

道路交通制御におけるシミュレーション技法

Simulation Methods in Road Traffic Control

高 羽 禎 雄*

Sadao TAKABA

道路交通制御や交通情報提供などの機能の高度化をはかるための交通流シミュレーションの手法として、画像計測システムから得られるデータにより、微視的なモデルを用いてシミュレーションを行うシステムと応用例、車両の走行軌跡に相当する通過時刻ベクトルをシミュレーションで求め、動的制御に応用する手法、観測結果とシミュレーション結果を照合して交通流異常を検出する手法などを述べる。

1. ま え が き

コンピュータを用いる街路や高速道路の交通管制システムが出現してから約 20 年が経過し、世界の多くの都市で交通信号制御や高速道路の流入制御、情報提供などに効果を発揮している。

この間、とくにわが国ではモータリゼーションの進展が著しく、限られた道路網でこれに対処するために、交通管制の機能の高度化が必要とされている。その重要な課題として渋滞時の交通信号制御、動的な流入制御や経路制御、事故や車両故障による異常事象の検出、旅行時間の予測に基づく情報提供などが挙げられている。

このような要請に応えるための有力な手段として、交通流シミュレーションを活用して交通制御手法の評価や最適パラメータの選択を行ったり、観測結果による交通状況の現在値に基づいてリアルタイムにシミュレーションを実行し、将来の交通状況を予測したりすることが考えられる¹⁾。たとえば、本所の越らによって提案されたインプットアウトプット法²⁾に基づくシミュレーション・プログラムは、1985 年 12 月から稼動している首都高速道路の新しい交通管制システムにおいて交通状況予測のために活用されている。他の交通管制システムでも、いろいろな形で交通流シミュレーションが導入されている。

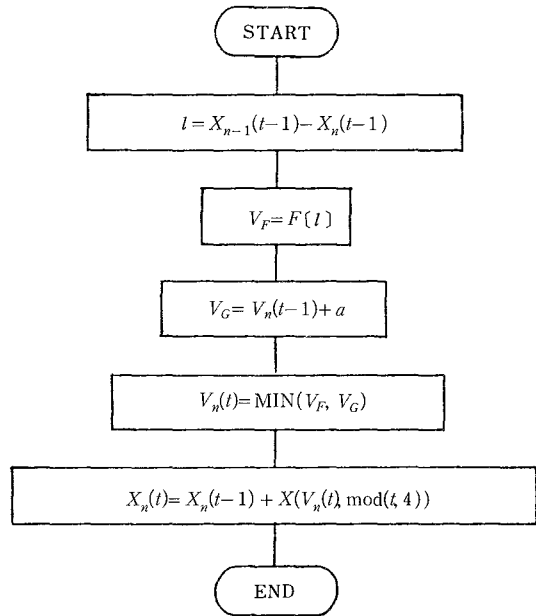
筆者らは、1971 年から 1976 年にわたって実施された本所のプロジェクト研究の一環として、微視的モデルに基づくシミュレーションを高速に実行する専用ハードウェアシミュレータを開発し³⁾、これを運用して信号制御や経路誘導制御に関する数多くの基礎的知見を得ている⁴⁾⁵⁾。さらに、観測データに基づいてリアルタイムにシミュレーションを実行するシステム⁶⁾や、新しいシミュ

