

ナビゲーションシステムにおける熟考性と即応性を兼ね備えたルート探索手法

Adaptive Routing Method for a Navigation System

安場 直史*¹
Naofumi Yasuba

長岡 諒*¹
Ryo Nagaoka

矢野 純史*²
Junji Yano

香川 浩司*²
Kouji Kagawa

森田 哲郎*²
Tetsuo Morita

沼尾 正行*³
Masayuki Numao

栗原 聡*³
Satoshi Kurihara

*¹大阪大学大学院 情報科学研究科 情報数理学専攻

Department of Information and Physical Sciences, Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

*²住友電気工業株式会社 情報通信研究所

Information and Communication Laboratories, Sumitomo Electric Industries, LTD

*³大阪大学 産業科学研究所

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

In routing methods for a navigation system, offline methods are optimal but take much computational time. While online methods take less time but not optimal and may fall into local optimal path. This paper proposes the routing method that uses both offline search and online one with short-term traffic prediction information by a distributed traffic control system. A main route is first computed by an offline search same as in currently used navigation systems. In case the route is predicted to be jammed, another route is computed by an online search. Empirical results show our method not only provides adaptive navigation but also takes less computational time.

1. はじめに

情報通信技術の発展に伴い、人と道路と車両とをネットワークでつないだ新しい交通管理システム ITS (Intelligent Transport System) の実現が、交通事故・渋滞などの道路交通問題の解決を目指し、進められている。ナビゲーションに関するサービスとしては、カーナビゲーションシステム (以下、カーナビ)・VICS・プローブカーなどが挙げられるが、トップダウン型集中制御というシステム構造に起因した、情報提供や事故などへの対応の遅延が指摘されている。こうした問題を解決するシステムとして、ボトムアップ型分散制御システムの研究が近年報告されている。分散制御システムはある限定したエリアを担当するローカルサーバを多数配置し、協調させて制御を行うシステムであり、集中制御型より短いスパンでの渋滞予測や事故などの突発的なイベントへの対応に適している。

安藤ら [1] は蜂や蟻などが利用するフェロモンを交通問題に適用したボトムアップ型分散制御システムを開発した。ここでは、走行する車をエージェントとみなし、その地点の交通状況に応じた量のフェロモンを各交差点に設置されたローカルサーバに残すことにより、後続車へ狭範囲、かつ短時間先の渋滞予測情報を提供している。

このように動的に変化する実環境からリアルタイムに交通情報が取得可能になったことで、ナビゲーションシステムのルート探索手法は、動的環境に適し、かつ、より短い計算時間でより精度の高いルートを求めることが必要となる。現在のルート探索手法は一般的に、十分な計算時間をかけて解を探索する熟考型探索が使用されている。これは静的な環境に適した手法であり、対して熟考型探索の欠点を補完する動的環境に適した手法として、定数時間の局所的探索と逐一実行を繰り返すことで

リアルタイムの動作を実現した即応型探索がある。

そこで本研究では、分散制御システムによる短時間先の渋滞予測情報 [1] が提供される環境を想定し、熟考型探索と即応型探索という、相反する探索手法を状況に応じて適宜使い分けルート探索を行う手法を提案する。従来法では熟考型探索により得られた経路に沿って目的地まで走行していたのに対し、本手法では熟考型により得られたルートを単に基準ルートと設定し、基本的に基準ルートに沿って走行するが、動的に変化する実環境においてそのルートが最適である保障はない。そのため、現走行ルート上で渋滞が生じた場合、即応型探索により迂回ルートを設定し、渋滞を回避する経路を探索する。そして、実際の道路データを用いたシミュレータにより本手法の有用性を示す。

2. 経路探索技術

2.1 道路ネットワークの表現

各経路探索では道路ネットワークを有向グラフの形で表現し、各交差点をノード、ノード間道路をリンクとした。リンクのコスト t として道路長と速度から算出した旅行時間を用いた。以下では現在地ノードを S 、目的地ノードを D とする。

さらに、フェロモンモデルを用いた分散制御システム [1] により狭範囲かつ短時間先の渋滞予測情報が利用できる環境を想定した。このシステムによって得られる各経路のフェロモン量を渋滞度 p として表した。渋滞度は、全く混雑していないとき 1.0 をとり、混雑状況によって最高で 5.0 の値をとるものとする。

