

道路交通網における最短経路情報提供法

淵澤 隆宏, 上田 徹, 高橋 道哉

1. まえがき

今日の自動車社会では、自動車本来の機能を妨げる様々な問題を抱えている。「自動車量の増加」という極めて単純な原因に基づき、交通渋滞、交通事故増加、さらには環境汚染にまで発展している。

この渋滞解消のため、現在ではカーナビゲーション・システム[1], [2]のマルチメディア化が急速に進展している。今日では、道路の渋滞状況までも考慮に入れた交通情報を提供してくれる会員制サービス ATIS が首都圏で開始されている。また ATIS に似た道路交通通信システム VICS[3], [4]も 2000 年には全国主要都市の一般道路までサービスを拡大する見通しである。

こうした背景を受けて、本研究では ATIS, VICS のようなシステムにおける最短経路情報提供サービスの有効性の検討を行う。とくに、最短経路情報提供サービスの普及率が増加した場合にも、そのサービスは果たして有効なのかを明らかにするために、最短経路情報を提供する車両割合が 100% という特別な場合について検討する。

最短経路情報提供の普及率が低い場合には、最短経路情報を受けることが可能である特定車両に着目して有効性の検討を行うことが一般的であったが、その普及率を 100% とした場合には、道路交通網全体の状況を様々な観点から検討する必要がある。普及率が 100% の場合には、1 本の最短経路のみの探索法[5]を用いると、その経路を全車両が選択してしまう危険性がある。したがって、交通流を 2 本に分散させる最短経路探索法[6]の有効性、および交通流を 2 本に分散させる場合の 2 経路提示割合設定などの検討を行う必

要がある。

なお、最短経路を求めるアルゴリズムとしては、Imai-Iri[7], Fredman-Tarjan[8], Goldfarb-Hao-Kai[9]などの方法があり、また最小コストフロー問題（最短経路問題はこの特殊ケース）としては Goldberg-Tarjan[10]の方法などの高速な算法がある。しかし、本論文では（C 言語による）最短経路を求める計算時間よりは（GPSS/H による）シミュレーション時間が問題であるため、よく知られた Dijkstra 法[5]および Suurballe[6]の方法（2 経路探索用）を用いた。

2. 道路交通シミュレータ構成概念

本章では使用した道路交通シミュレータの構成概念について述べる。本シミュレータは、ある程度の大きさを持つネットワーク型道路交通網（1 交差点モデルにとどまらないモデル）に対応できる必要がある。また、システム規模、シミュレーション実行時間も考慮して、車両 1 台 1 台の走行を細部にわたり再現するといったマイクロなレベルまでは模擬しないこととした。したがって微小等時間単位で各車両の走行（加速、減速、追従走行、信号判断走行）を処理する連続変化システムの作成は念頭から外した。結局、本システムの作成には、トランザクション（車両）の流れを中心に、事象（走行開始・終了、交差点進入等）の記述を行うことによってプログラム構成が可能な離散型シミュレーション支援システム GPSS/H[11], [12]を利用した。

本道路交通シミュレータにおける現実世界との主な相違点は以下の 3 点である。

- ① 車両の各道路内一定速度走行：各車両は各道路で決められた制限速度に従い一定速度走行をする。
- ② 交差点進入時の対向車に対する優先はない：現実世界の道路交通においては、交差点進入時に対向車との関係を考慮する必要がある。たとえば交差点で右折をする場合は、対向車線で交差点進入を試みる車両

ふちさわ たかひろ（現在、NEC）

うえだ とおる

たかはし みちや

成蹊大学 工学部経営工学科

〒180-8633 武蔵野市吉祥寺北町 3-3-1

受付 99.3.17 採択 00.9.8

が直進あるいは左折であれば、直ちに交差点へは進入できない。このように交差点進入時に優先順位、譲り合いが生じている。本シミュレータにおいては、システムの複雑化を避けるために優先順位、譲り合い等の概念は省くことにし、交差点に進入しようとする車両には、FIFO (First-In-First-Out) で交差点に進入させるようにした。すなわち先に道路の停止線へと辿り着いた方が先に交差点へ進入できることになる。