レーション技法⁷⁾の開発をすすめて、動的な流入制御や配分制御への応用⁷⁾、街路網における事故検出への応用⁸⁾などを試みているので、ご紹介する。

2. 微視的モデルによる交通流のリアルタイムシミュレーション

2.1 シミュレーションモデル

個々の車両の属性や行動を個別に取り扱う微視的モデル



$X_n(t)$ 時刻 t における車両の位置
 $X_{n-1}(t)$ 時刻 t における先行車両の位置
 $V_n(t)$ 時刻 t における車両の速度

図 1 車両走行の微視的モデル

*東京大学生産技術研究所 第3部

ルは、車群や流体として交通流を取り扱う巨視的モデルに比べて、シミュレーションのための演算時間が大きく、大規模な道路網を対象として制御手法の評価やパラメータの選択を行ったり、交通状況の予測をリアルタイムに行ったりすることは、従来あまり用いられていなかった。筆者らが開発した専用ハードウェアシミュレータ TRN *SIM II では、個々の車両に車種、目的地などの属性を与えると同時に、車両の走行は追従理論に基づくものとして、図 1 に示すモデルを用いた⁵⁾。すなわち、時刻 t における車両の速度は、時刻 $t-1$ における車頭間隔 l から関数テーブルによって希望速度 V_F を求め、最大加速度 a の制限の下でこれを決定する。距離、時間、速度の単位は、演算の簡単化と高速化をはかるため、それぞれ 5 m, 1 sec, 4.5 km/h に定めている。1 sec 間の車両の移動量 X は、これらの単位間の関係を満足させるため、4 sec を周期として調整する。 l と V_F の関係を定めるテーブルは、巨視的な交通量-速度 ($Q-K$) 特性から与えることとし、特に高密度状態で実測値とよく合致する Greenberg のモデルが取り上げられた。

2.2 高速道路交通流のシミュレーション⁵⁾¹⁰⁾

高速道路の一部として、分合流部を含まない道路区間を対象として、ハードウェア・シミュレータによるシミュレーションを行い、その結果を各車両の時間-距離図上の走行軌跡として求めた。

出口がボトルネックとなっている一様な道路区間で、流入交通量に応じて渋滞が波及したり解消したりする状況、 $Q-K$ 特性の異なる道路区間が接続され、ふたつのボトルネックがある場合に、2種類の渋滞流が重畳して波及する状況、流入交通量が時間的に変化した場合に、これらに対応して生ずる密度の異なった領域の境界が伝搬する状況などの種々の状況が、実際の現象に適合する巨視的な走行特性との間に矛盾なく表現された。さらに、流入交通量が増加した場合には、密度が連続的に増加してゆく過渡的な状態が生ずることが詳細に表現できることもわかった。

高速道路においてしばしば生じ、事故等の突発事象を検出するうえで問題となる疎密波の伝搬、すなわち、道路が高密度状態にあるとき、いったん生じた密度の高い部分と低い部分とが、ほぼ一様な速度で上流側に伝わる現象についても、一様な道路区間に生じた渋滞流の中で特定の車両を停止あるいは低速走行させるシミュレーションを行い、発生した疎密波が時速 18 km/h で上流側に伝搬する状況が表現された。また、高速道路の交通状況を航空写真により実測し、密度の時間的・空間的分布を算出したデータ (首都高速道路 3 号線を対象として得られたもの) を用い、図 2 に示すように、時刻 0 sec における 14 区間 (1 区間 100 m) の各区間ごとの車両存在台数の観測値を初期値としてシミュレーションを行い、車

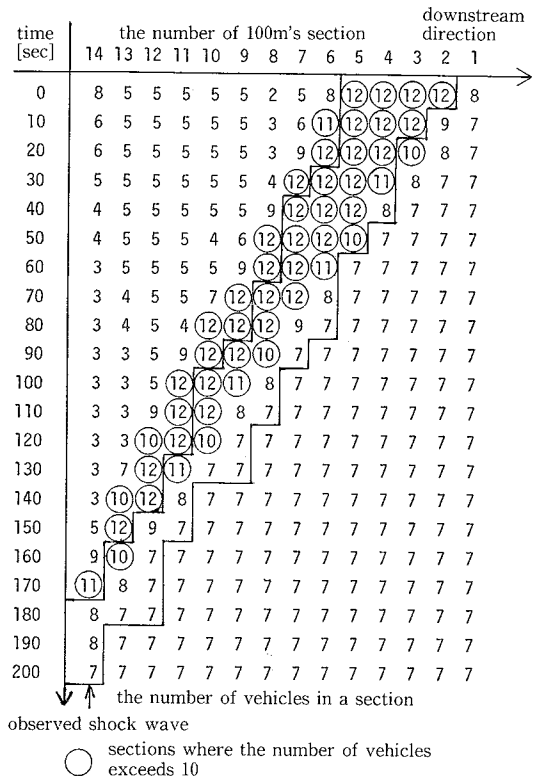


図2 観測データを初期値とする疎密波伝搬のシミュレーション

両存在台数の変化を 10 sec ごとに求めた。同図中に、シミュレーションで得られた 1 区間の車両存在台数が 10 台を越える高密度の部分をも印で示し、実測値でこれに対応する部分を階段状の境界線であわせて示した。疎密波の伝搬速度は、シミュレーションの結果のほうがやや大きく、約 24 km/h となっているが、その伝搬の様相は実際の現象とよく一致している。

