

ITS による交通情報を用いた
旅行時間推定・予測手法に関する研究

2005 年 11 月

山根 憲一郎

序

わが国では、1960年代より本格化したモータリゼーションによって、年々自動車の保有台数や総走行距離が飛躍的に増加してきたのに伴い、交通渋滞が深刻な社会問題となっている。国土交通省の試算によれば、渋滞による経済損失は年間12兆円に達しており、また、燃料消費量や排気ガスなど環境への負荷も大きくなっている。さらに、渋滞が発生すると、前方不注意による追突や交差点での右折時の事故などにつながるともいわれている。したがって、交通の円滑性だけでなく、安全性や環境の観点からも渋滞緩和は長年の大きな課題であった。増加する交通需要に対し、これまで道路建設などのハード的施策が積極的に推進されてきた。しかし、1990年代より情報通信技術を用いることでハード的施策とソフト的施策を融合し、渋滞や事故をはじめとする道路交通の諸問題の解決を目指すITS(Intelligent Transport Systems, 高度道路交通システム)の実現へ向け推進されるようになった。その成果として、1996年より供用されているVICS(Vehicle Information and Communication System, 道路交通情報通信システム)や2001年より供用されているETC(Electronic Toll Collection System, 自動料金収受システム)などがある。このうち、VICSは交通情報提供によって渋滞緩和を実現することを目指したものである。一方、携帯電話やカーナビゲーションシステム(カーナビ)などの車載情報システムが近年急速に普及していること、2002年6月に施行された改正道路交通法により規制緩和がなされたことに伴い、車載情報システムにおいてVICSより提供される交通情報を積極的に用いる動きが広がりつつある。

そこで本研究では、渋滞緩和の一助となるべく、交通情報提供の有効性を高めることを目指して次の課題に取り組んでいる。交通情報提供における本質的な課題は、提供情報の精度を向上することと、広いエリアの情報提供がなされることである。この二つの課題がともに解決されることによって初めて、交通情報を利用するカーナビや配車配送計画システムなどのポテンシャルを十分に発揮できるようになる。一方、VICSなどのインフラシステムやカーナビなどの車載情報システムなど対象とするシステムにおいて、利用できる情報は様々である。例えば、インフラシステムにおいては、路上に設置された様々な種類の車両センサの計測情報を利用可能であるが、リンクによって設置されるセンサの種類が異なるため利用できる計測情報も様々である。車載情報システムにおいては、車両センサの計測情報を利用できない代わりに、この計測情報を加工して得られるVICSの交通情報を利用することができる。本研究では、対象とするシステムやリンクに応じて利用可能な交通情報を有効に活用することにより、上記二つの課題を解決する手法を提案するとともに、走行テスト等を通じてその有効性を確認している。本研究で示す手法が、今後渋滞、安全、環境など道路交通問題の解決の一助になれば幸いである。

2005年11月

山根 憲一郎

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.1.1 交通情報提供システム	3
1.1.2 交通状況推定・予測の現状と課題	4
1.1.3 交通情報応用システムの現状と課題	7
1.2 本研究の目的	7
1.3 本論文の構成	8
参考文献	11
第2章 既存研究のレビュー	13
2.1 概説	13
2.2 交通情報提供システムの概要	13
2.3 交通状況を計測する車両センサ	17
2.3.1 超音波感知器	17
2.3.2 AVI	19
2.3.3 光ビーコン	20
2.3.4 ループ式車両感知器	21
2.4 車両センサの計測情報を用いた旅行時間の推定・予測	22
2.4.1 首都高方式	22
2.4.2 自己回帰モデル	23
2.4.3 砂時計モデル	25
2.4.4 統計予測モデル	26
2.4.5 ニューラルネットワーク応用モデル	28
2.4.6 信号交差点の遅れ時間を考慮した推定モデル	29
2.4.7 非線形時系列予測モデル	31
2.5 プローブ情報を用いた旅行時間の推定	32
2.5.1 IPCar 実証実験	32
2.5.2 カーナビを用いたプローブカーシステム	34
2.5.3 欧州におけるプローブカーシステム	34
2.5.4 プローブ情報と旅行時間の品質	35
2.6 VICS 情報を用いた旅行時間の予測	36
2.6.1 パターンマッチングを用いた旅行時間予測	36
2.6.2 決定木を用いた渋滞予測	37
2.6.3 特徴空間射影を用いた旅行時間予測	38

2.7	交通流シミュレーション	40
2.7.1	交通流シミュレーションの特徴	40
2.7.2	既存の交通流シミュレータ	41
2.8	既存研究の課題と本研究の位置付け	42
	参考文献	44
第3章	車両センサの計測情報を用いた旅行時間の推定・予測	49
3.1	概説	49
3.2	感知器の影響範囲を事前学習する旅行時間推定	50
3.2.1	本推定手法の目的	50
3.2.2	旅行時間推定アルゴリズム	50
3.2.3	データの補正による精度向上策	53
3.2.4	性能評価	55
3.3	個々の感知器の重みを事前学習する旅行時間推定	57
3.3.1	VICSにおける旅行時間推定の課題	57
3.3.2	旅行時間推定アルゴリズム	58
3.3.3	性能評価	65
3.4	車両センサによる計測情報の伝播現象を利用した旅行時間予測	72
3.4.1	本予測手法の目的	72
3.4.2	旅行時間予測アルゴリズム	72
3.4.3	性能評価	76
3.5	蓄積旅行時間の順位マッチングを用いた旅行時間予測	79
3.5.1	大分県における旅行時間提供とその課題	79
3.5.2	AVI 内部区間における旅行時間推定	81
3.5.3	AVI 計測の時間遅れを解消する旅行時間の推定・予測	82
3.5.4	性能評価	83
3.6	提案した旅行時間推定・予測手法の適用範囲	86
3.7	まとめ	87
	参考文献	89
第4章	長周期プローブ情報を用いた旅行時間の推定・予測	90
4.1	概説	90
4.2	VICS の課題	91
4.3	プローブカーシステムの概要	93
4.3.1	プローブカーシステムの構成	93
4.3.2	トラック運行管理 ASP 及び車載端末の概要	94

4.4	長周期プローブ情報を用いた旅行時間推定	96
4.4.1	プローブ情報から旅行時間への変換	96
4.4.2	プローブ情報を用いた統計旅行時間の推定	100
4.4.3	プローブ情報ベースの統計旅行時間を用いた旅行時間予測	101
4.5	性能評価	103
4.5.1	評価条件及び評価方法	103
4.5.2	評価結果	103
4.6	プローブ情報の収集頻度による性能評価	107
4.6.1	評価の目的	107
4.6.2	利用したプローブ情報の概要	107
4.6.3	評価対象	108
4.6.4	マップマッチングの評価	108
4.6.5	推定経路の評価	108
4.6.6	推定旅行時間の評価	109
4.7	まとめ	111
	参考文献	112
第5章	VICS 情報を用いた旅行時間の予測	113
5.1	概説	113
5.2	カーナビ向け統計旅行時間の推定	114
5.2.1	VICS の課題と本研究の目的	114
5.2.2	統計旅行時間の推定	116
5.2.3	統計旅行時間の性能評価	125
5.3	カーナビ向け渋滞傾向の推定	132
5.3.1	背景	132
5.3.2	渋滞傾向の推定	132
5.3.3	渋滞傾向情報の評価	137
5.4	まとめ	139
	参考文献	140
第6章	広域交通流シミュレータを用いた旅行時間の予測	142
6.1	概説	142
6.2	広域交通流シミュレータの目的と位置付け	142
6.2.1	広域交通流シミュレータの目的	142
6.2.2	広域交通流シミュレータの位置付け	142
6.3	交通管制データを用いた交通状況の再現	144

6.4	交通規制実施時の旅行時間予測	146
6.4.1	初期値の設定	146
6.4.2	統計交通データの利用	147
6.4.3	交通規制時の処理	147
6.5	性能評価	152
6.5.1	広域シミュレーションの事例	152
6.5.2	交通規制実施時における予測旅行時間の評価	154
6.5.3	パラメータの感度分析	157
6.6	まとめ	159
	参考文献	160
第7章	結論	162
7.1	本研究の成果	162
7.2	今後の課題	164
	謝辞	166

第1章 序論

1.1 本研究の背景

わが国では1960年代より本格化したモータリゼーションにより、年々自動車の保有台数や総走行距離が飛躍的に増加してきた(図1.1.1)。このように交通需要が大きく増加する中で道路総延長距離も拡大されてきたが、交通渋滞が深刻化している状況に変わりはない(図1.1.2)。また、国土交通省の試算によれば、現在の渋滞状況を渋滞がない場合と比較すると表1.1.1のような経済損失が発生している。また、車両の走行速度が4分の1になると、燃料消費量、排気ガス(環境への負荷)はそれぞれ2.5倍、2倍になるといわれている。さらに、渋滞が発生すると、高速道路における前方不注意による追突や交差点での右折時の事故などにつながるといわれており⁴⁾⁵⁾、その事故が二次的な事故を誘発したり、あるいは渋滞を悪化したりする。したがって、交通の円滑性、安全性、環境の観点からも渋滞を緩和することは長年の大きな課題であった。

