)$ を選ぶことが重要となる。

3.2 経路案内機能

最近のナビゲーションシステムの経路案内機能の概要について以下に紹介する。

経路案内の最も重要な機能は交差点での進行方向案内であり、分かりやすい案内を行うべく表示や音声による様々な案内方法が開発されている。交差点における進行方向の表示方法としては、地図の道路形状をほぼ反映して表示する拡大図表示方式と形状をある程度デフォルメして表示する模式図表示方式の 2 通りがある (図 4 に概念例を示す)。拡大図表示では案内交差点周辺の道路の情報を表示できるというメリットがあり、模式図表示では高速上の分岐のように道路がほとんど重なっているような場合に進行方向を分かりやすく表示できるメリットがある。最近では、一般道路などの通常の交差点では拡大図表示を行い、分岐方向を間違いやすい都市内高速の JCT などでは模式図表示を行うというように両方式を併用するナビが多くなっている。表示するアイテムとしては、従来の道路形状、進行方向、交差点名称以外に、交差点までの距離情報、信号機や GS・銀行・コンビニなどのランドマーク情報、車線情報 (レーン数、走行可能方向)、行き先名称情報などが表示される

図 4 交差点案内図

ようになってきている。また、交差点形状の表示も二次元の平面的な表示から三次元の立体的な表示となり、立体交差を表現したり、交差点への接近に従い視点位置を変えていくなど、よりリアルな表示が行われるようになってきている。

音声案内については、PCM または ADPCM による編集合成方式と大語彙化が可能な規則音声合成方式の 2 通りが存在するが、聞きやすさの点から編集合成方式が主流となっている。案内する音声内容としては、交差点までの距離や交差点での進行方向のほかに、交差点名称、行き先名称、ランドマーク情報、車線情報などが用いられるようになってきている。特に最近主流となっている DVD ナビゲーションシステムでは大容量記憶媒体のメリットを生かし、交差点名や行き先名といった数万件もの固有名詞の音声データを格納し、編集合成方式での音声案内を実現している。交差点における音声案内例として以下のようなものがある。

「およそ 500 [m] 先, ○○交差点を右方向です」

「300 [m] 先, ××銀行のある交差点を右方向です」

「まもなく左方向です。△△方面です」

その他、音声のバリエーションとして、男女切り替え、外国語案内、方言案内などを選択できるものもある。音声案内は、交差点到達までに 2~3 回 (遠距離、(中距離)、近距離) 行い、その案内タイミングは一般道路と高速道路で切り替えている (高速道路では早めに案内する)。

また、交差点での案内以外でも様々な案内機能が実現されている。例えば、高速道路を通る経路が算出された場合、利用する高速道路名称、入口/出口の IC 名称、IC、SA 間の距離情報、SA の施設情報 (トイレ、レストラン、GS などの有無)、高速道路の料金などの案内を行う。その他、カーブや事故多発地点の警告案内、高速出口や目的地までの予想所要時間・予想到達時刻の案内も行われている。

また、VICS 対応のナビゲーションシステムでは、VICS

情報を受信して、経路上の通行止めや渋滞情報の有無や発生地点までの距離を案内する。

4. ナビゲーションシステムでの実現手法例

4.1 ナビゲーションシステムでの経路探索手法

ナビゲーションシステムの経路探索で用いられる一般的なネットワークデータは、道路をリンク、交差点をノードとしたデータである。それぞれのリンクには初期コストが与えられており、コストとしては、リンクの長さ（リンク長）やそのリンクを通過するのに必要な時間（平均旅行時間）が格納されている。

リンク間を接続するノードにもコストが与えられているが、実際の交差点で、直進する場合と右折する場合に必要な時間は異なることが多いため、リンク間の接続関係が直進であるか、右左折であるかによって与えられるコストは変化する。また、ノードには交差点で右折禁止などがあった場合、その規制情報を表すデータが与えられており、Dijkstra 法などを用いたネットワーク探索時には、その規制情報に従ってリンクの接続先を決定する。

ナビゲーションシステムでは、探索結果格納用や探索ワーク用のメモリ容量の制限、探索時間短縮のためのデータ読込時間および CPU 能力による制限などの資源による制限が存在する。そこで、その資源内であるべく長距離の探索を実現するために、探索に用いるネットワークデータを削減する方法が採られる。その方法として、一般的にはネットワークデータの階層化を行う（図 5）。