以上のように、ハードウェアシミュレータ TRN *SIM II で用いられたモデルは、高速道路交通流にみられる交通管制上重要な諸現象を実際と適合した形に表現でき、またハードウェアの特徴を活かして、道路リンク総延長 50 km までの道路網の車両走行シミュレーションを、その規模にかかわらず一定の短時間 (実時間の 1/33) で実行することが示された。

2.3 観測データに基づくリアルタイムシミュレーションシステム⁶⁾¹⁰⁾

現在の交通管制システムでは、道路上に設置された車両感知器によって、感知領域における個々の車両の存否が 2 値の信号として検出され、これを基に車両の速度、さらには巨視的なパラメータである交通量や時間占有率が算出されて、交通状況を示す量として用いられている。

ここでは、個々の車両についての観測データをシミュレーションの入力として、前述の微視的モデルによるシミュレーションを行うため、車両感知器からの出力感知パルス処理し、データ形式を変換するシステム、ならびに ITV カメラから得られる交通流画像からデータを抽出・変換するシステムが用いられた。実験の便宜上、車両感知器データあるいは ITV 画像は、それぞれデータレコーダあるいはビデオレコーダにいったん収録したものが用いられた。また、前述の TRN*SIM II で用いられた微視的モデルは、ミニコンピュータにインプリメントされた。

図3は後者の場合、すなわち、画像計測データを用いるリアルタイムシミュレーションシステムの構成を示す。このシステムでは、画像情報抽出変換装置は、テレビの画面上に複数個のサンプル点を設定し、輝度信号を各フレームごとに抽出・数値化し、転送する。車両データ形成装置はこれらの動作を制御するとともに、転送された輝度情報に基づいて車両の存否を表示する指標 P を作成し、1 sec 分のデータをまとめてミニコンピュータへ転送する。ミニコンピュータでは、道路レーンにそって近接して設定された2個のサンプル点のデータから、車両の流入時刻および速度を算出し、これを流入条件としてシミュレーションを実行する。

2.4 街路交通流のシミュレーション⁶⁾¹⁰⁾

図3に示したシステムを用いて、街路の単一リンクについてリアルタイムシミュレーションの実験を行った。対象とする道路は、片側4車線の街路(青山通り・青山一丁目付近)において、交差点停止線を下流端とする区間長70mの一車線のリンクである。

シミュレーションに際しては、車線変更は考えず、交差点信号機の影響は、信号が青のときには停止線より80m以内には先行車両が存在せず、自由走行で流出でき、信号が赤のときには停止線直前に仮想的な停止車両があって、これに追従して停止するものとした。

実験対象リンクを撮影したテレビ画像については、車

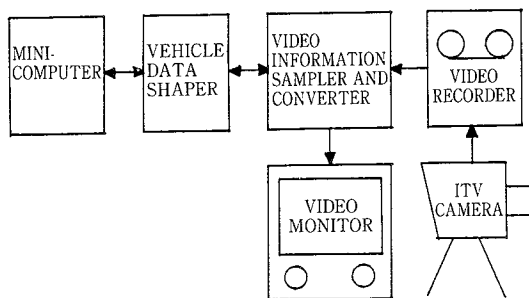
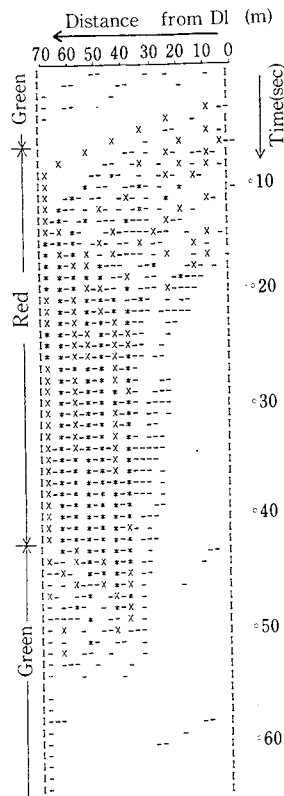