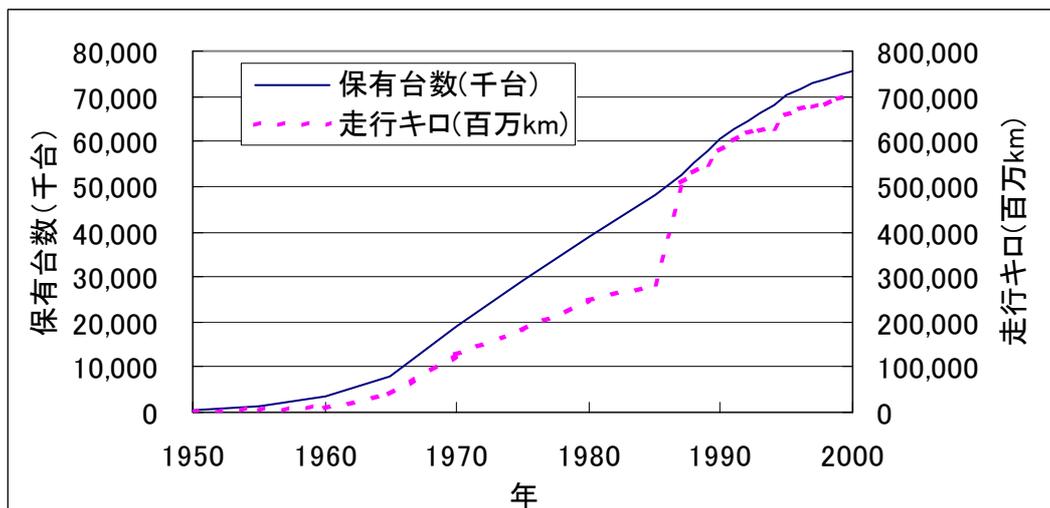


図1.1.1 自動車の保有台数及び総走行距離の推移¹⁾

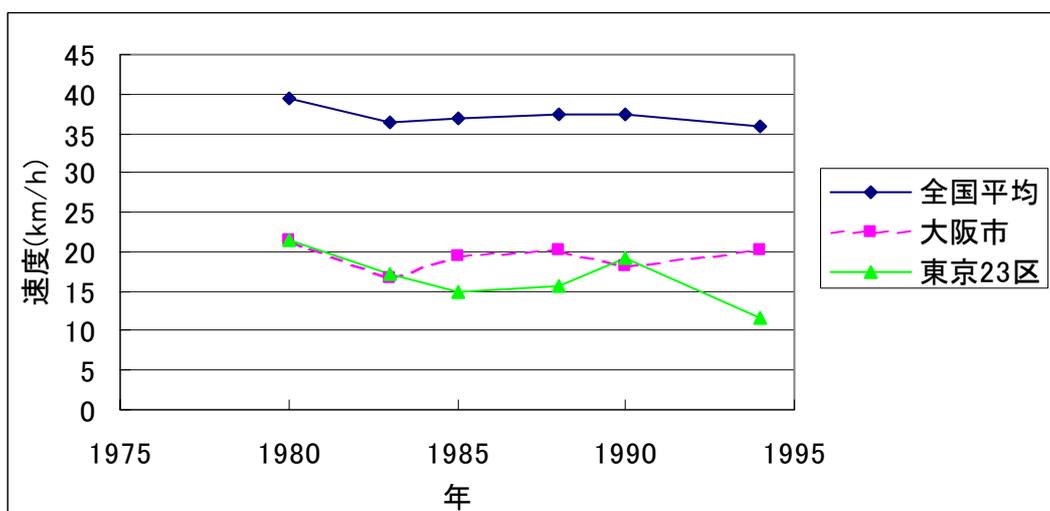


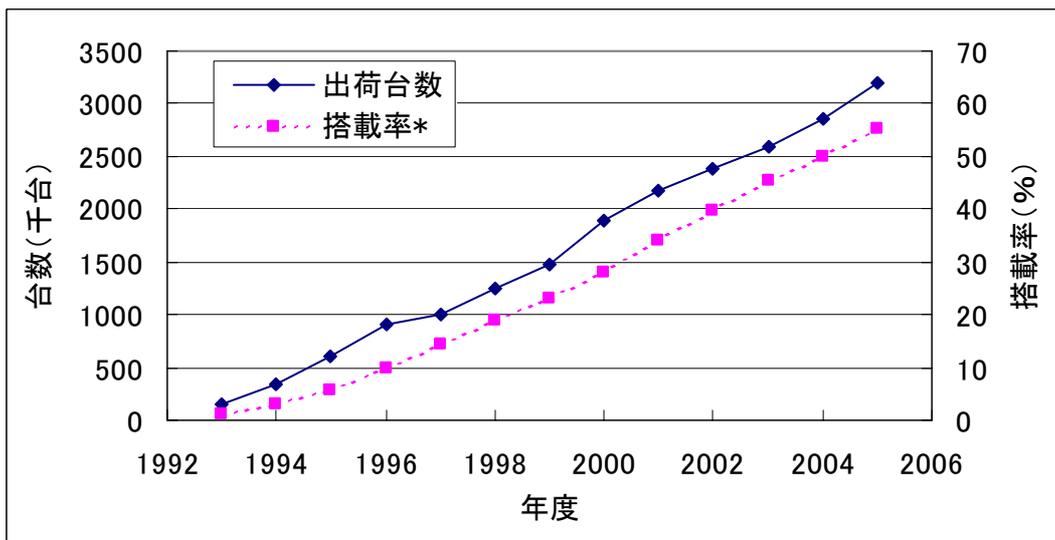
図1.1.2 一般道平均旅行速度の推移²⁾

表 1.1.1 渋滞による経済損失³⁾

	全体 (年間)	一人当たり (年間)
損失時間	38 億時間	30 時間
損失時間の費用換算値	12 兆円	9 万円

一方、増加する交通需要に対し、これまで政府や地方自治体主導で道路建設が積極的に推進されてきたが、バブル経済の崩壊以来、経済情勢の悪化や少子化の進行等により、これまでのような交通需要の右肩上がりが見込めなくなってきたことから、道路の建設という単純な交通容量増加策は現実的ではなくなってきた。

このような状況の中、1990年代より5省庁（警察庁、通商産業省（現 経済産業省）、運輸省（現 国土交通省）、郵政省（現 総務省）、建設省（現 国土交通省））主導の元に、この渋滞や事故の問題をはじめとする交通の諸問題に対して情報通信技術を用いて解決することを目的として、ITS（Intelligent Transport Systems, 高度道路交通システム）の実現に向け積極的に取り組まれてきた。その成果として、1996年より供用されているVICS（Vehicle Information and Communication System, 道路交通情報通信システム）⁶⁾⁷⁾、2001年より供用されているETC（Electronic Toll Collection System, 自動料金収受システム）などがあり、今後はシステムのさらなる高度化により渋滞緩和の実現が期待される。また、近年カーナビゲーションシステム（カーナビ）や携帯電話などの車載情報システムの普及が急速に進んでおり（図 1.1.3、図 1.1.4）、これらを用いた交通情報提供ビジネスを視野に、2001年6月に道路交通法が改正された（2002年6月より施行）。この改正により、VICSの道路交通情報データを編集・加工し、あるいは独自に道路交通データを収集して提供することが可能になり、交通情報提供は官主導から官民協調へと新たな展開を迎えている。



*自動車稼働台数（2000万台）への搭載率として算出

図 1.1.3 国内カーナビ市場の推移⁸⁾

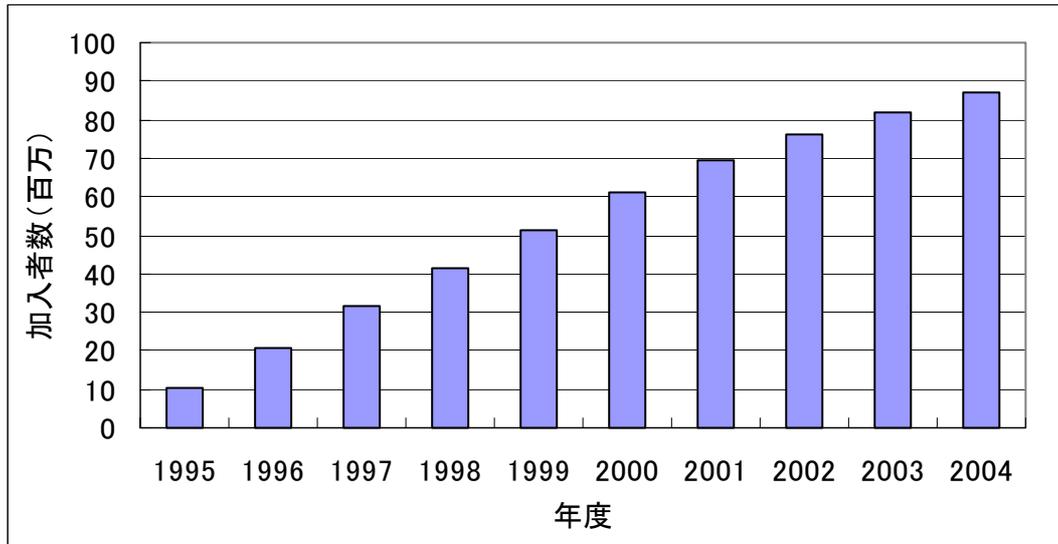


図 1.1.4 国内携帯電話加入者数の推移⁹⁾

1.1.1 交通情報提供システム

(1) 交通情報提供システムの歴史

上述したように、わが国における交通情報提供システムは官主導の元に整備されてきた。ここでは、わが国における交通情報提供システムが進化してきた過程について、首都高速道路の事例¹⁰⁾に沿って述べる。

1965年(昭和40年)以降より車両感知器によるデータ収集実験が始められ、1970年(昭和45年)に交通情報の自動収集が行われ、主要入路に設置された文字情報板に管制員が手動で渋滞の発生地点等を提供する半自動システムが導入された。1973年(昭和48)年になって交通情報の収集、処理、提供を自動化したシステムが導入され、初めて渋滞の発生地点及び渋滞長の提供が5分毎に行われた。また、文字情報板は、入路のみならず放射線上の都心環状線手前にも設置され、情報提供された。この頃より、渋滞が発生してから情報提供するまでの時間遅れによって渋滞情報の精度悪化が問題となり、1980年(昭和55年)に交通情報の収集サイクル及び文字情報板の更新サイクルが30秒に切り替えられた。これに対応するため、車両感知器の設置間隔を従来(都心環状線：300m、放射線：600m)より改善し、150mに変更した。さらに、渋滞の先頭と末尾を同時に提供することにより、渋滞区間の情報提供が開始された。しかし、更新サイクルが30秒では逆に交通情報の安定性が確保できないため、1985年(昭和60年)に1分間隔に変更されるとともに、車両感知器の設置間隔も現在の300mに変更された。また、この頃と前後して図形情報板、情報ターミナル、路側放送を用いた情報提供が行われた。1991年(平成3年)より道路本線上に旅行時間が提供され(阪神高速道路では1989年(平成元年)より提供)、1993年(平成5年)には2経路の旅行時間提供が開始された(大阪府警及び阪神高速道路では1991年(平成3年)より提供開始¹¹⁾)。1996年(平成8年)より車載機(カーナビ)向けの情報提供としてVICSが開始された。また、1997年(平成9年)には細切れの渋滞を結合して1つの渋滞として扱う断続渋滞の提供や、渋滞情報と旅行時間の交互表示、予測旅行時間の提供等が追加された。一方、現在の交通情報収集

機器としては、車両感知器に加えて CCTV カメラ (Closed Circuit Television Camera) や AVI (Automatic Vehicle Identification) ¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾ 等があり、情報提供手段としても、文字情報板、図形情報板、旅行時間表示板、路側放送、情報ターミナル、電話自動応答システム、VICS 向けビーコンが混在し多種多様化している。さらには、近年普及した携帯電話及び情報技術の活用により今後新しい形態で情報提供されると考えられる。