コストは旅行時間を表すため、渋滞度を反映させたコストは渋滞に巻き込まれた場合の旅行時間を表す。よって、渋滞度反映コスト t' を以下の式で定義する。

$$t' = p \cdot t \quad (1)$$

連絡先: 安場直史, 大阪大学産業科学研究所沼尾研究室,
567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1,
Tel: 06-6879-8426 Fax: 06-6879-8428
E-mail:n_yasuba@ai.sanken.osaka-u.ac.jp

2.2 熟考型探索

処理時間を考えず、最適解を見出すことを重要視している探索手法である。

カーナビに適用した場合、目的地までのルート決定後にしか移動できないが、得られる解はその時点では最適解である。ただし、走行中に道路状況が変化することも実環境においては頻繁に起こるため、動的な環境には適さない。

2.3 即応型探索

定数時間の局所的な探索と逐一実行を繰り返すことにより即応性を持たせた探索手法である。計算時間が短いため、動的環境に適している。

その代表例である RTA*探索 [2] はゴールへの可到達性は保証されるが最適解は保証されておらず、カーナビに適用した場合、同じ道を何度も通ったり、行き止まり(局所解)となるルートを選択し U ターンしたりという可能性がある。RTA*探索のアルゴリズムについて以下に示す。

RTA*探索 [2]

$h(x)$: ヒューリスティック関数

- (1) 現在地 x から伸びるリンクの先端ノード x' に対して、 $t(x, x') + h(x')$ が最小となる x'_{min} を選択。
ただし、 $h(x')$ が定義されていない場合は、 x' からゴールまで直線走行コストとする。
- (2) $h(x)$ を 2 番目に最小となる $t(x, x') + h(x')$ で更新。
- (3) x'_{min} へ移動。
- (4) Step1~3 を目的地に到着するまで繰り返す。

2.4 関連研究

熟考型探索と即応型探索の統合についての関連研究については、迷路を対象にした探索とロボット制御を対象にした探索の 2 例がある。

松原ら [3] は、迷路の探索を対象とし、実時間探索に副目標という熟考型探索の結果を組み込み、実時間探索を行うエリアを小さいエリアに分割することによって精度の向上を図った。さらに、栗原 [4] は、ロボット制御を対象として熟考型探索と即応型探索を同時にしつつ探索の進み具合に応じて適宜使い分け、準最適時間かつ準最適経路を得た。

しかし、これらはいずれも局所解が許容される環境であり、本研究の想定するナビゲーションとは本質的に異なる。

3. 提案するルート探索手法

目的地までのルートを探るにあたり、本研究では狭範囲かつ短時間先の渋滞予測情報が利用できる環境を想定し、図 1 のようなアプローチをとる。

以下で、それぞれのアプローチについて本研究で用いた手法を紹介する。

3.1 熟考型探索による基準ルート探索

基準ルートを探るアルゴリズムとして、ダイクストラ法を用い、目的地 → 現在地という通常とは逆向きの探索を行った。これにより現在地からだけでなく周囲のノードからの最短ルートも求めることができる。

1. 目的地までの基準ルートを探る



2. 適宜近隣の状況に応じてルートを変更

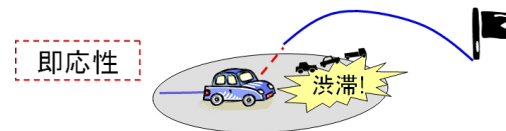


図 1: 本研究の流れ

ここで求めた目的地からの最短経路および最短距離の結果は次節の探索で用いるため、現在地・目的地間の経路が得られた時点で終了とはせず、さらに α 倍同様の探索を行った。

熟考型探索による基準ルート探索アルゴリズムを以下に示す。

熟考型探索による基準ルート探索アルゴリズム

$f(n)$: n , 目的地間の最短コスト

- (1) 目的地 D を探索済とし、 $f(D) = 0$ とする。
- (2) $\forall n (\in \text{探索済ノード})$ から未探索ノード n' へ伸びる全リンクを調べ、 $f(n) + t(n, n')$ が最小となる n' を探索
- (3) n' を探索済とし、最小コストおよび最小経路を保存
- (4) Step2,3 を目的地が探索済となるまで繰り返す
- (5) Step2,3 をさらに α 倍繰り返す