階層化データを用いる例としては、すべての道路を含む詳細層と高速道路と主要な一般道路のみを含む広域層の 2 層とし、長距離の場合は出発地と目的地の周辺を詳細層、その間は広域層を用いて探索を行うようにする。長距離を移動する場合、一般的にドライバは途中の経路として主要な道路を用いることが多いと考えられ、出発地と目的地周辺以外は、前記広域層に含まれる道路のみではほぼ妥当な経路が探索できると考えられる。短距離探索の場合は必要とされるエリアが小さくて済むため、詳細層のみ用いて探索を行うことで、より妥当な経路を算出することが可能である。

図 5 階層化データの例

ナビゲーションシステムでは、高速道路を使用したくない場合に一般道のみを経路を探索するなど、ドライバの好みに応じた経路を探索することも重要である。このときは、各リンクの道路種別を参照し、高速道路なら初期コストを N 倍することで、一般道のみを経路を算出することが可能である。ここで、 N を大きくしすぎたり、高速道路を通れないようにすると、高速道路を使用しないとたどり着けない場所が出発地・目的地であった場合に探索できなくなるので注意が必要である。

近年、渋滞や事故規制などのリアルタイムの情報を外部から受信して、それを経路探索に反映させるという DRGS (Dynamic Route Guidance System) が実現されている。これは、地上に設置されたビーコンなどから情報を受信し、通行止めとなった道路を通らない経路を探索したり、渋滞している道路を通らずに空いている道路を通る経路を探索する機能であり、受信した各リンクのコスト（リンク旅行時間）をデータ上の初期コストと置き換えたり、右左折禁止を受信したリンク間の接続関係を通行不可としたりすることで実現できる。

このようにして決定したリンクのコストおよび接続関係からなるネットワークを用いて、Dijkstra 法などで出発地リンクから目的地リンクまでの最適経路を探索することで、ドライバの好みに合致した、また、リアルタイムの情報を反映した経路探索を実現している。

ナビゲーションシステムでは、その他の経路探索形態として、復帰計算や迂回計算があげられる。

復帰計算とは、経路上から外れて走行している場合に、元の経路まで戻る経路を探索するものである。ドライバが曲がるべき交差点を直進してしまったりして、元の経路から外れた場合、なるべく早く進むべき方向を示す必要があり、探索時間は短い方がよい。そこで、現在地から一定範囲内に含まれる元の経路の最も目的地側のノードまたはリンクまでの経路を探索することで、探索時間の短縮を図っている（図 6）。

迂回計算とは、何らかの理由で元の経路を避ける経路を探索したい場合に、元の経路の迂回したい部分のリンクのコストを M 倍することで、元の経路を使用しない代替経路を探索する（図 7）。

さらに、最近では細街路探索も実現されている。これま

図 6 復帰計算

図7 迂回計算

でナビゲーションシステムで用いられているネットワークデータは、主要な幹線のみを対象としていた。これは、細街路まで含めると経路探索用のネットワークデータが膨大になってしまうということや、生活道路を通るような経路は望ましくないという観点からであるが、出発地から探索された経路上の幹線までの行き方や目的地周辺の幹線までたどり着いた後、目的地までの行き方が分からないという問題があった。そこで、出発地および目的地の近くでは、すべての道路を対象として探索して、たどり着ける幹線をいくつか選択し、それらの幹線同士を結ぶ経路をこれまでと同様にネットワークデータを用いて探索することで、Door to Door の経路探索を実現している。

4.2 ナビゲーションシステムでの経路案内動作例

1) 交差点形状の算出と交差点案内要否の判定

経路案内の実行にあたり求めた経路上の全交差点に対して交差点形状の算出と交差点案内要否の判定のために交差点を構成する全道路の方位を求める。この全道路方位を算出するためナビゲーションシステムで保有する道路データは道路のネットワーク構造が分かる構造となっており、この道路データを用いることで交差点に接続する全道路リンクと道路リンクを構成する座標列を順次取得することで交差点を構成するすべての道路方位を求めている。

求められた道路方位を元に、ドライバーの視認性確保を目的として16方位にデフォルメ化した交差点形状を算出する。この交差点形状の算出は主に分岐角度より行い、道路看板に近いデフォルメ化された交差点形状の算出を行っている。