図3 画像計測データを用いる交通流のリアルタイムシミュレーションシステム

線境界線をめやすとして、停止線より上流に向けて約2.5mごとに29のサンプル点を設定し、リアルタイムにデータを抽出し、車両走行の実測結果を得た。また、上流側の2サンプル点のデータを用い、車両の流入時刻と速度を定めてシミュレーションを行った。

図4は、実測結果とシミュレーション結果を対照して示したもので、これから次のことがわかる。

- 1) 信号交差点への車両の流入、赤信号時の車両の停止・待ち合わせ、青信号時の車両の発進・走行などの状況が、実際の状況とほぼ同様にシミュレーションによって再現される。
- 2) シミュレーションでは車線変更を考慮していないため、実測結果との間に車両台数2台の誤差を生ずる。
- 3) シミュレーションにおける車両走行のモデルが簡単であるため、前方の赤信号や待ち行列を見越した車両の行動が十分表現されていない。



* 実測・シミュレーション双方
 X シミュレーションのみ
 - 実測のみ
 において車両が存在する

図4 実測結果とシミュレーション結果の対照

シミュレーションの精度をさらに向上させるため、停止線上流 20 m の地点でのデータを用い、流入車両のデータを修正するなど、ネットワークとしてのシミュレーションを効果的に行う技法も考案し、良好な結果を得ている。

3. 通過時刻ベクトルの手法による巨視的 交通流シミュレーション⁷⁾¹²⁾

3.1 通過時刻ベクトル

交通流の動的制御を行うには、交通流の非正常性や車両の走行時間を考慮し、交通流を動フローとして取り扱うことが必要であり、一般に大規模で複雑な計算を必要とする。ここでは、道路網を構成する各リンクの旅行時間を状態量とみなし、これを表現するものとして通過時刻ベクトルを定義し、これを用い車両の走行状況に応じてシミュレーションを進行させることにより、演算の簡単化をはかる方法を提案した。

通過時刻ベクトルは、道路網のノード i, j を結ぶリンクの旅行時間を $\tau_{ij} = t^j - t^i$ (t^i, t^j はノード i, j の通過時刻) とするとき、ひとつのノード r の通過時刻 t^r を与え、すべてのノードの通過時刻は τ_{ij} を用いて順次定め、これらの集合として、次の通過時刻ベクトル t を定義する。

$$t = (t^1, t^2, \dots, t^m) \quad (1)$$

道路網中に閉路が存在する場合には、これを仮想的に切断してふたつのノードを設けるなどの方法を取る。

通過時刻が一意的に定まる場合には、図 5 に示すように、 t は道路網中の車両の走行軌跡と対応し、非正常的に変動する旅行時間を道路網全体にわたって状態として表現することができる。また、 t を用いることによって先行車両の走行軌跡から後続車両の走行軌跡を求めてゆくこ

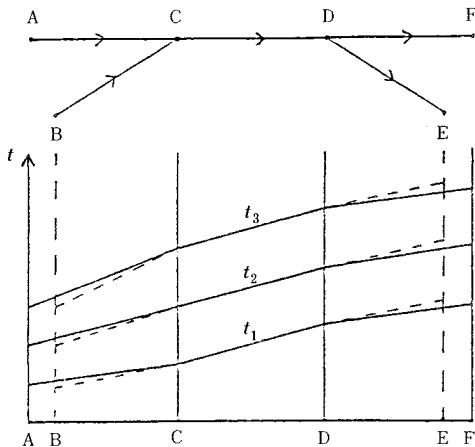


図 5 時間—距離図に示された通過時刻ベクトル

とができる。

道路時刻ベクトル t の時間的推移は、次式のように表現することができる。

$$t + \Delta t = F(t, f(t)) \quad (2)$$

ここで、 $f(t)$ は通過時刻 t に各ノードに流入する交通量であり、 F は道路網の形状と車両の走行特性から定まる関数である。

(2)式は f を入力、 t を状態とする状態方程式とみなすことができる。この式を用いて交通制御システムにおける制御変数の最適化をはかる方法として、状態変数 t_k が与えられたときに、制御量を仮定して(2)式から $t_k + \Delta t$ を求め、これを評価して制御変数を修正し、その最適値とそのときの Δt を定め、次の状態変数 t_{k+1} を求める。