(2) 交通情報提供システムの課題

交通情報の利用法としては、例えば、カーナビゲーションシステムにおける動的経路探索、目的地までの旅行時間予測、トラックの配車・配送計画、信号パラメータの動的設計、各種施策を評価する交通流シミュレータへの入力データ等と多岐にわたる。しかし、交通情報提供システムが真に利用価値の高いものであるためには、次の2つの条件を満たすことが重要である。

(a) 提供情報が正しいこと (情報精度)

(b) 広いエリアの情報提供がなされること (情報カバレッジ)

(a) については、車両感知器の普及や情報機器の発達により改善されつつあるが、情報提供の時間遅れに加え、交通流計測の誤差や推定・予測誤差などの技術的課題があり、さらなる改善の余地がある。また、VICS のような実サービスシステムにおいては、地図や各種パラメータ等の年度更新など維持管理も重要な要素であり、この維持管理に関わる工数をできるだけ軽減することも精度を維持する上で重要な要素である。(b) については、官主導で整備されてきた従来のシステムにおいては車両感知器や AVI 等の車両センサが前提となっており、導入コストとランニングコストの問題から車両センサは都市部の重要路線に対して優先的に設置されているのが実状である。またその設置間隔も必要最低限であることから車両センサの整備が必ずしも十分でない状況 ¹⁶⁾ であり、そのため現状でも十分広いエリアの情報提供がなされているとは言えない。交通情報の中でも特に旅行時間情報は重要であり、上述した利用法において欠かすことができないものであるため、その精度と情報カバレッジに関してさらなる改善が求められている。

これらの課題については、いずれも改善されればされるほど利用者に満足されるが、一方でコストの問題や技術的限界などもある。したがって、目標設定にあたっては、利用目的、利用者のニーズ、あるいは実用性等を十分考慮することが重要である。

1.1.2 交通状況推定・予測の現状と課題

(1) 交通状況の推定と予測

ここでは、用語の定義について整理する。

わが国で最も代表的な交通情報提供システムである VICS を例にし、交通情報の種別を表 1.1.2 に示す。本論文において扱う情報としては、その中でも特に渋滞情報と旅行時間情報を中心とする。また、交通情報は、算出形態や対象時間の扱い等から表 1.1.3 に示される区

分で定義する。VICS より提供される道路交通情報（VICS 情報）は、車両センサによる計測データやカーナビゲーションによる計測データなどをリアルタイムに収集し、その収集された計測データをもとに推計されるため推定情報に該当する。

表 1.1.2 交通情報の種別⁶⁾

情報種別	概要
渋滞情報	渋滞の位置、長さ、渋滞度（渋滞，混雑，渋滞なし，不明）
旅行時間情報	リンク旅行時間と区間旅行時間があり、それぞれの通過に要する時間を表す
事象規制情報	規制内容や原因
駐車場情報	駐車場の状況（空車，混雑，満車，閉鎖，不明）、位置、駐車場名、営業時間、料金、車種制限、高さ制限
S A ・ P A 情報	S A（サービスエリア）・P A（パーキングエリア）の状況
メッセージ情報	緊急・注意警戒メッセージ等

表 1.1.3 交通情報の区分

区分	概要
実測情報	車両でのフローティング走行試験等により計測される情報
推定情報	現在または過去の交通状況を対象とし、地点を計測する車両感知器の情報から区間の情報に変換することにより推計される情報
予測情報	未来の交通状況を対象とし、過去及び現在の交通情報から推計される情報

また、交通情報の精度を議論する際には、通常は実測情報を真値とし、推定情報または予測情報の真値に対する誤差によって評価される。統計学¹⁷⁾において誤差とは測定値（この場合、推定値または予測値に該当する）から真値を引いた値のことをいうが、それを2つの成分に分けて考えることが多い。一つは偶然誤差と呼ばれ、測定値とその分布の母平均との差のことであり、もう一つは系統誤差あるいは偏りと呼ばれる。偶然誤差の大きさの程度を精度というため、測定値の誤差 Err に関する指標として平均絶対誤差(mean absolute error)や RMS 誤差(root mean square error, 二乗平均平方根誤差)が使われることが多い。時刻 t における測定値 $\hat{\theta}(t)$ を、真値 $\theta(t)$ をとすると、前者は式(1.1.1)、後者は式(1.1.2)でそれぞれ表される。

$$Err = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |\hat{\theta}(t) - \theta(t)| \quad (1.1.1)$$

$$Err = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \{\hat{\theta}(t) - \theta(t)\}^2} \quad (1.1.2)$$

また、真値に対する誤差の割合を示す誤差率 $ErrRate$ については、前者は式(1.1.3)、後者は式(1.1.4)でそれぞれ表される。

$$ErrRate = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|\hat{\theta}(t) - \theta(t)|}{\theta(t)} \quad (1.1.3)$$

$$ErrRate = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left\{ \frac{\hat{\theta}(t) - \theta(t)}{\theta(t)} \right\}^2} \quad (1.1.4)$$

本研究においても、特に断りのない限り上記の誤差に関する指標を用いて精度を議論する。

(2) 交通状況推定・予測の現状と課題

上述したように、VICS より提供される道路交通情報（VICS 情報）は、車両感知器や AVI 等の車両センサによる計測データやカーナビゲーションによる計測データなどの各種計測データに基づいて推定される。車両センサには多くの種類があるが、それぞれで計測されるデータの種類は異なっており¹⁸⁾¹⁹⁾、交通状況の推定においては収集される計測データの種類に応じて個別になされる必要がある。また、同一区間に異なる種類の車両センサが設置されているような状況も重要路線では少なくなく、各データをうまく組み合わせることにより精度向上と提供エリアの拡大を図ることが課題である。また、都市部の重要路線以外の路線（特に地方の主要路線）では、車両センサの設置密度が十分でないことから、たとえセンサが設置されていても十分な精度をもって交通状況を推定できず、結果的に情報提供を行わないことがあった。したがって、できるだけ広いエリアの情報提供を行うためには、従来必要とされていた設置密度が達成されていない状況においても、可能な限り精度を確保しながら交通状況を推定することが課題である。

また、VICS より提供される道路交通情報は現在の交通状況を対象とした推定情報であって、未来を対象とした予測情報には対応していない。しかしながら、推定情報においては次の状況において問題になることがある。図 1.1.5 は、交通状況が時空間セル単位に変化することを示したものであり、横軸の各セルはリンクを表し、縦軸の各セルは情報更新周期（通常 5 分）を表す。VICS においては、現在の推定情報のみが提供されるため目的地までの区間旅行時間は、現在地から目的地に至るまでの各リンクに関する現在のリンク旅行時間を単純に和算することによって得られるため、現在値とも呼ばれる。この計算方式が有意に成り立つのは、現在から目的地に到着するまでの間に交通状況が現在と大きく変化しないか、あるいは 1 つの情報更新周期内に目的地まで到着するような場合に限られる。しかし、実際の利用シーンにおいては目的地に至るまでに複数の情報更新周期を要し、また走行に伴う時間経過とともに渋滞の発生・解消など交通状況が大きく変化することが少なくない。したがって、図に示すように走行途中で渋滞が延伸してくるような場面において、VICS による推定情報を用いた現在値では実際の走行結果との誤差が大きくなる。この問題を解決するためには、現在以降の未来の交通状況を正確に予測することが重要な課題である。

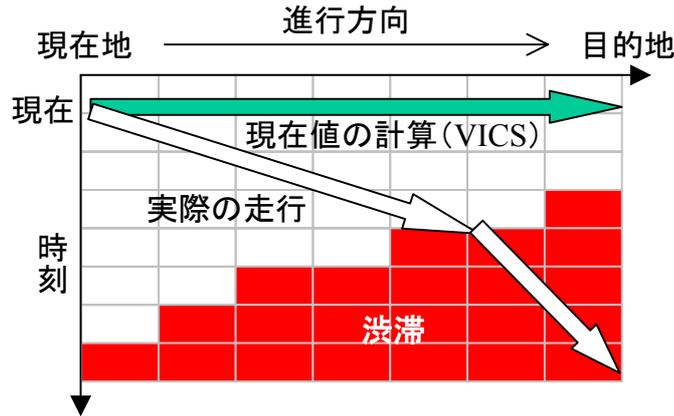


図 1.1.5 推定情報と予測情報

1.1.3 交通情報応用システムの現状と課題

交通情報を基礎データとして、様々なアプリケーションに応用する事例を表 1.1.4 に挙げる。しかし、前述したように、交通情報の精度が高いこと、広いエリアの情報をカバーしていること、の2つの重要な条件のうちいずれか一方でも満たしていなければ、いずれの事例においてもそのポテンシャルを十分に発揮できない。

例えば、カーナビにおける動的経路探索を例に説明する。動的経路探索においては各リンクのコストの総和が最小となるような経路を探索するが、コストは通常の場合旅行時間であるため、最短時間で到達できる経路が求められる。そこで、基礎データとして用いられる旅行時間の精度が高くなければ、求められる経路が最短時間であるとは限らなくなる。また、旅行時間情報が十分多くのリンクに関して提供されていなければ、予め設定された平均速度などの静的なデータで代用せざるをえなくなる。しかし、この代用データは精度が高くないため、同様に求められる経路が最短時間であるとは限らなくなる。

このように、交通情報を応用したシステムの事例においても、交通情報の精度と情報カバレッジが大きく影響するため、この2つを改善することが最も重要な課題となっている。

表 1.1.4 交通情報応用システムの事例

渋滞情報	旅行時間情報	事象規制情報
<ul style="list-style-type: none"> カーナビの地図への重畳表示⁶⁾ 路側情報板への図形表示²⁰⁾ 携帯情報サービス 信号制御²¹⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> 路側情報板への表示²⁰⁾ カーナビへの簡易図形表示⁶⁾ 動的経路探索²²⁾ 到着予想時刻表示 配車配送計画²³⁾ 信号制御²⁴⁾ 運行管理システム²⁵⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> カーナビの地図への重畳表示⁶⁾²²⁾ 動的経路探索 旅行時間予測²⁶⁾

1.2 本研究の目的

本研究では、渋滞緩和の一助となるべく、交通情報提供の有効性と実用性を高めることを目指し、交通情報のうち最も詳細でかつ応用範囲の広い旅行時間情報を対象に、精度の向上及び情報カバレッジの拡大を可能にする旅行時間推定・予測手法を検討・開発し、またその