③ 信号機の黄色点灯除去：上述したように、交差点進入時に関して右折車両に対する対向車両の優先をなくしたことで、右折車両に黄色点灯時の交差点進入タイミングを与える必要性は消滅した。また、本シミュレータでは歩行者等は考慮しないので、黄色点灯自体の必要性がなくなる。したがって本シミュレータでは、信号機の黄色点灯を省くことにした。

車両の発生については待ち行列長を無限にしないための処理を行っている。指数分布にしたがう時間間隔で発生した車両は、最初の道路への進入を試みる。しかし、この道路が飽和状態、つまり渋滞していて1台の余裕容量もないときは、直ちにその車両を消滅させる。この処理を行わないと一旦渋滞に陥った網はその渋滞を解消できないこととなる。また、この処理により、同じ発生条件（負荷）に対しても、経路提示方法が異なると実際に網内に入る車両台数は異なることとなる。

3. シミュレーションの概要

3.1 シミュレーション対象

本研究で作成したシミュレーション対象道路交通網を図1に示す。道路数34本、交差点数6個で、各々の交差点の交差する進行方向に対して信号機が1つずつ配されている。

3.2 検討4モデルの特徴

道路交通状況に関する4モデルについて検討する。

モデル1：低負荷（それほど渋滞に陥っていない交通状況）

モデル2：中負荷（渋滞していないと思われる道路もあるが、大半の道路が渋滞状況）。上下線に関して対称となる交通状況

モデル3：中負荷。モデル2よりも下り線の負荷を増やし、上り線の負荷を極端に減らした上下線の交通状況が非対称のモデル

モデル4：重負荷。モデル3同様、上下線の交通状況は非対称

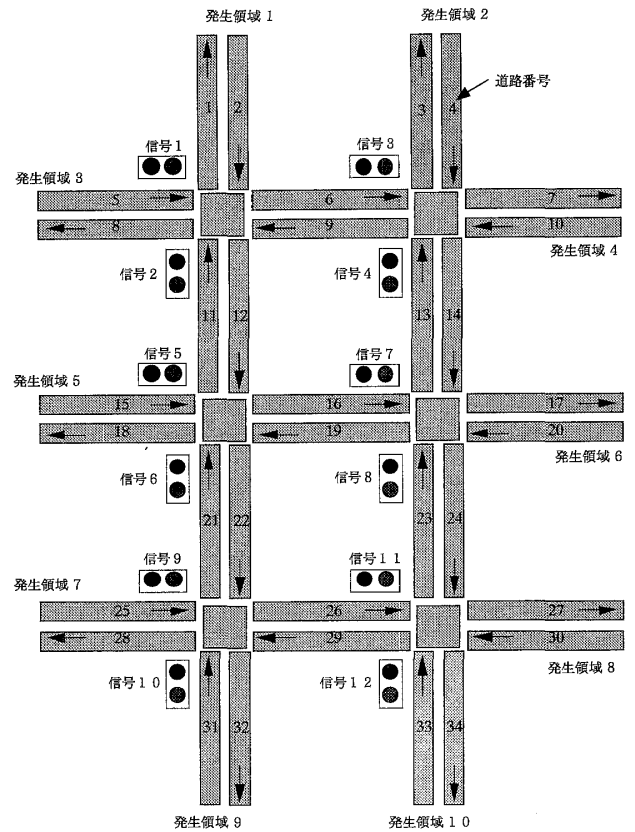


図1 シミュレーション対象道路交通網

表1 各モデルの車両発生間隔(秒)

発生領域	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
モデル1	15	15	30	35	30	30	30	30	15	15
モデル2	7	15	15	30	15	15	15	8	10	15
モデル3	5	7	15	30	15	15	15	35	75	75
モデル4	3	3	7	30	7	7	7	30	75	75

各モデルの平均車両発生間隔を表1に示す。

3.3 最短経路情報提供法

各車両に与える最短経路情報として次の(1)~(4)を考える。

(1) 道路距離による最短経路

各道路の通過に要する時間（所要時間）を交通量によらず一定としたときの最短経路

(2) 時間距離による最短経路

シミュレーションにより得られる各道路の平均所要時間を用いて求められる（交通量に依存する）最短経路

(3) 最短2経路のうち的一方のみ提示

ノードを道路に対応させ、道路が連結されていることをノードをアークで連結することによって表現し、Suurballeの方法[6]によってノードを両端以外には共有しない2経路の合計所要時間が最短なものを探る