(2)式に基づいて t と $f(t)$ から $t + \Delta t$ を求めるのは、巨視的交通流モデルを用いるシミュレーションによるのが適当である。このシミュレーションは、通常行われるように、道路網全体にわたって時間を同時に進行させる方法と比べて、動的制御との整合性がよく、最適制御量を求めるための演算を簡単化することができる。

3.2 通過時刻ベクトル決定のためのシミュレーション

高速道路のように車の流れが比較的単純な場合を対象として、次の考え方でシミュレーションモデルを作成した。

- 1) 道路網中には閉路が存在しないものとし、流入口、流出口、分合流部、ボトルネックなどをノードに選んで、その交通容量 C を与える。また、ノード間を結ぶリンクには交通量—速度 ($Q-V$) 特性を与える。
- 2) リンク旅行時間は $Q-V$ 特性で定まる基本旅行時間と、下流端ノードの交通定量で定まる通過所要時間に基づいて求められるものとする。
- 3) 各流入口には流入経路交通量の時間関数を与える。その変化はシミュレーションにおける時間の刻みに対してゆるやかであるとする。

通過時刻の演算としては次の 4 種類を考える。

- a) 単純リンクの演算 前記 2) のモデルに従い、両要因から定まる旅行時間のうち、大となるほうの値を取り、下流側ノードの通過時刻を定める。
- b) 合流演算 各流入路の需要交通量に基づいて、それぞれの合流可能交通量が定まるものとし、その比率で合流が行われるとして各流入路からの流入交通量と上流側ノードでの通過時刻を求め、これから合流点の通過時刻を求める。
- c) 分岐演算 分岐点および下流側各リンクの交通容量に基づいて、分岐点の通過所要時間を求め、a) と同様に各要因から定まる旅行時間のうち、最大となるものから、分岐点の通過時刻を求める。

d) 下流側からの修正演算 リンク全体に渋滞が及ぶ場合には、 $Q-V$ 特性から渋滞流に対する旅行時間を求め、上流側ノードの通過時刻を修正する。

演算の実行順序としては、各流入口を準基準ノード、そのうちのひとつを基準ノードとして上記の演算 a), b) を実行し、c) では基準ノードの通過時刻を固定して、その他の準基準ノードの通過時刻を変更する。すべてのノードの通過時刻が求まったのち、演算 d) を行う。

このモデルによるシミュレーションの妥当性の検証としては、2 で述べた微視的モデルが実測結果との照合が行われていることを利用して、流出口をボトルネックと

する区間長 750 m の一様な道路リンクを想定して、両者によるシミュレーションの結果を比較し、渋滞状況の変動に対する通過時刻の推移がほぼ一致することを確認した。