性能評価を行うことによって既存の技術に対する有効性を評価するとともに、その適用範囲を明らかにすることを目的とする。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を図 1.3.1 に示す。第1章では、本研究の背景として、現状の交通情報提供システムにおける交通状況の推定・予測及び交通情報応用システムに関する現状と課題を整理し、本研究の目的を明らかにする。第2章では、既存研究のレビューとして、まず交通情報提供システムの概要とシステムを支える車両センサについてまとめ、次に旅行時間を推定・予測する既存の手法について報告する。また、近年研究が活発化しているプローブカーに関する国内外の事例について報告し、さらに交通流シミュレーションの現状について述べ、最後に既存研究に対する本研究の位置付けを明らかにする。第3章では、交通管制センターや VICS センターなどのインフラシステムにおいて車両センサの計測情報を用いた旅行時間の推定及び予測手法について述べる。旅行時間推定手法として、感知器の影響範囲を事前学習する旅行時間推定と個々の感知器の重みを事前学習する旅行時間推定の二つの手法について述べる。また、旅行時間予測手法として、車両センサによる計測情報の伝播現象を利用した旅行時間予測と蓄積旅行時間の順位マッチングを用いた旅行時間予測の二つの手法について述べる。そして、各手法の適用範囲についても述べる。第4章では、交通情報に関する新しい収集データであるプローブカーによる計測情報（プローブ情報）を扱い、収集周期が長いプローブ情報でも利用可能な旅行時間の推定及び予測手法について述べ、さらにプローブ情報の収集頻度による旅行時間の推定性能を評価する。第5章では、民間の交通情報応用システム、特にカーナビでの利用を想定し、VICS 情報を用いて未来の交通状況を予測する二つの技術について述べる。一つは、カーナビにおける動的経路探索に向けた統計旅行時間の推定に関するものであり、もう一つは、新しい予測交通情報として位置付けられる渋滞傾向の推定に関するものである。第6章では、交通流シミュレーションを用いた旅行時間予測として、交通管制データを用いた交通状況の再現と、突発事象が発生した時の旅行時間予測について述べる。第7章では、本研究の成果とともに今後の課題について述べる。

ここで、本研究で提案する旅行時間推定・予測手法の適用範囲を表 1.3.1～表 1.3.3 に示す。表 1.3.1 は、交通管制センターや VICS センターなどのインフラシステムにおいて旅行時間を推定する場合の手法に関する適用範囲をまとめたものであり、縦軸・横軸はともに入力可能な交通情報を示している。例えば、プローブ情報と感知器による計測情報が入力可能なリンクにおいては 3.3 節と 4 章の旅行時間推定手法を適用でき、AVI による旅行時間情報か感知器による計測情報のいずれか一方のみ入力可能なリンクにおいては既存の推定手法を適用すればよく、入力可能な交通情報が一切ないリンクにおいては 5 章の手法を適用できることを示している。表 1.3.2 は、同様にインフラシステムにおいて未来の旅行時間を予測する場合の手法に関する適用範囲をまとめたものである。表 1.3.3 は、主に民間の交通情報応用システムにおいて未来の旅行時間を予測する場合の手法に関する適用範囲をまとめたものである。民間で入力できる交通情報は、現状ではプローブ情報と VICS 情報（インフラシステムより提供される推定交通情報）に限られ、その入力交通情報に応じて適用できる手法を示し

ている。しかし、災害や交通事故などの突発事象が発生した際の旅行時間予測においては、これらの予測手法では精度よく情報を提供できない可能性が高い。このような場合には、6章の交通流シミュレータを用いた旅行時間予測手法を適用できる。

このように、本研究で提案する旅行時間推定・予測手法を利用可能な交通情報を用いて最適な手法を適用することにより、提供する旅行時間情報の精度向上と情報カバレッジの拡大に寄与する。

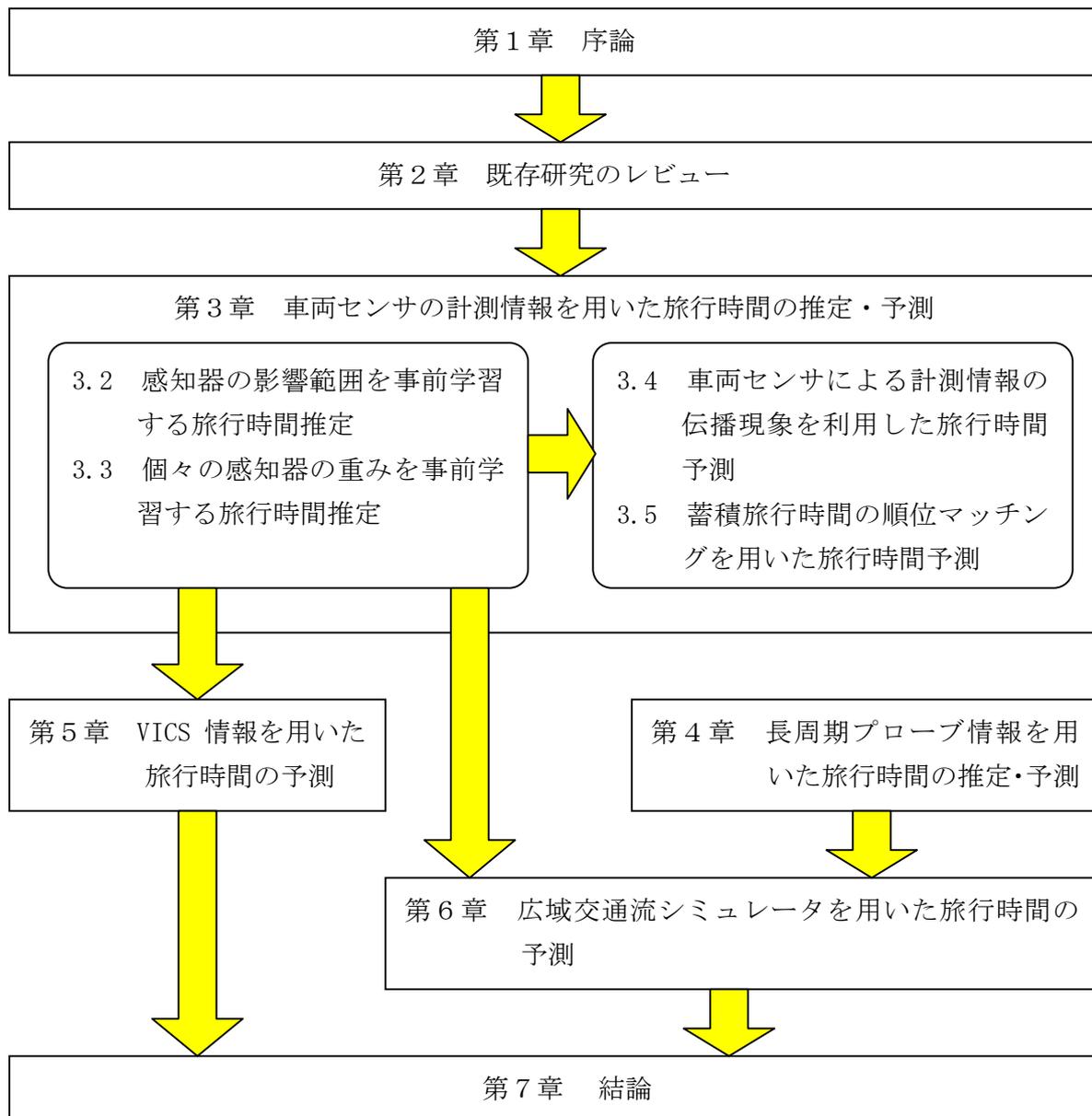


図 1.3.1 本論文の構成

表 1.3.1 入力交通情報別旅行時間推定手法の適用範囲（インフラシステム向け）

	プローブ情報 (アップリンク 旅行時間を含む)	AVI による 旅行時間情報	感知器による 計測情報	なし
プローブ情報 (アップリンク旅 行時間を含む)	—	—	—	—
AVI による 旅行時間情報	4 章	—	—	—
感知器による 計測情報	3.3 節, 4 章	3.2 節	—	—
なし	4 章	既存手法	既存手法	5 章

表 1.3.2 入力交通情報別旅行時間予測手法の適用範囲（インフラシステム向け）

	プローブ情報 (アップリンク 旅行時間を含む)	AVI による 旅行時間情報	感知器による 計測情報	なし
プローブ情報 (アップリンク旅 行時間を含む)	—	—	—	—
AVI による 旅行時間情報	4 章	—	—	—
感知器による 計測情報	4 章	3.5 節	—	—
なし	4 章	3.5 節	3.4 節	5 章

表 1.3.3 入力交通情報別旅行時間予測手法の適用範囲（民間の交通情報応用システム向け）

	プローブ情報	VICS 情報	なし
プローブ情報	—	—	—
VICS 情報	4 章, 5 章	—	—
なし	4 章	5 章	5 章

参考文献

- 1) 国土交通省：陸運統計要覧，2001.
- 2) 松下温，屋代智之 共編：ITSと情報通信技術，p5，裳華房，2003.
- 3) 国土交通省：渋滞データの概要，
<http://www.mlit.go.jp/road/ir/data/jutai/index-d.html>，2001.
- 4) ITARDA（交通事故総合分析センター）：イタルダ・インフォメーション，No. 25，No. 43，
<http://www.itarda.or.jp/info/info00.html>，2000，2003.
- 5) 葉建明：交差点における交通事故と運轉行動の関係について，大阪大学人間科学部・人間科学研究科（適応認知行動学研究分野）修士論文，<http://sanko4.hus.osaka-u.ac.jp/>
- 6) (財)道路交通情報通信システムセンター（VICSセンター）：VICSの挑戦，(財)道路交通情報通信システムセンター（VICSセンター），1996.
- 7) (財)道路交通情報通信システムセンター（VICSセンター）：<http://www.vics.or.jp/>
- 8) (株)矢野経済研究所：2002～03年版カーナビゲーション／車載用情報通信システム市場，pp. 86-87，2002.
- 9) 社団法人電気通信事業者協会：携帯電話/IP接続サービス(携帯)/PHS/無線呼出し契約数，
<http://www.tca.or.jp/>
- 10) 森田緯之：首都高速道路の交通管制システム，交通工学，Vol. 34，No. 4，pp. 1-2，1999.
- 11) 田中良平：複数経路旅行（所要）時間情報提供システム，電気設備学会誌，Vol. 13，No. 5，pp. 516-522，1993.
- 12) 安居院，雁，中嶋：画像処理を用いたナンバープレート領域の抽出に関する研究，電子情報通信学会論文誌(D-II)，Vol. J70-D-II，No. 10，pp. 560-566，1989.
- 13) 三島忠明ほか：画像処理を用いた車番認識システムの開発，電気学会論文誌(D)，Vol. 109-D，No. 5，pp. 333-338，1989.
- 14) 金山憲司：画像処理ナンバープレート読取りを用いた旅行時間計測について，電気学会論文誌(D)，Vol. 109-D，No. 7，pp. 477-484，1989.
- 15) 藤吉弘亘ほか：ニューラルネットワークによるナンバープレートの位置検出，電子情報通信学会論文誌(D-II)，Vol. J80-D-II，No. 6，pp. 1627-1634，1997.
- 16) 警察庁交通局交通規制課，国土交通省道路局 ITS 推進室：トラフィック・インフォメーション・コンソーシアム中間取りまとめ，交通工学，Vol. 37，No. 2，pp. 55-65，2002.
- 17) 竹内啓 編：統計学辞典，東洋経済新報社，1989.
- 18) 宮内勝：交通情報の収集・管理の高度化，電気学会，産業システム情報化研究会資料，IIS-01-23，pp. 23-26，2001.
- 19) (社)交通工学研究会：交通工学ハンドブック（2001年改訂版），CD-ROM，2001.
- 20) (社)交通工学研究会：交通工学，Vol. 34，No. 4，1999.
- 21) 宮内勝：交通管制システムの高度化の状況，交通工学，Vol. 38，No. 2，pp. 9-12，2003.
- 22) Nakamura, K., Yamanaka, K., Suzuki, K.: Development of HONDA Navigation System using VICS Information, In: Proceedings (CD-ROM) of the 4th World Congress on ITS, Berlin, Germany, 1997.