る。それらのうち一方の経路のみ提示する。

(4) 時間距離の短さが1位, 2位の経路のうちの一
方のみ提示

単純に1番目に速い経路と2番目に速い経路を探索
し, そのうち一方の経路のみ提示する。

なお, いずれの方法でも車両が交差点の停止線に到
達した時点で最短経路を再探索している。

上記(3), (4)では, 非常に非効率な経路選択が生じて
しまう可能性がある。たとえばある車両は次の交差点
を左折すれば目的地に到着できるとする。しかし2経
路選択アルゴリズムの2番目の経路(遅い方)がこの
車両に与えられたとすると, 車両は次の交差点を左折
せずに別の経路で目的地を目指すこととなる。また(3)
で顕著に見られる例であるが, ある地点から目的地ま
での2経路が存在しない場合があり得る。これらを考
慮して, 本システムでは, すべての出発地からすべて
の目的地まで(同じ地点どうしは省く)の最短距離経
路の交差点通過回数を把握しておき, その回数に応じ
て2経路選択を適用するかどうかの決定を行なえるよ
うにした。本研究では交差点通過回数4回以上に対し
て2経路を探索することとした。

4. 実行結果

4.1 最短2経路提示割合の決定

最短経路情報(3), (4)で探索された2つの経路には当
然, 目的地までの所要時間が短い方と長い方がある。
そこで所要時間に依存した2経路割当てを考える。こ
こで車両への2経路の提示割合を単純に互いの所要時
間の逆数とはしない。所要時間に相当な差がある場合
は, 所要時間の短い方に割り振る車両の割合を増加さ
せることとし, 所要時間の2乗の逆数を取った比で2
経路の提示割合を与え, これを提示割合I(所要時間
依存提示割合)とよぶ。

提示割合Iと, 提示割合を7:3(II)または5:5
(III)に固定した場合の比較を行うため, 最短2経路
を探索する最短経路情報提供法(3)と(4)をモデル1に適
用し, 3つの提示割合の各々に対してシミュレーショ
ンを行った。

ここで3つの提示割合の有効性の比較には車両の目
的地到達所要時間を用いた。これはシミュレーション
実行中に目的地に到達した全車両の総所要時間を全台
数で割ったもの(平均)であり, 結果を表2に示す。

このシミュレーションの最短経路更新間隔は5分,
最短経路探索用の各道路所要時間集計時間は15分で

表2 目的値到達(平均)所要時間(秒)

提示割合	I	II (7:3)	III (5:5)
最短経路情報(3)	65.33	71.05	80.68
最短経路情報(4)	66.11	70.23	78.76

ある(詳細な検討は4.2節に示す)。表2から分かる
ように2経路選択割合を固定した場合は, 交通状況に
依存せず経路2(遅い方の経路)を選択させられてし
まう車両が存在するため, 車両の目的地到達時間の平
均値は長くなっていることが分かる。したがって本研
究では, 所要時間依存提示割合Iを適用することとし
た。

4.2 最短経路情報更新に関する設定

情報提供法(2)~(4)では一定間隔ごとに最短経路情報
を更新している。そのためにシミュレータとしては実
行時間の点では非効率ではあるが, 手順が簡単な以下
の方法をとっている。まず1回目の最短経路更新時刻
 $T1$ までのシミュレーションを行い, そこで得られた
各道路の通過に要した時間の平均(平均所要時間)を
C言語のプログラムに渡し, 最短経路 $P1$ を求め, こ
の情報 $P1$ を GPSS/H シミュレータに戻す。シミュ
レータでは2回目の経路更新時刻 $T2$ までのシミュレ
ーションを最初から実行し直し, 時刻 $T1$ で経路情報
を $P1$ に更新する。以下, 同様に r 回目の経路更新時
刻 T_r までのシミュレーションを最初から実行し直し,
時刻 T_i ($i=1, 2, \dots, r-1$) ごとに経路情報を P_i に
更新し, 時刻 T_r で最短経路 P_r を求める。このよ
うにしているため T_r で用いる各道路の平均所要時間の
集計開始は T_r から何分前にも設定できる。すなわ
ち, 経路更新間隔と各道路所要時間 R_k を求めるため
の集計時間 C とは独立に設定できる。なお, 時刻 T_i
で用いる R_k は, 時間 $(T_i - C, T_i]$ に道路 k を通過
した車両の平均所要時間である。