3.2 即応型探索の適用によるルート変更

まず、短時間先の渋滞予測情報を基準ルートに適用し、渋滞の可能性を調べる。このとき、短時間先の情報は一般的に遠く離れたエリアで有効ではないため、渋滞予測情報を適用する範囲は車の近隣のみとした。

- 渋滞反映コストの元コストに対する相対比が閾値未満
→ 渋滞していないため、熟考型の基準ルートを選択。
- 渋滞反映コストの元コストに対する相対比が閾値未満
→ 渋滞していると判断し、即応型によりルート変更。

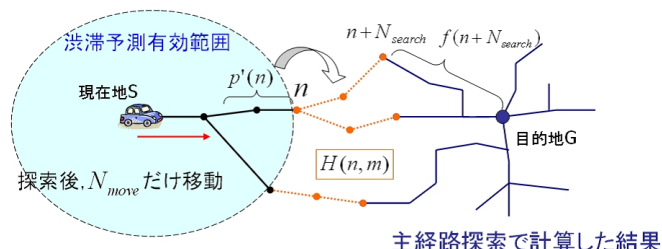


図 2: ルート変更アルゴリズムの概念図

即応型探索によるルート変更アルゴリズムを以下に示す。

即応型探索によるルート変更アルゴリズム

$$P(n) = \sum_{S \rightarrow n} t' , \quad H(n_1, n_2) = p'(n) \cdot \sum_{n_1 \rightarrow n_2} t$$

$p'(n)$: S, n 間経路の先端部 N_p の平均渋滞度: 推定渋滞度

$f(n)$: 熟考型探索で得られた n , 目的地間の最短コスト

- (1) 現在地 S からコスト T_{pher} で到達可能なノード集合 V_{close} を探索 .
- (2) $\forall n' (\in V_{close})$ からさらに 1 ノード深く探索し, 探索先をノード集合 V_{open} とする . ただし, $V_{close} + V_{open}$ 内に目的地があれば探索終了 .
- (3) $\forall n' (\in V_{open})$ からノード深さ N_{search} の集合を探索し, $P(n_1) + H(n_1, n_2) + f(n_2)$ が最小となるルートを選択 (図 2)
- (4) Step3 で得られたルートを N_{move} ノード移動すると再探索 .

このように交通状況に応じて適した探索を使い分けることで熟考型と即応型の統合を考えた . ただし, 即応型探索は局所最適解に陥るという可能性を持つ . ナビゲーションへの応用を考えた際, これは重大な欠点である . そのため, 慎重な経路選択を行えるように, 次の点で即応型探索を拡張した .

- 即応型の探索深さ d に対して N_{move} だけ移動 .
($d(n') \geq N_{move} \quad n' \in V_{open}$)

この拡張により慎重なルート決定が実現し, かつ同じ道を二度通る可能性はかなり低くなる .

4. シミュレーションによる実験・検証

前節で述べた提案手法を, 実際の道路ネットワークを元に作成したシミュレータを用いて実験を行った . シミュレータは Nagel ら [5] のセルオートマトンモデル, Rickert らの MicroSim[6] を参考に作成した .

探索エリアは大阪府北部の約 6km 四方のエリアとし, ノード数約 9000, リンク数約 25000 である . エリア内の車平均台数は 10000 台とした .

シミュレータ内に存在する車は全て出現地点と目的地を持ち, 選択する経路で 3 種類に分類される .

- Car1 提案手法を採用したルート探索を行う車 (1 台)
- Car2 静的情報のみの A*探索によりルートを決める車
- Car3 目的地までランダム走行する車

ただし, 提案手法の評価のため, Car1 については提案手法以外にダイクストラ法, A*探索, RTA*探索を用いて同様に以下の実験を行った .

4.1 渋滞回避の検証

図 3 の黒線のようにルートを設定し, 走行予定の経路上に渋滞を発生させ, その反応を既存手法の結果とともに評価した . 図中黄色のエリアが渋滞発生エリアであり, 図中赤線が提案手法によって得られた渋滞回避ルートである . これより, 提

案手法は渋滞発生ポイントの直前で渋滞を回避できているのが確認できた .