3.3 動的交通流制御への適用

このシミュレーション手法の動的交通流制御への適用

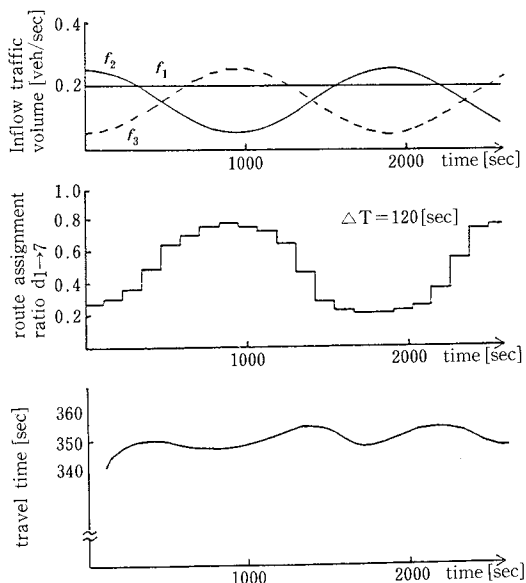


図6 二分岐道路網における経路配分制御

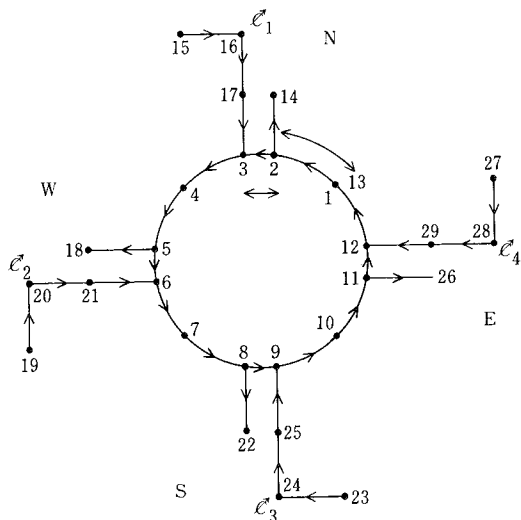
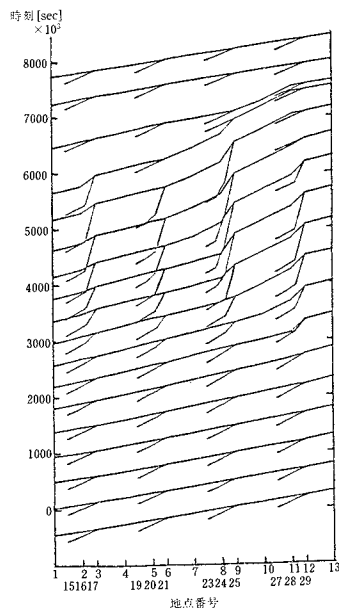
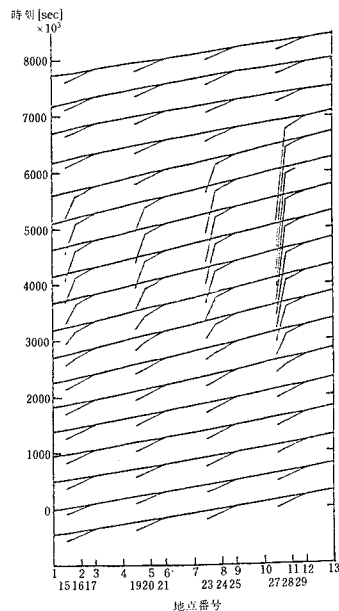


図7 環状道路網のモデル



(a) 無制御の場合



(b) 動的制御の場合

図8 環状道路網における流入制御

例として、次のふたつの場合を試みた。

(1) 2分岐道路網の動的配分制御

地点 A から地点 B への 2 分岐道路網があって、流入交通量が一定値 f_1 であるのに対して、それぞれの分岐路の途中に、既知の変動する交通量 f_2 および f_3 が流入する場合を想定し、ふたつの経路への f_1 の配分を、両経路の旅行時間を等しくする基準（等時間原則）に基づいて行った。図 6 はその結果を示す。旅行時間の変動が小さく、配分制御の効果が顕著であることが示されている。

(2) 環状道路網の流入制御

都市高速道路の簡単なモデルとして、図 7 に示すように、一方向の環状線と双方向 4 本の放射線をもつ道路網を想定し、 $C_1 \sim C_4$ の 4 地点における動的流入制御によって、環状線の渋滞の波及を抑制し、総旅行時間を減少させる制御手法について検討した。通過時刻ベクトルを用いるシミュレーションにおいては、環状線の一点（ノード 1）を切断して、同一地点に流出口（ノード 13）を設けた。合流点での放射線からの需要交通量が合流可能交通量を上まわらないように流入制御を行うと、図 8 に示すように無制御の場合に比して環状線での渋滞が解消し、流入制限による待時間を加えても、総旅行時間が試算例では 5.2%あるいは 9.5%減少することが示された。

4. 街路網における交通流異常検出のためのリアルタイムシミュレータ⁹⁾⁴⁾¹¹⁾

4.1 交通流異常検出システム

道路における車両の事故や故障その他によって生ずる交通流異常（いわゆる突発渋滞）を早期に検出して対策を講ずることは、交通管理においてきわめて重要であり、高速道路については各方面で検討が行われているが、街路についてはほとんど行われていない。その理由として、街路はネットワークとしての形状が複雑であるばかりでなく、信号機によって車の流れが断続的になり、駐停車