モデル1から3において, 最短経路更新間隔を2分,
5分, 8分, 10分, そして最短経路探索のための各道
路所要時間集計時間を5分から30分まで5分間隔の
計6通りとし, 両者すべての組み合わせを考えた。ま
たモデル1から3に対しては本研究で使用する4つの
最短経路探索方法を適用した。交通状況に依存した最
短経路の更新を行わない最短経路情報提供法(1)を適
用した場合の目的地到達平均時間を基準値1として, 他
の3つの情報提供法に対して, 上記した各々の設定の
下で得られた目的地到達平均時間を相対化する。そし
てモデルごと, 情報提供法ごとに平均した値を表3に

示す。

表3からは、経路更新間隔は短い方が効率的であることがわかる。その理由としては、最短経路更新間隔は短ければ短いほど早く交通状況の変化を察知できるということが挙げられる。

集計時間Cに関しては、あまり短くするとごく最近の交通状況だけで最短経路を判断してしまうことになる。例えばある時点までは渋滞を起こしていた道路が、最短経路として提示されなくなったために交通量が減少したときに、集計時間が短い場合は直ちにこの道路に多くの車両が送られる。しかしこの道路は、少し前までは渋滞していた道路なので、この道路の先はまだ交通量が多く、再び渋滞現象に陥る可能性は高いと考えられる。またこの道路は設定上、元々渋滞しやすい道路であったとも考えられる。したがって、ある程度長い時間にわたって情報を集計し、交通状況を判断した方が効率的であると考えられる。

一方、集計時間があまり長過ぎると、長い時間での平均値を用いるので、交通状況の急激な変化を読み取れなくなり、対応が遅れてしまうということが考えられる。

ここで表3からは、太枠で括られた部分が優れた設定であることが窺える。そこで以下の議論では、最も良い結果となっている最短経路更新間隔2分・各道路所要時間集計時間C=25とする。その場合の目的値到達平均所要時間を表4に示す。なお、情報提供法(3)に対して、{SPARCstation-20, CPU: hyperSPARC 150 MHz, メモリー: 96 MB, OS: Solalis 2.6}を用いてウォームアップ時間を=1時間、実シミュレーション時間を=2時間を実行した場合の計算機時間は2,519秒であった。(1)以外は同程度の時間がかかっている。

表3 経路更新間隔、集計時間と目的値到達所要時間

		最短経路更新間隔				
		2分	5分	8分	10分	平均
集計時間	5分	1.36	1.93	2.25	3.17	2.2
	10分	1.06	1.40	1.70	1.54	1.4
	15分	0.70	1.27	1.64	1.41	1.3
	20分	0.79	1.12	1.28	1.26	1.1
	25分	0.61	1.16	1.04	1.18	1.00
	30分	2.01	2.69	2.19	2.28	2.3
	平均	1.09	1.59	1.68	1.81	

4.3 異なる交通量特性に応じた考察

モデル2とモデル3では、その交通量は中負荷としているが、上下線対称・非対称とその状況に違いがある。そこで、モデル2とモデル3について、最短経路更新間隔・集計時間ごとの結果をまとめたものを表5に示す。つまり、表5での数値は表4と異なり(「総」を付けて区別)、更新間隔・集計時間ごとに得られた結果を単純に平均したものである。

モデル2では2本の経路に車両交通流を分散させた方が非効率であることが窺える。これはモデル2の交通量が上下線に関して対称であることにより、交通流を2本の経路に分散させた場合には、循環的飽和状態を生み出す可能性が高く、交通量が増加するにしたがい循環的飽和状態に陥り易いためであると考えられる。表5から分かるように、上下線非対称であるモデル3では、交通流を2本に分散させることの有効性が窺え、非対称である方が循環的飽和状態になりにくいと考えられる。