- 23) Taniguchi, E. and Nakanishi, M.: ITS Based Dynamic Vehicle Routing and Scheduling with Real Time Traffic Information, International Journal of ITS Research, Vol.1, No.1, 2003.
- 24) Yokota, T. et al.: Traffic Signal Offset Optimization Based on Probe Car Data and Its Model, In: Proceedings (CD-ROM) of 3rd World Congress on ITS, Orlando, USA, 1996.
- 25) Takiguchi, A. et al.: Deployment of UTMS MOCS in Nagano Olympic, In: Proceedings (CD-ROM) of 5th World Congress on ITS, Seoul, Korea, 1998.
- 26) 齋藤純一, 割田博, 田中淳: 事故・工事時における所要時間予測手法に関する研究, 第22回交通工学研究発表会論文報告集, pp.173-176, 2002.

第2章 既存研究のレビュー

2.1 概説

本章では、まず交通情報提供システムとして、わが国で最も代表的なシステムである VICS (Vehicle Information and Communication System) の概要と VICS を構成する各サブシステムについてまとめる。次に、交通情報提供システムを支える車両センサの機能や特性についてまとめる。次に、VICS を支える基本技術として重要な車両センサの計測情報を用いた既存の旅行時間推定・予測の研究についていくつかの代表事例を報告するとともに、新しい交通情報収集形態であるプローブカーに関する既存の研究や、2002 年より開放された VICS の道路交通情報を用いて近未来の旅行時間を予測する旅行時間予測に関する既存の研究について報告する。また、車両あるいは交通流の挙動を模擬することによって計算機上に交通状況を再現し、様々な交通施策の影響・効果を定量的に評価・予測するための実験的方法の一つである交通流シミュレーションに関する既存の研究事例についても報告する。最後に、現状の課題を整理した上で本研究の位置付けについて述べる。

2.2 交通情報提供システムの概要

本節では、わが国で最も代表的な交通情報提供システムである VICS のシステム構成及び各機能の概要について述べる。

図 2.2.1 に VICS のシステム構成を示す。システムを大別すると、情報収集、情報処理、情報提供の 3 段階に分かれ、この一連のフローは通常では 5 分毎に繰り返される（一部の高速道路では 1 分毎である）。以下に各機能について説明する。

(1) 情報収集

都道府県警察や道路管理者が管理する車両センサで計測された情報を、専用回線等を通じて各交通管制センターに送信することにより道路の交通状況に関する情報を収集する。車両センサにはいくつかの種類があり、それぞれで収集される情報が異なる。この車両センサで計測する情報の詳細については次節にまとめる。また、外部の情報提供機関である他の都道府県警察、道路管理者あるいは駐車場の管理元等からの情報も収集する。

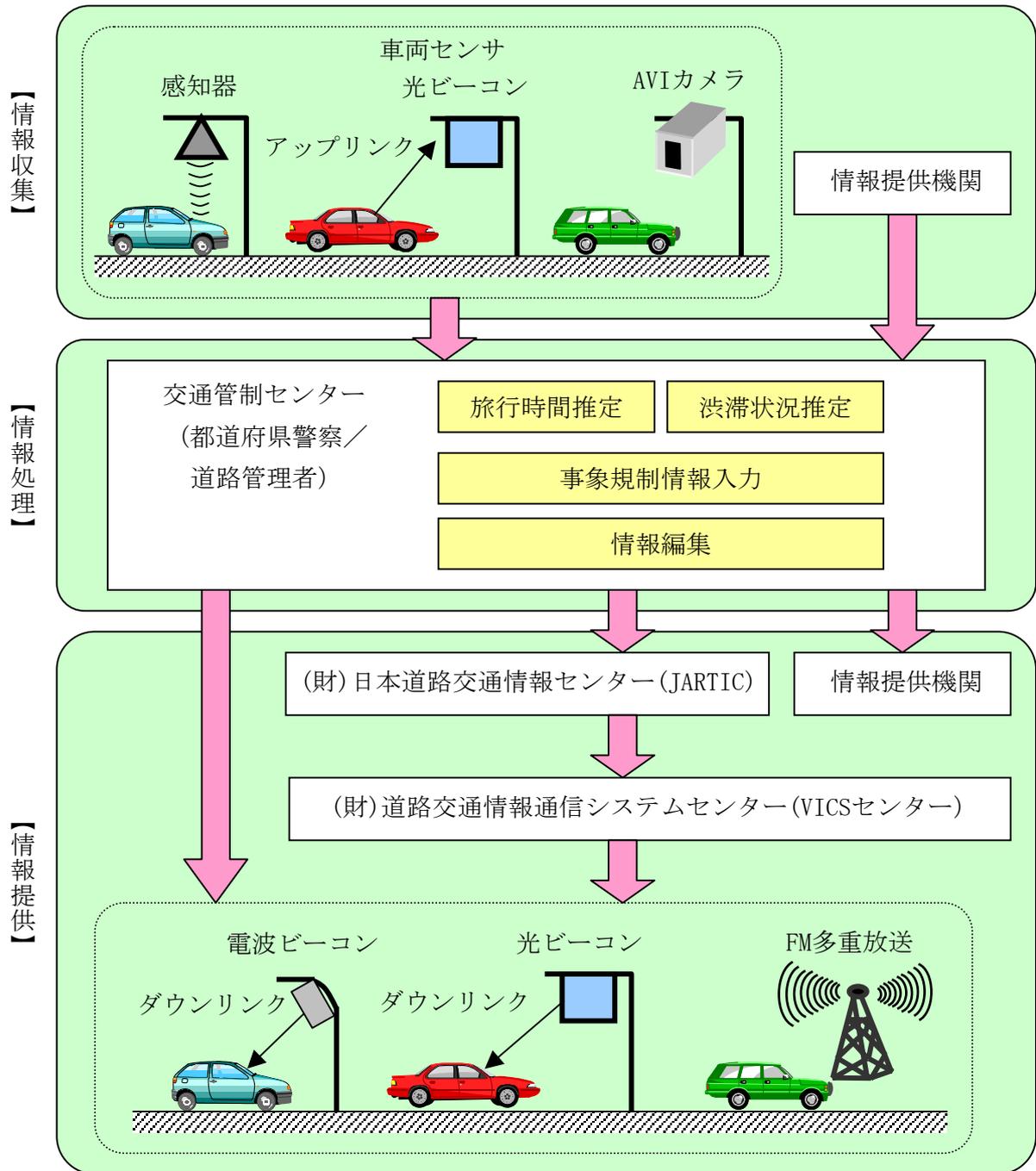


図 2.2.1 VICS のシステム構成

(2) 情報処理

この機能は、それぞれの都道府県警察や道路管理者の交通管制センターで行われる。収集した車両センサの計測情報をもとに、リンクの渋滞と旅行時間を推定する。また、事象や規制情報については、通報やカメラ画像の情報をもとにオペレータが操作端末より情報を入力する。

そして、推定・入力された情報をユーザに提供するため、図 2.2.2 に示す形式になるように編集される。VICS では情報表示として、文字表示型（レベル1）、簡易図形表示型（レベ

する車両通過速度の特性等から、電波ビーコンは主として高速道路、光ビーコンは主として一般道路に配置される。光ビーコンは、下り方向すなわちリアルタイム交通情報をカーナビ等へ通信する機能に加え、上り方向すなわち車載機からビーコンへの通信（アップリンクと呼ばれる）も可能であり、ランダム化された車両 ID、車種、計測された旅行時間等の各情報を、ビーコンを介して交通管制センターに送信する機能をもっている。また、FM 多重放送については、広域の交通情報を提供する一方で伝送速度が比較的低速であるため、例えばリンク旅行時間情報を送信しないようにするなど情報量を削減している。一方、電波／光ビーコンについては、伝送速度は比較的高速であるが通信エリアが狭い（すなわち通信時間が短い）ことから進行方向 10～30km の範囲（一般道路の場合）など限定されたエリアを対象に、リンク旅行時間を含む詳細な情報を送信している。このことから、カーナビで交通情報を用いた動的経路探索を行う場合には、FM 多重放送による提供情報では一般に対応できないが、電波／光ビーコンによる提供情報では対応可能となっている。

表 2.2.1 通信設備（メディア）の特性¹⁾²⁾

	電波ビーコン	光ビーコン	FM 多重放送
伝送速度	上り：なし 下り：64Kbps	上り：64kbps 下り：1Mbps	上り：なし 下り：16Kbps
サービスエリア	狭域	狭域	広域（都道府県単位）
通信エリア	60～70m	3.5m	10～50km
情報提供 繰り返し頻度	2～3 回／1 受信		2 回／5 分
実効情報量	約 8 千文字相当／1 箇所	約 1 万文字相当／1 箇所	約 5 万文字相当／5 分

2.3 交通状況を計測する車両センサ³⁾⁴⁾

本節では、VICS などの交通情報提供システムを支える情報収集装置としての機能をもつ各種車両センサについて概説する。

2.3.1 超音波感知器⁵⁾

超音波感知器にはドップラー型と反射時間型の2種類があるが、前者は低速車両を検出する際に誤差が大きくなるため、低速領域外の速度測定を目的とする場合を除いて使用されることは少ない。したがって、ここでは反射時間型の超音波感知器について説明する。