車両や歩行者の影響があるなど、交通流異常の検出を困難にする要因が多いこと、また検出後の対策が容易でなく、それに見合う効果が疑問視されることなどが挙げられる。ここでは、今後の交通情報提供手段の発達に応じて、その重要性が高まることを考慮し、リアルタイムシミュレーションによる予測を取り入れた交通流異常検出システムを提案する。

このシステムでは、対象道路網をいくつかのサブエリアに分割し、ひとつのサブエリアに対してひとつのプロセサを割当て、各プロセサは単一の原因による交通流異常を検出するとともに、その発生位置の同定を行うものとする。

検出の方法としては、信号一周期程度をひとつのタイムスロットとして、交通流パラメータ（たとえば各リンクの交通量）を実測し、一方、数タイムスロットをひとつのサイクルタイムとして予測シミュレーションを行って、交通流パラメータの実測値と予測値を比較する。平常時には両者がほぼ一致し、一方、交通流異常が発生すると、予測値ではパラメータの変化が考慮されないため、両者の間に差異を生ずることを検出する。

図 9 は、このような交通流異常検出システムの構成を示す。ここで $X(k)$ は第 k タイムスロットにおける各リンクの交通量、 $Y(k)$ および $\hat{Y}(k)$ は各リンクの待ち合わせ車台数の実測値と予測値である。

交通流異常検出アルゴリズムのうち、STEP-1 では、リンク l についての差 $DEF(l) = Y_l(k) - \hat{Y}_l(k)$ が、正の最大値および負の最小値に対して、それぞれ WT_1, WT_2 ($0 \leq WT_1, WT_2 > 1$) 以上の割合にあるリンクの集合 P, Q を求め、リンク l の直接の上下流リンクなど近接性の度合に応じた重みづけをしてスコア $T_l(k)$ を求める。STEP-2 では、第 k タイムスロットでのスコアが第 1 位から第 3 位迄のリンクにそれぞれ 1, 1/2, 1/3 の重みを

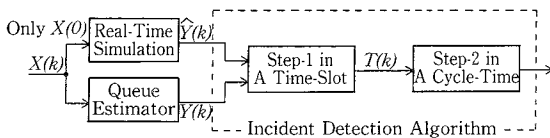


図 9 交通流異常検出システムの構成

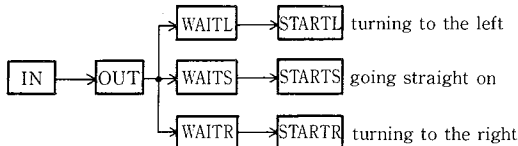


図 10 単一リンクのシミュレーションモデル

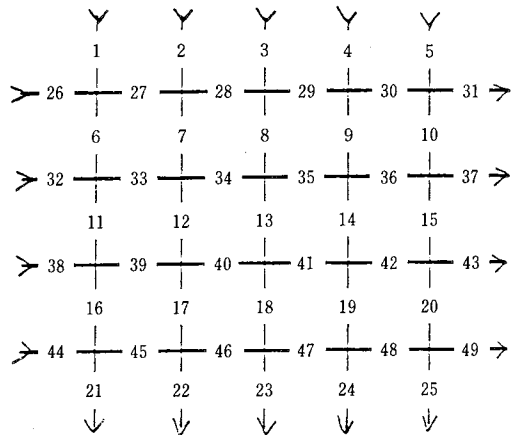


図 11 検出対象の単方向ネットワーク

表1 交通流異常検出の適中率
—単方向ネットワークの場合

流入交通量	上流側事故	下流側事故
15 veh/min	90% (392 sec)	100% (510 sec)
10 veh/min	75% (416 sec)	70% (645 sec)

* ()内は平均検出遅れ時間

表2 交通流異常検出の適中率
—双方向ネットワークの場合

流入交通量	入口側事故	出口側事故
15 veh/min	100% (443 sec)	86% (608 sec)
10 veh/min	93% (698 sec)	75% (950 sec)

* ()内は平均検出遅れ時間

与え、これを各サイクルタイムの開始時点から累積した値について閾値判断し、事故検出とリンクの同定を行う。

4.2 シミュレーション

図10は、ここで各道路リンクに対して用いたシミュレーションモデルを示す。流入口INから流入した車両は、各方向別の待行列WAITS, WAITL, およびWAITRの和の分だけ短くなった道路を一定の速度Vで走行し、指定された右左折率に応じてそれぞれの待行列に加わる。さらに、信号機の動作条件と道路の交通容量の制限の下で待行列から発進し、下流側のリンクに流入する。STARTS, STARTL, STARTRは、各タイプステップごとの発進車両台数を示す、ひとつのタイムステップは5 sec程度とする。