図 3 での実験において観測された探索時間および車の旅行時間について, 図 5, 図 4 に示す . 各値は静的情報のみを用いた A*探索の結果を 100 として, 相対的な評価を行った .

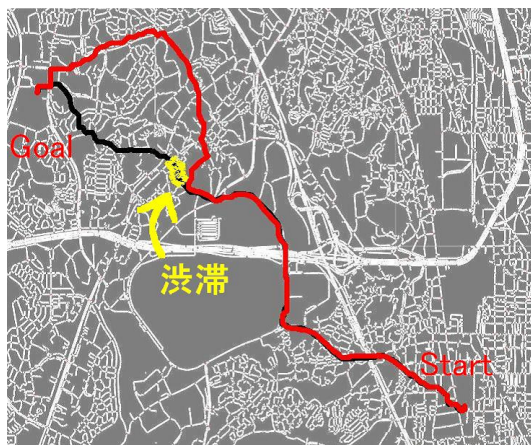


図 3: 渋滞回避検証用ルートと提案手法の選択したルート

図 4 より, 提案手法は熟考型探索の旅行時間とほぼ同様であることが確認でき, さらに図 5 より, 提案手法の計算時間は 1 度目の熟考型探索では従来の手法同様探索時間がかかっているが, 2 度目以降の即応型探索は十分短くなっていることが示された . 迂回ルート探索時についても A*探索に比べ, 1 桁少ない探索時間で解を求めることができた .

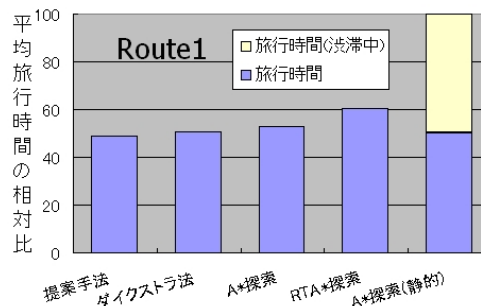


図 4: 動的環境での各手法の旅行時間

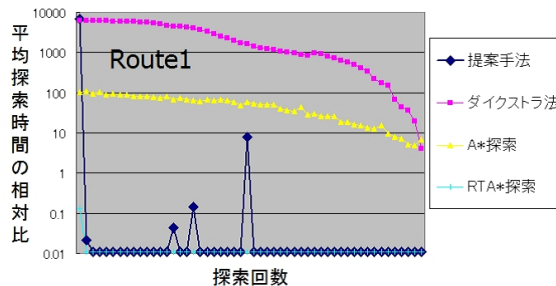


図 5: 動的環境での各手法の探索時間

4.2 複数渋滞回避の検証

次に、図6のように前節において提案手法から得られた迂回ルート上、1度目の迂回ルート探索時に探索不可能な境界の位置にさらにもう1つ渋滞を発生させ、複数の渋滞回避を行えるかどうかを検証した。

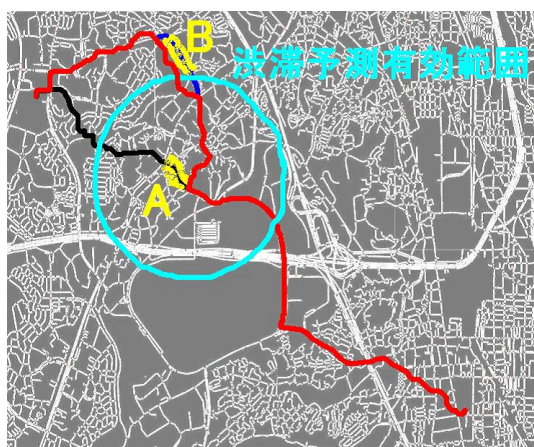


図6: 複数渋滞回避検証用ルートと提案手法の選択したルート

図7より探索後移動するノード数を表すパラメータ N_{move} の設定が適切である場合、提案手法は複数の渋滞を回避できることが確認できた。

$N_{move} = d(n')(n' \in V_{open})$ のとき、1度目の渋滞回避を行った後、次に探索が可能となるのは渋滞しているリンクに入ったときとなるため、渋滞は絶対回避できない。今回は $N_{move} < d(n')$ のとき全て回避できているが、回避ルートが存在しない場合も起こりうるため、 $N_{move} \leq d(n')/2$ 程度にしておくことが望ましいといえる。