超音波感知器は、図 2.3.1 に示すように各車線の上方に設置される。超音波の周波数は 15～30kHz、パルスの発射間隔は 50～60msec である。感知器から発射されたパルスは、路面または車両から反射されて再び感知器で検出する。パルスの反射時間が、路面時よりも短い時に車両の存在を検知するものである。図 2.3.2 に示すように、車両の存在を検出した最初のパルスから次に路面を検出したパルスまでの時間が、車両1台の通過時間とみなすことにより通過車両の台数及び車両の占有時間を計測することができる。この計測情報を、専用回線を介して交通管制センターの信号系下位装置などに送信し、送信された情報を所定の時間（通常では5分）単位に集計することにより交通量及び占有時間（または占有率）の2つのデータを出力することができる。なお、この反射型の超音波感知器ではドップラー型とは異なり車両の走行速度を直接計測することができないが、計測される交通量と占有時間のデータから後述の式によって平均速度を推定することができる。

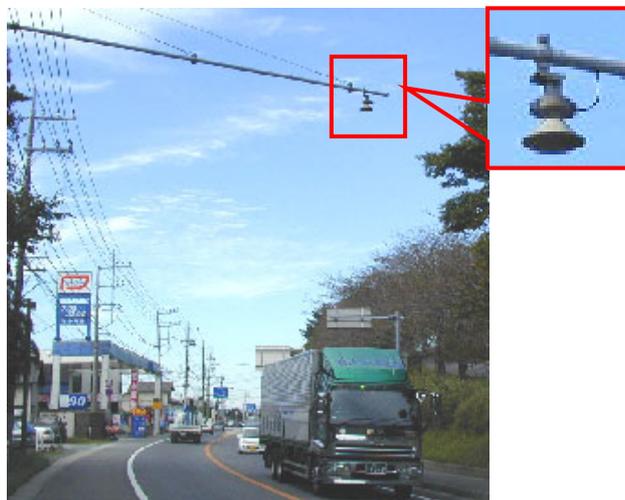


図 2.3.1 超音波感知器の設置の様子

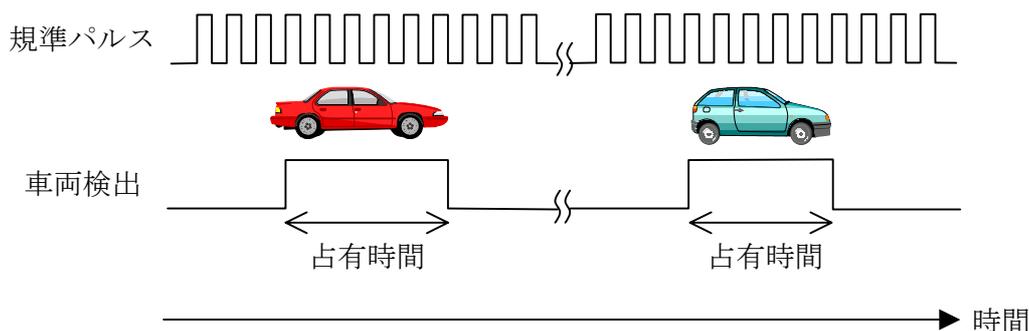


図 2.3.2 伝搬時間差による車両の検出

また、超音波感知器は簡易な構造のため車両センサとしては比較的安価な部類であり、また比較的早くから製品化されたため、2000 年度末の時点で約 13 万基が設置されており⁶⁾、わが国でもっとも広く普及した車両センサである。したがって、交通情報提供システムにおける旅行時間推定にはこの計測情報を用いるのが現実的である。しかし、この超音波感知器は設置地点直下の交通量と車両の占有時間を計測しているにすぎず、リンク旅行時間を直接計測することはできない。したがって、上記の計測情報から次式によって平均速度 v を推定し、この速度から旅行時間をさらに推定するのが一般的である。

$$v = \frac{L_c \cdot Q}{O_t} \quad (2.3.1)$$

ここに、 L_c は大型車混入率等を用いて予め設定される平均車長、 Q は単位時間当たりの交通量、 O_t は単位時間当たりの車両の占有時間である。この平均速度 v を推定する際の重要なパラメータである平均車長 L_c は、個々の車長を計測するなどして動的に設定されれば平均速度 v の精度がよくなると考えられるが、超音波感知器では車両の高さをある程度計測できるのみで大型車の混入率を大まかに決定できてもその精度は十分ではなく、実際には、例えば 5.5 メートルなど代表地点における代表時刻の計測値を静的に割り当てて運用していることがほとんどである。したがって、この平均速度 v の精度は、実際の通過車両の構成によってばらつくことがある。

超音波感知器によって速度を計測する手段としては、上記の推定式による方法以外に直接計測する方法がある。上記のドップラー効果を利用したドップラー型の感知器もその一つであるが、他にも、例えば首都高速道路などでよく見られるように、進行方向に沿って所定距離（数メートル）をあけて設置されたいわゆるダブルセンサの設置方式（図 2.3.3）がある。このダブルセンサにおいては、車両の進入を検出した時間の遅れから速度を計測することができる。

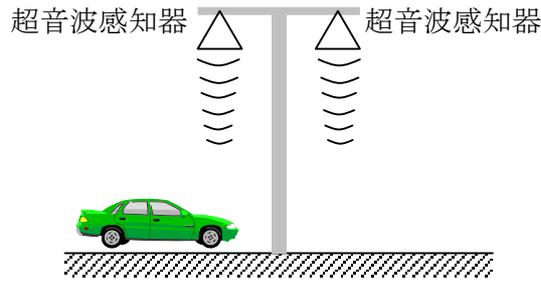


図 2.3.3 ダブルセンサ

超音波感知器は、高速道路においては渋滞を検知し渋滞情報をリアルタイム提供することを目的としてほぼ等間隔に設置されるが、一般道路においては渋滞を検知しその渋滞を抑止する信号制御を主な目的として設置されてきた⁷⁾。東京都など都心部の重要交差点では、図 2.3.4 に示すように停止線から上流方向に 150m, 300m, 500m, …の各位置に超音波感知器を設置されている。しかしながら、都市部の非幹線道路や地方都市の幹線道路などを含む多くの道路においては、費用対効果の観点から必ずしも図のように十分に設置されることはなく、150m や 300m の位置までの設置にとどまるケースや、あるいは全く設置されないケースがほとんどである。

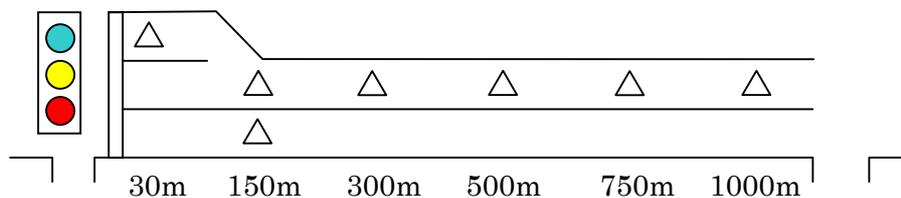


図 2.3.4 標準的な感知器配置図⁷⁾

2.3.2 AVI(Automatic Vehicle Identification)^{8) 9) 10) 11) 12)}

AVI は、画像処理技術を応用した車両センサの一つであり車番認識システムとも呼ばれる。車両の前面部を撮影してその映像を画像処理することによってナンバープレートの文字を自動で認識するシステムである。1985 年頃から 4 桁番号だけを認識する装置が普及し、画像処理装置の高速化やカメラの高精細化等により、1990 年頃から陸運支局、分類番号（最近 2 桁から 3 桁化された）、及びかな文字を含めた全文字を読み取るタイプに変わってきており、また最近では車両の背面からの撮影に対応したものも出てきている。AVI の主な用途としては、旅行時間計測や料金所での車種・車両判別、駐車場の出入口（ゲート）管理などがある。ここでは、AVI システムを用いた旅行時間計測について述べる。

図 2.3.5 に AVI システムの概要を示す。AVI システムは、図 2.3.6 に示すように道路上に設置されたカメラ映像を画像処理することにより車両のナンバープレートを自動認識し、2 箇所で計測されたナンバーが一致した時の各通過時刻の差を計測旅行時間として出力するものである。また、各車両による走行のばらつきを抑えるため、各車両の計測旅行時間を情報

集計周期（通常5分単位）に平均化して提供される。このシステムは、旅行時間を直接計測するため高精度な旅行時間を計測できる点が特長である。しかし、屋外で連続運用する撮影用カメラとナンバーを自動認識するための画像処理装置等が必要なため、車両センサとしてはかなり高コストとなる。そのため、AVI システムが実際に設置される路線は、交通管制上極めて重要な主要幹線道路の重要区間に限られ、しかもその計測区間の距離は、数キロメートルから十数キロメートルと比較的長距離となっているのが実情である。したがって、広域エリアを対象とし、かつ通常は交差点間の区間として定義されるリンクを単位とするきめ細かな情報提供を行う VICS のような交通情報提供サービスには、AVI による計測情報だけでは十分ではなく工夫が必要となる。