なお循環的飽和状態とは、その循環に関わる各道路の先頭車両がすべて右折を試みる、または左折を試みるようになり、その循環部分の交通が完全に止まってしまう状態である。たとえば図1の道路6-14-19-11の循環において道路14は下りの、道路11は上りの輻輳により当該循環内の車両が進めない状況が生じることである。本研究に関連して行ったシミュレーションでも、この現象に陥る状態がしばしば見受けられ、一旦この状態に陥ってしまうと、その後のシミュレーションが不可能となってしまふ。そこで、本シミュレータにおいてはこの現象の回避のために、各道路の先頭(停止線位置)に同一車両が10分間居続けた場合、他の進入できる道路を探索して迂回するように設定した。

表4 目的値到達平均所要時間

情報提供法	(1)	(2)	(3)	(4)
モデル1	87.6	60.7	65.5	65.7
モデル2	171.0	79.9	74.6	76.2
モデル3	181.1	126.6	102.7	124.3
モデル4	192.6	405.3	179.6	336.2

表5 目的値到達「総」平均所要時間

情報提供法	(2)	(3)	(4)
モデル2	482.5	656.0	894.1
モデル3	201.1	137.4	205.8

4.4 モデルごとの実行結果

再び表4に基づき考察する。

モデル1は交通量低負荷であるにも拘らず、情報提供法(1)よりも他の3つの情報提供法が平均所要時間を減少させていることが分かる。それら3つの中では、若干ではあるが情報提供法(2)が最も所要時間が短い。これは交通量がそれほど多くないため、2経路を探索する情報提供法の場合には、少し遠回りする車両が存在するためであると考えられる。

モデル2では道路交通状況に依存した経路情報提供の有効性が目立つ。また、経路情報更新を行う3つの情報提供法での比較では、2本の経路を探索する情報提供法(2)、(3)の方が所要時間が若干短いことが分かる。これは、低負荷の場合とは異なり、1本の経路では車両をさばききれず、車両の流れを2本に分散させる方が有効であることを示している。

モデル3でも道路交通状況に依存した経路情報提供が有効であることが分かる。また、交通量が上下線対称であるモデル2よりもさらに上下線非対称であるモデル3の方が、1本の経路を探索する場合に比べて2本の経路を検索する方法の有効性が高いことが示されている。

他のモデルとは異なり、モデル4では、情報提供法(2)(4)は、(1)よりも大幅に効率が悪い。これは交通量が重負荷である場合に、100%全車両に最短経路情報を提供し、車両の経路を操作することの危険性を示していると考えられる。一方、情報提供法(3)は重負荷においても有効であることが認められる。これは最短経路情報を提供する際、交通流を2本に、しかもその2本の経路を完全に分散させることの有効性を示している。よって以下では、表6の実行結果を元にして情報提供法(3)を中心に考察する。

平均道路当り所要時間(道路に入ってから出るまでの平均)についても、目的地到達時間と同様の傾向を示している。道路占有率の比較では、情報提供法(1)より(3)を適用した場合に占有率が増加している。また、交差点進入時の待ち行列においても、(1)より(3)を適用

した場合の方がその台数は増えている。

ここで網内の負荷を比較するために網内への車両の流入台数を見てみると、情報提供法(1)より(3)を適用した場合に流入台数は増えている。

つまり外見上は情報提供法(3)を適用した方が交通状況は混んでいるように見えるが、それは扱っている車両台数が多いからである。また、平均目的地到達時間、平均道路所要時間では、若干ではあるが情報提供法(3)を適用した場合に、その値が減少している。

したがって、情報提供法(3)は、(1)と比較して、道路を効率良く利用できる最短経路情報提供法であると言える。また効率良く道路を利用しているため、車両の流入量で800台以上(情報提供法(1)に比べ約21%増)も車両を多く受け入れることが可能となったと言える。これらの結果より、情報提供法(3)は交通量重負荷の場合においても有効であると言える。

5. むすび

交通量が低負荷(モデル1)の場合、最短経路情報提供法として、目的地までの所要時間が最小となる1本の経路のみを提示する情報提供法(1)が、2本の経路に交通流を分散させる経路情報提供法に比べ、効率的な最短経路情報提供法であったと言える。