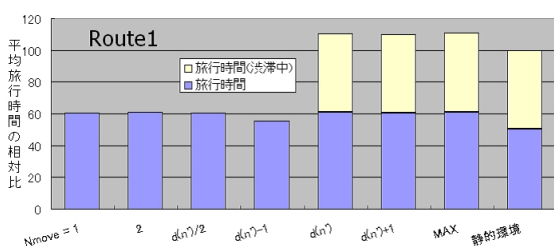


図7: 動的環境での各手法の旅行時間

4.3 即応型探索の探索範囲の影響

最後に、 V_{close} の範囲を設定するパラメータ T_{pher} が即応型探索の解および探索時間に与える影響について検証を行う。 T_{pher} を変化させて実験を行った結果を図8に示す。

図8より、即応型探索の範囲の大小に関わらず旅行時間は一定であったが、探索時間は増加することがわかった。今回の実験においては、市街地を想定しているため脇道が多く存在し、渋滞発見が遅れても回避するルートが存在したため、即応型探索の探索範囲は旅行時間は影響を与えなかったが、探索範囲が小さければ小さいほど渋滞を発見するタイミングが遅れ、渋滞を回避できなくなる可能性も高くなるといえる。

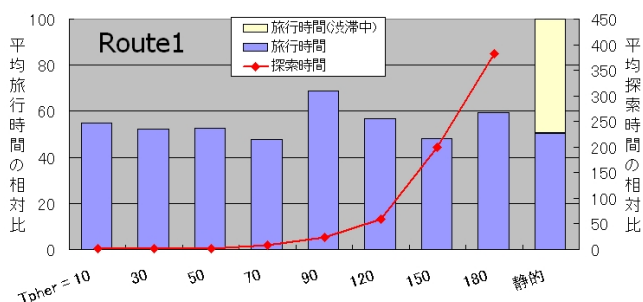


図8: 即応型探索の探索範囲の影響

5. 結論

本研究では、分散制御システムによる短時間先の渋滞予測情報が提供される環境を想定し、熟考型探索と即応型探索を状況に応じて適宜使い分けルート探索を行うことで熟考型探索の解の精度と即応型探索の計算時間での探索を実現した。

今後の課題として、まず熟考型探索については主要道路の優先や右左折時のコスト付加、さらに VICS などの渋滞予測情報に統計処理などを加え、慢性的に発生する渋滞への対応などがあげられる。そして、即応型探索についてはさらなる計算時間の短縮を考えている。現在の即応型探索手法は車近隣の狭いエリアに限定しているもののそのエリア全体を計算しているため、余分な計算時間が含まれる。そのため、目的地方向へと探索するようにヒューリスティック関数を導入するなどの計算時間短縮がこれからの課題である。

また、本手法はナビゲーションだけではなく、その拡張により、人の行動メカニズムと同様、即応的に反応しつつ熟考的に作戦を考えるという探索の実現が見込まれ、今後幅広い分野への適用が期待できる。

謝辞

本研究の遂行にあたって、議論の中で有益な助言をいただきました住友電工システムソリューション株式会社の鷲見公一様に心から感謝いたします。

参考文献

- [1] Yasushi Ando, Yoshiaki Fukazawa, Osamu Masutani, Hirotoishi Iwasaki, Shinichi Honiden, "Performance of Pheromone Model for Predicting Traffic Congestion", *the International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2006
- [2] Richard E. Korf, "Real-Time Heuristic Search", *Artificial Intelligence*, Vol.42, pp.189-211, 1990
- [3] 松原繁夫, 石田亨, "実時間探索に副目標生成機構を組み込んだ実時間プランニング", *人工知能学会誌*, Vol.12, No.1, pp.90-99, 1997.
- [4] 栗原聡, "動的で複雑な環境下での柔軟な行動選択のためのプランニング・学習に関する研究", 博士論文, 2000.
- [5] K. Nagel, Michael Schreckenberg, "A cellular automaton model for freeway traffic", *J.Physique I Paris*, 2:2221, 1992.
- [6] M. Rickert, P Wagner, "Parallel Real-time Implementation of Large-scale, Route-plan-driven Traffic Simulation", *International Journal of Modern Physics C7*, pp.133-153, 1996.