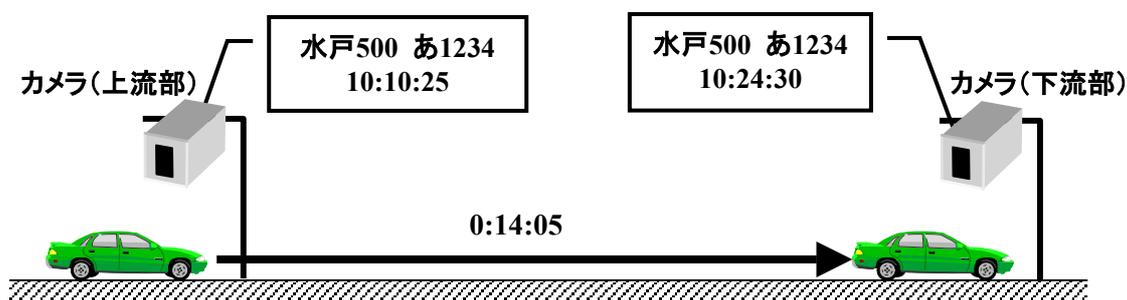


図 2.3.5 AVI システムの概要

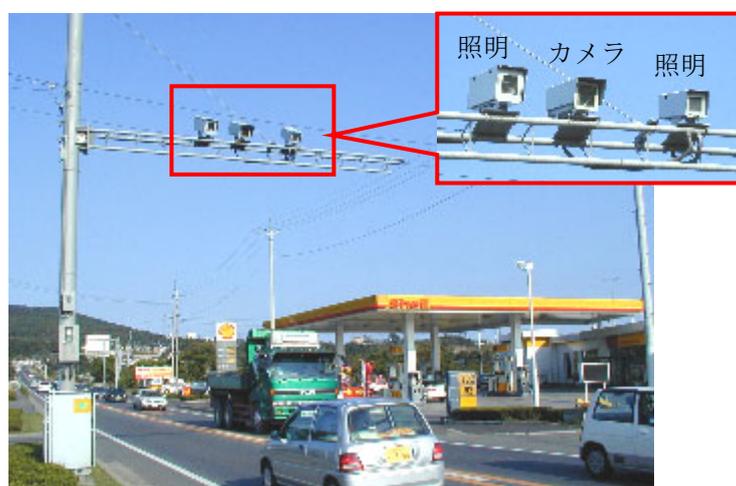


図 2.3.6 AVI カメラの設置の様子

2.3.3 光ビーコン²⁾¹³⁾

光ビーコンは、近年一般道路で整備が進みつつあり、2001年現在で約3万基整備されているがこれを6万基に増やすことが計画されており¹⁴⁾、AVIに比べ普及している状況にある。光ビーコンは、図2.3.7に示すように各車線の上方に設置され、2.2節で述べたようにVICS光ビーコン対応の車載機を搭載した車両と双方向で情報通信することが特徴である。車載機から前回通過した光ビーコンのIDと前回から今回までに要した実際の旅行時間情報を光ビーコン経由で交通管制センターへ送信する（アップリンクと呼ばれている）。したがって、こ

の方式も AVI システムと同様に直接旅行時間を計測するものであるため高精度な旅行時間を得ることができる。一方、光ビーコンから車載機へはリアルタイム交通情報が送信される（ダウンリンクと呼ばれている）。また、情報通信機能に加えて上述の超音波感知器と同等の車両感知機能も併せもっている。ただし、感知媒体は超音波感知器とは異なり波長 $850 \pm 50\text{nm}$ の近赤外線であり、また車両感知領域は $1.2\text{m} \times 1.2\text{m}$ 程度である¹⁵⁾。光ビーコンはセンサのコストが比較的安価であるため多くが主要交差点ごとに設置される（通常は、交差点出口付近に設置される）。そのため、数百メートルから数キロメートルの道路区間が旅行時間計測区間になり、設置間隔の点では AVI に比べてきめ細かな交通情報提供サービスに適していると言える。しかし、すでに広く普及している超音波感知器に比べると十分広い範囲をカバーしているとは言えない。また、VICS 対応車載機の累積出荷台数が増加傾向にあるとは言え、アップリンクが可能なのは VICS 光ビーコン対応の車載機を搭載した車両に限られる。森田らの報告¹⁶⁾によれば、2002 年 9 月の大阪府におけるアップリンク車両の割合は平均で 2.1%であったとの事例が示すように、実際にアップリンクできる車両の全走行車両に占める割合は必ずしも多くない。したがって、常に旅行時間が計測できるとは限らず、終日連続運用する VICS のような広域交通情報サービスのためにはこの光ビーコンだけでは十分とは言えない。

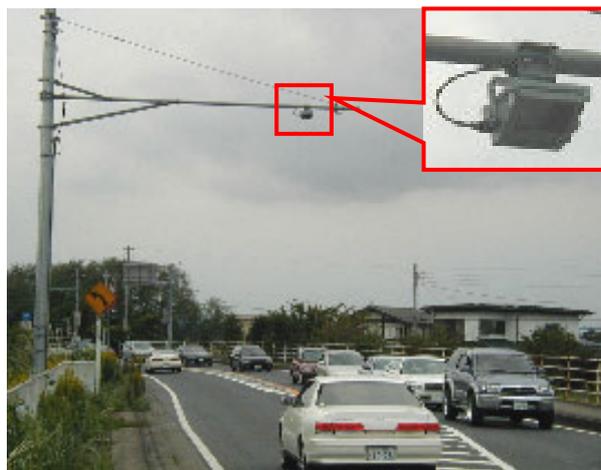


図 2.3.7 光ビーコンの設置の様子

2.3.4 ループ式車両感知器³⁾⁴⁾

ループ式車両感知器は金属感応型の一つである。任意に感知領域を設定できること、感知出力の立ち上がりが早いこと、時間占有率を正確に測定できる利点があることから、欧米では広く用いられている。道路面下 $5 \sim 10\text{cm}$ にループコイルを埋設しておき、その上を車両が存在した場合に生ずるインダクタンスの変化を検出することで車両を検知することができ、都市景観にも優れる。しかしながら、近年のわが国では、車両走行や道路工事等によるループや給電線の切断事故が多いなど維持管理に難点があることからあまり使用されていない。

2.4 車両センサの計測情報を用いた旅行時間の推定・予測

車両センサが数百メートル間隔など比較的密度が高い間隔で設置されることは、重要路線を除いて少ない。したがって、各地点で計測された情報からその地点における平均速度を推定し、また感知器の設置されていない場所を含むリンクを通過するのに要する時間（旅行時間）を推定する必要がある。本節では、わが国でこれまでに研究・実施されてきた代表的な旅行時間推定・予測手法について報告する。

2.4.1 首都高方式¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾

首都高速道路（岡田¹⁷⁾，齋藤ら¹⁸⁾）や阪神高速道路（松尾ら¹⁹⁾）など主に都市内高速道路で実績のある旅行時間推定方式である。この方式では、図 2.4.1 に示すように、隣接する感知器設置位置の中間点で区切られた小区間を定義し、その小区間の交通状況を車両感知器で計測された地点平均速度で代表させるものである。つまり、この方式では、感知器が影響を及ぼす範囲（以下、感知器影響範囲と記す）を予め定められた小区間とする。そして、その地点平均速度に基づいて小区間の旅行時間を算出する。また、複数の小区間から成る情報提供区間の旅行時間は、各小区間の旅行時間の同時刻和方式によって推定される。

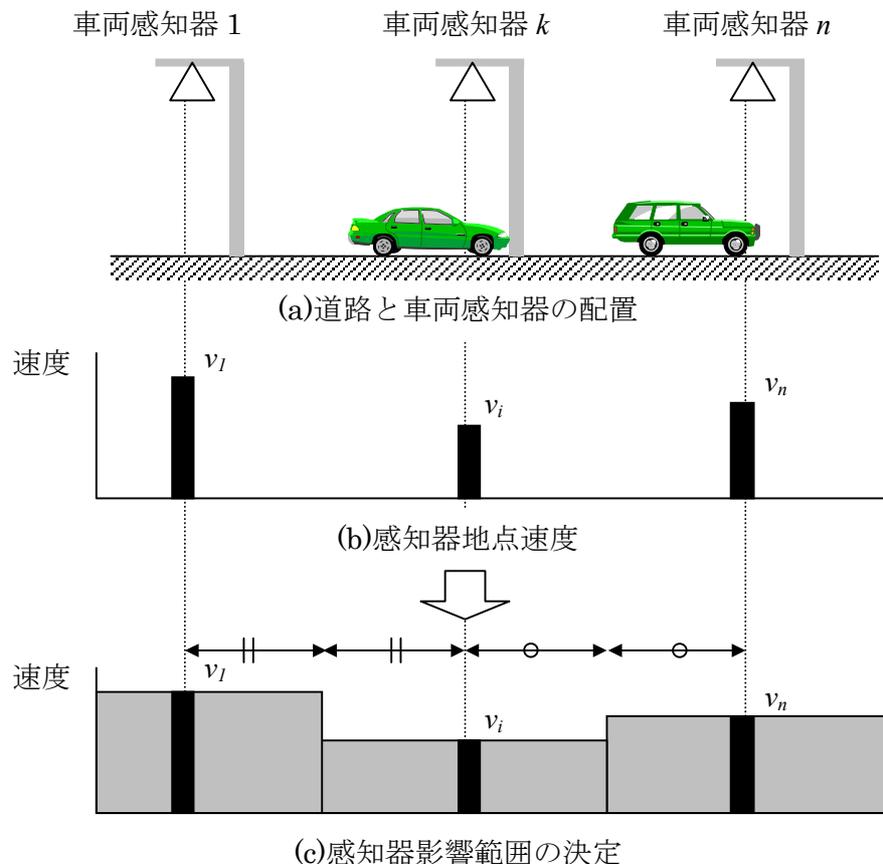


図 2.4.1 首都高方式の概要

同時刻和方式は、図 2.4.2 に示すように、同時刻における各小区間の旅行時間を足し合わせることによって情報提供区間の旅行時間を推定するものである。同時刻和方式で推定される旅行時間は現在の交通状況が今後変化しないという仮定に基づいて算出されるものであり、推定される走行軌跡はこの仮定の元に算出されるものである。そのため、この同時刻和方式で推定された旅行時間は、瞬時値、現在値、同時累積推定旅行時間などと呼ばれる。

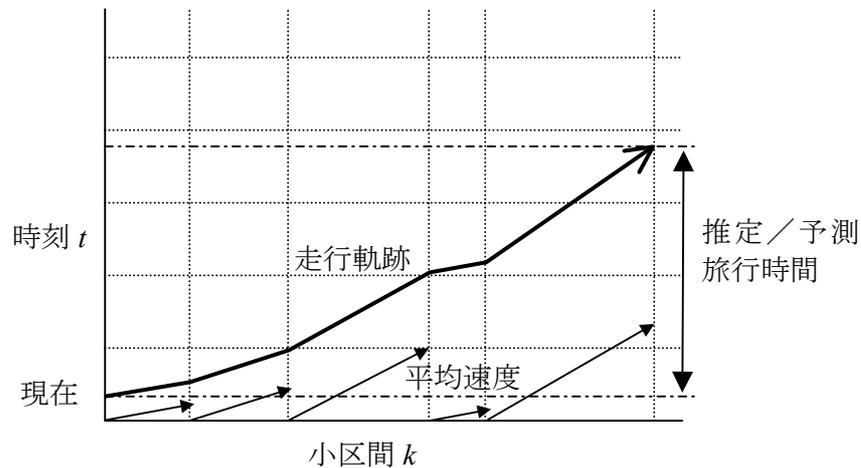


図 2.4.2 同時刻和方式による旅行時間算出

2.4.2 自己回帰モデル²⁰⁾²¹⁾

森田ら²⁰⁾によるこのモデルは、基本的には、地点の車両感知器における平均速度情報から道路区間の旅行時間を推定する旅行時間推定手法の一つであるが、さらに多次元自己回帰モデルを導入することにより旅行時間予測へと展開されたものである。このモデルの概要を図 2.4.3 に示す。