交通量が中負荷(モデル2・モデル3)では、目的地までの経路を1本に絞ることが、2本に分散させるより非効率であるという結果を得た。更に交通量が上下線で非対称である場合は、交通流を2本に分散させても循環的な渋滞現象が発生せず、対称である場合よりもその傾向が顕著であった。

交通量が重負荷(モデル4)の場合には、情報提供法(2)、(4)は効率が悪いことが分かった。ここで、情報提供法(3)のみの有効性を確認できたことで、交通流を2本、しかも完全に分散させることが有効であることが分かった。しかし、情報提供法(2)から分かるように、100%全車両を操作できる状況下で、経路を1本に絞ることの危険性も明らかとなった。

表2、表3に示した最短経路更新のタイミングに関する様々な設定から導かれる結果を参照すると、僅かな設定の違いでもとても非効率な状況を生み出す危険性があることも分かった。すなわち、100%全車両の走行を情報により操作することの有効性ととも、その難しさ、危険性も示せた。

しかし、2経路に分散させる場合は当然、2経路の所要時間に差があり、遅い方を提示されたドライバに

表6 モデル4における情報提供法と各種指標

情報提供法	(1)	(2)	(3)	(4)
道路所要時間	51.0	123.9	46.2	114.0
道路占有率	0.252	0.430	0.287	0.429
交差点待ち台数	3.87	7.02	5.05	6.97
網内車両流入台数	4025	2076	4887	2493

不満が生じる可能性がある。つまり、全体として有効としても個々のドライバーにとっては最適経路となっていない。しかし、最短経路を求めるための各道路所要時間自身が平均であり、現実にはその瞬間瞬間の最適な経路は誰も知りえないと考えると、平均の意味で有効となる情報提供法(3)を推奨することができる。と考える。

本研究では全車両は情報に従い走行することとしているが、現実世界でこういった従順な行動は望めないことなども考えなければならない。

また、最短経路情報提供により交通量の少ない住宅地域、それぞれの地域の人々が有効に利用していた裏道などへ多くの車両が流れ込む可能性も問題点として挙げておく。

本研究はシミュレーションによるものであり、経路更新間隔や集計間隔の検討には最も適していると考えているが、経路情報提供法の比較には待ち行列網モデルや数理計画法を用いた検討も考えられる。それらの方法ならば様々なパラメータの値での検討が容易に行えと考えられ、今後はシミュレーションとそれらの方法を組み合わせた検討を行う必要がある。

参考文献

[1] 「マルチメディア基礎図鑑'95」, 毎日新聞社, 1995.

- [2] 会田肇: 「カーナビの使い方」, 日本実業出版社, 1995.
- [3] 「VICS 公開デモンストレーション実験ガイド」, 道路交通情報通信システム推進協議会, 1998.
- [4] 「VICS パンフレット」, 道路交通情報通信システムセンター, 1998.
- [5] E. W. Dijkstra: “A Note on Two Problems in Connection with Graphs”, *Numerische Mathematik*, **1**, 1956.
- [6] J. W. Suurballe: “Disjoint Paths in a Network”, *Networks*, **4**, 1974.
- [7] H. Imai and M. Iri: “Practical Efficiencies of Existing Shortest Path Algorithms and a New Bucket Algorithm”, *J. of ORSJ*, **27**, 1984.
- [8] M. L. Fredman and R. E. Tarjan: “Fibonacci Heaps and Their Uses in Improved Network Optimization Algorithms”, *J. of ACM*, **34**, 1987.
- [9] D. Goldfarb, J. Hao and S. Kai: “Efficient Shortest Path Simplex Algorithms”, *Operations Research*, **38**, 1990.
- [10] A. V. Goldberg and R. E. Tarjan: “A New Approach to the Maximum Flow Problem”, *J. of ACM*, **35**, 1988.
- [11] J. O. Henriksen and R. C. Crain: “GPSS/H REFERENCE MANUAL”, 1989.
- [12] J. Banks, J. S. Carson II and J. N. Sy: “Getting Started with GPSS/H” 1995.