上記にて求められた交差点形状より進入方位に対する退出方位の変化度を求め案内の要否を決定する。ただし方位変化だけでは案内の要否は判断できないことが多く、各分岐道路の性格（本線、側道など）、道幅、進入可否情報も加味して案内の要否を判定している（図8）。

2) 案内タイミングの監視

案内が必要と判定された交差点までの残走行距離を求め、以後現在位置の移動に伴いこの残走行距離を更新してゆく。音声や交差点案内図による案内は交差点までの残走行距離に依存して複数回行われるが、高速道路案内もしくは一般道路案内ごとにあらかじめ決められた複数の案内開始距離より上記の残走行距離が短くなったときに音声および交差点案内図表示が必要なタイミングであると判断する。

また通常上記のように残走行距離を元に案内タイミング

図8 案内要否判定

図9 案内タイミングの決定

を判断することが多いが、さらに走行速度や案内交差点近辺の交差点密集度を考慮して案内タイミングを決めることもあり、この場合走行速度が速い場合は通常より早めに、交差点が密集している場合は通常より遅く案内することで、ドライバーの走行感覚に合致し、かつ案内交差点を特定しやすい案内タイミングを決めている（図9）。

3) 交差点案内の実行

上記案内タイミングの監視にて案内タイミングであると判断されると、音声および交差点案内図を用いて案内を行う。この音声案内では案内対象の交差点までの距離と分岐方向を用いて行う。分岐方向は右左方向だけではなく斜め方向を含めた分岐方向の案内を行っている。

また交差点案内が必要と判断された交差点が連続する場合は、「まもなく左折です、その先右折です」というように、初めの交差点に対する案内に二つ目の交差点の案内を加えて音声案内を行うことで、ドライバーは余裕をもって走行経路を把握することができる。

5. 結 言

経路探索、経路案内を中心として、ナビゲーションシステムの概説を行った。これらの機能はナビゲーションシステムの本来の機能である、「ドライバーに目的地までの最適

な経路を提示し交差点での進行方向などを案内する」基礎をなす機能である。VICSの普及も進み、渋滞などの道路状況も加味しての最短経路を案内することも可能な状況となっており、ナビゲーションシステム単独でなく、他の車載システムや路上側システムと連携することで、より高機能化がすすむものと考えられる。

参 考 文 献

- [1] 岩野和生(訳): データ構造とネットワークアルゴリズム, マグロウヒル, 1989.
- [2] T. Ikeda et al: "A fast algorithm for finding better routes by AI search techniques," VNIS '94, 1994.

西村茂樹 (Shigeki Nishimura)

1990年京大・工・数理卒業。1992年同大大学院修士課程修了。同年住友電気工業(株)入社。以来、カーナビゲーション用経路計算システム、配送計画システム、交通管制システムなどの研究開発に従事。ITS研究所交通システム研究部所属。

大橋紳悟 (Shingo Ohashi)

1990年岡大・工・電気卒業。1992年同大大学院修士課程修了。同年住友電気工業(株)入社。以後、カーナビゲーションシステムのヒューマンインタフェイス開発に従事。

長尾真伸 (Masanobu Nagao)

1986年阪大・工・電子卒業。1988年同大大学院修士課程修了。同年住友電気工業(株)入社。以来、カーロケーションシステム、およびカーナビゲーションシステムの開発に従事。現在、ITS研究所交通システム研究部主査。

津田新吾 (Shingo Tsuda)

1992年京大・工・電子卒業。同年住友電気工業(株)入社。以来、ナビゲーションシステムの開発に従事。現在、ナビゲーションシステムの経路計算ソフトウェア担当。

香川浩司 (Kouji Kagawa)

1988年阪大・工・応用物理卒業。1990年同大大学院修士課程修了。同年住友電気工業(株)入社。同年7月自動車制御技術研究所に配属。以後、ナビゲーションソフトの開発に従事。

松本達治 (Tatsuji Matumoto)

1983年岡大・工・電気卒業。1985年同大大学院修士課程修了(電気)。同年住友電気工業(株)入社。以来、アンチロック制御システム、カーナビゲーションシステムの研究開発に従事。現在、同社ITS研究所カーエレクトロニクス研究部ナビゲーション担当主任研究員。