交通流異常とそれによる渋滞は次のように扱われる。

- 1) 交通流異常により、リンクの交通容量は、その上流端または下流端で0となる。
- 2) 下流側リンクが完全に渋滞すると、車両の流入は禁止され、上流側で待ち合わせる。待ち合わせは方向別に行われ、他の方向への車両の流出には影響しないものとする。

4.3 アルゴリズムの評価

アルゴリズムの評価のために、図11に示す20ノード、49リンクの単方向ネットワークを対象として、中央のリンク13において上流側、下流側の2種類の事故を考え、検出実験を行った。ここでは、図9を模擬し、異常交通流を実測する部分についてもシミュレーションを適用するとともに、計測誤差などを表現するため、正規分布に従う乱数を用いた。表1は事故発生リンクの適中率と検出遅れ時間を示す。流入交通量が少ないと事故の影響が小さく、適中率が下がり、下流側事故では事故発生リンク中を渋滞が波及する分だけ検出遅れ時間が大となる。図11と同様の形状の双方向ネットワークについて、検出実験を行い、同様の結果を得たものを表2に示す。

5. む す び

道路交通管制の機能の高度化をはかるため、交通流シミュレーション、とくに交通流の実測データに基づくリアルタイムシミュレーションを行うシステムと、動的交通流制御や交通流異常検出などへの応用について、筆者らが開発した技法をご紹介した。

もとより研究室レベルの実験的試みではあるが、筆者が各種の交通管制システムの開発に参画した経験を踏まえ、かつ実交通の観測データを用いた研究であり、実用レベルの試みへの展開をはかることが期待される。

(1986年5月20日受理)

参 考 文 献

- 1) 池之上慶一郎, 高羽禎雄: 道路交通管制, 日本シミュレーション学会第5回研究発表会資料, p. 127~132, 1984, 11
- 2) 交通工学研究会: 交通管制における交通状況予測手法に関する研究, 1971
- 3) 高羽禎雄, 浜田喬, 谷口忠勝, 兼子隆, 藤田一彦: 交通流シミュレーション・システムTRN*SIM II, 生産研究, 25, 2, p. 61~64, 1973, 2
- 4) 高羽禎雄, 浜田喬, 田代文之助, 谷口忠勝, 兼子隆, 藤田一彦, 上村務: 交通制御方策検討のための自動車交通流のシミュレーション, 生産研究, 26, 11, p. 460~466, 1974, 11
- 5) 高羽禎雄, 小石尚文: 高速道路交通流の実時間予測シミュレーションについて, 電子通信学会技術研究報告, SANE 79-43, p. 19~28, 1980, 2
- 6) 矢野秀行, 高羽禎雄: 観測データに基づく交通流のリアルタイムシミュレーション, 同上, SANE 82-32, p. 9~16, 1982, 11
- 7) 新井正伸, 高羽禎雄: 通過時刻ベクトルの手法を用いた動的交通流制御, 同上, SANE 80-44, p. 33~40, 1981, 2
- 8) 折田聡, 高羽禎雄: リアルタイムシミュレーションによる街路網の事故検出手法, 同上, SANE 81-32, p. 17~24, 1981, 11
- 9) 折田聡, 高羽禎雄: 街路網の事故検出のためのリアルタイムシミュレータ, 日本シミュレーション学会第2回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス発表論文集, p. 195~198, 1982, 6
- 10) S.Takaba, N.Koishi, H. Yano: Real-Time Simulation on Road Traffic Flow, Proc. of 1983 SCSC, Vol. 1, p. 585~590, 1983, 7
- 11) S.Takaba, A.Orita: Incident Detection in Street Network using Real-Time Simulation, Proc. of 1985 SCSC, p. 348~353, 1984, 7
- 12) S.Takaba, M.Arai: Dynamic Control of Traffic Flow using Arrival-Time Vector, Proc. of 1986 SCSC, 1986, 7 (発表予定)