この手法では、計測対象となる道路区間を小区間に分割するが、その分割方法は車両感知器設置地点間を等分割する方法で、首都高方式と同様に各小区間の交通状況は小区間内の車両感知器の計測情報で代用させる。各小区間の車両感知器の計測情報について、過去から現在までの単位時間における交通量、占有率、平均速度、車種混入率をもとに、多次元自己回帰モデルを用いて将来の交通状況を予測する。現在時刻 t 、時刻 $t-i$ における小区間 k の車両感知器の計測情報（交通量、占有率、平均速度、車種混入率）を $D_k(t-i)$ とし、予測は、過去 j 期について上流 s 区間、下流 r 区間における車両感知器の計測情報を用いる。ただし、 $i=0, 1, \dots, m-1$; $h=0, 1, \dots, s+r$ とし、 $D_k(t)$ 、 $X_{k+h-s}(t-i)$ 、 $D_k(t+1)$ を次のように定義する。

$$D_k(t) = \frac{1}{m(s+r+1)} \sum_{h=0}^{s+r} \sum_{i=0}^{m-1} D_{k+h-s}(t-i) \quad (2.4.1)$$

$$X_{k+h-s}(t-i) = D_{k+h-s}(t-i) - D_k(t) \quad (2.4.2)$$

$$D_k(t+1) = \sum_{h=0}^{s+r} \sum_{i=0}^{m-1} \alpha^{1^{h+1}, i+1} X_{k+h-s}(t-i) + D_k(t) \quad (2.4.3)$$

ここで、

$$X_k(t-u) = \sum_{h=0}^{s+r} \sum_{i=0}^{m-1} \alpha^{h+1,i+1} X_{k+h-s}(t-u-i-1) + \varepsilon_k(t-u) \quad (2.4.4)$$

によって、 $\varepsilon_k(t-u)$ が最小となる係数 $\alpha^{h+1,i+1}$ を算出する。ただし、 $u=0, 1, \dots, m(s+r+1)-1$ である。

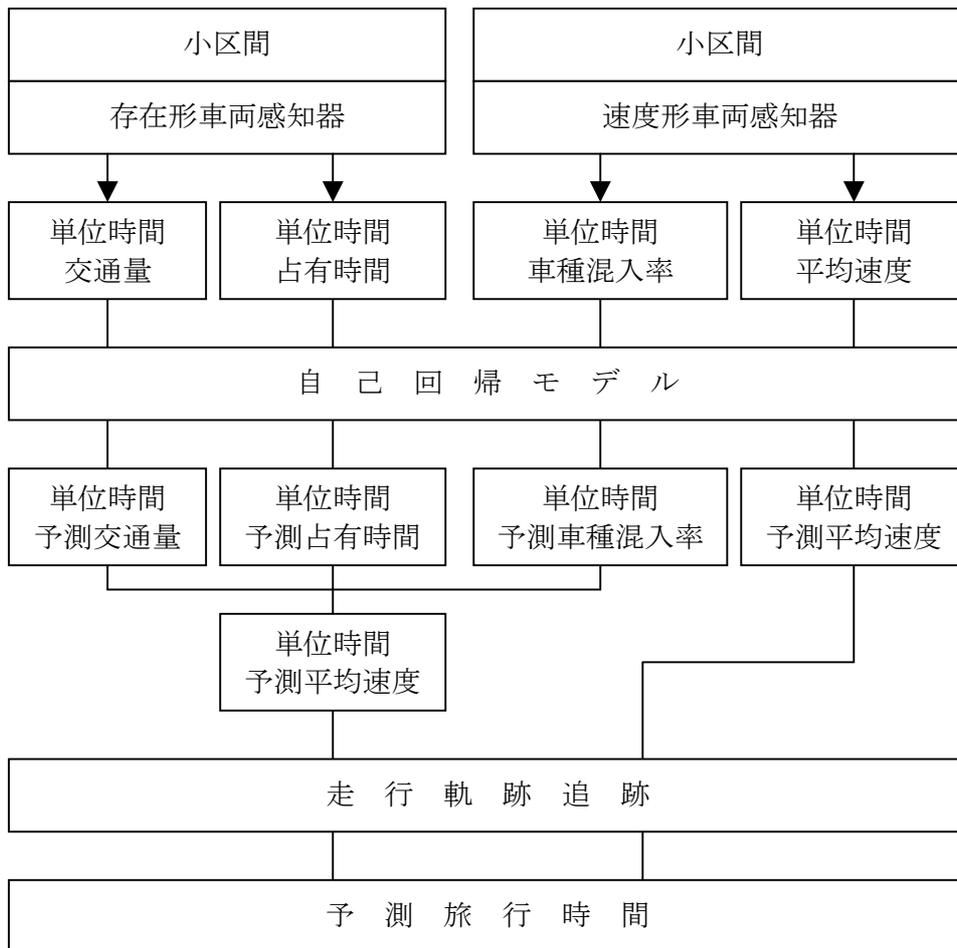


図 2.4.3 自己回帰モデルによる旅行時間予測

以上によって、未来の車両感知器の計測データを予測し、その予測値を式(2.3.1)に適用することにより予測平均速度を算出し旅行時間の予測値を算出する。なお、旅行時間予測値算出においては、図 2.4.4 に示すように、走行に伴う時間経過を考慮した時間追従方式（軌跡追跡方式と呼ばれることもある）を採用する。

時間追従方式は、2.4.1 項で説明した同時刻和方式と対比されるものである。小区間 k の時刻 t における予測平均速度を $V_k(t)$ とすると、時間追従方式においては、出発時刻と予測平均速度を用いて、走行に伴う時間経過を考慮しつつ図のような走行軌跡を算出する。このように、時間追従方式は走行に伴う時間経過を考慮するため、実際の走行軌跡に近いものが得られると考えられる。したがって、より正確な旅行時間を得るためには、同時刻和方式よりも

有利であると言える。

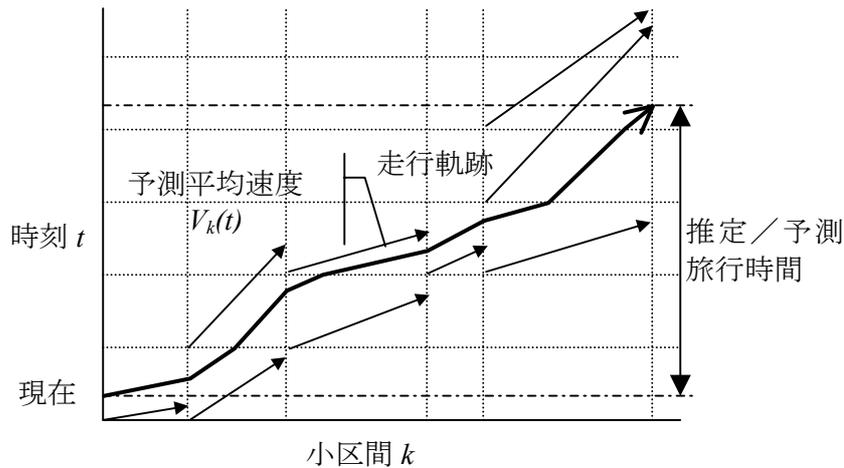


図 2. 4. 4 時間追従方式による旅行時間算出

2. 4. 3 砂時計モデル²¹⁾²²⁾

このモデルでは、感知器が設置された小区間を単位として、渋滞部と非渋滞部に分けてそれぞれで旅行時間を算出した上で合算することにより小区間の旅行時間を推定し、さらに連続する各小区間の推定旅行時間について同時刻和方式により任意区間の旅行時間を推定するものである。

渋滞部における推定モデルは、砂時計の原理に基づき、渋滞部の存在台数（待ち行列台数） E を交通量 Q で除することにより旅行時間を推定するものである。存在台数 E は渋滞長 L と交通密度 K の積で表されるので、渋滞部の密度 K を交通量 Q の一次関数で与えることにより、複数の小区間からなる区間における渋滞部の旅行時間 T_j は次式により推定される。

$$T_j = \frac{E}{Q} = K \cdot \frac{L}{Q} = \sum_i (k_m - a \cdot Q_i) \cdot \frac{J_i}{Q_i} \quad (2. 4. 5)$$

i : 小区間（感知器勢力範囲）

Q : 交通量[台/秒]

J : 渋滞長[m]

L : 区間長（設定値）[m]

k_m : ジャム密度（停止時の最大密度）[台/m]

a : 係数[秒/m]

ここで、パラメータである k_m と a は回帰分析により求められる。

一方、非渋滞部における旅行時間 T_f は、渋滞部に比べて値が非常に小さいことから、区間長を予め設定した旅行速度で除することにより算出される。そして、求めるべき区間の推定旅行時間は、渋滞部の旅行時間 T_j と非渋滞部の旅行時間 T_f の和である。

次に、上式で得られる小区間ごとの推定旅行時間を用いて予測旅行時間を算出する。まず、現在時刻 t において、小区間ごとの推定旅行時間を同時刻和方式により予測対象区間の旅行時間 $T_e(t)$ を得る。そして、未来の時刻 $(t+p)$ における旅行時間の予測値 $T(t+p)$ は、次式に示す

ように、現在時刻 t に関する推定旅行時間 $T_e(t)$ の統計値 $T_{es}(t)$ との差分を求め、これを出発時刻 $(t+p)$ を基準とする実測統計値 $T_{rs}(t+p)$ (AVI による実測値または感知器による時間追従方式で得られた推定値の統計値) に加えることによって得られる。

$$T(t+p) = T_{rs}(t+p) + T_e(t) - T_{es}(t) \quad (2.4.6)$$

この予測モデルの部分は、次項にて述べる統計予測モデルと類似した方式となっている。

2.4.4 統計予測モデル²³⁾²⁴⁾

この予測モデルは、一日の旅行時間の変化が曜日等の日種によってほぼ一定の変動パターンで推移するとの仮定に基づき、予測用の統計旅行時間データにより未来の旅行時間を予測するものである。杉村ら²³⁾、田中²⁴⁾は、特に、AVI によって計測される旅行時間情報を利用した予測モデルを提案している。この予測モデルは、大阪府警²³⁾²⁴⁾や愛知県警²⁵⁾で実績がある。

AVI によってリアルタイムに計測される旅行時間は、到着地点に車両が到着した時点の旅行時間 (到着地規準旅行時間: 以下、到着旅行時間) であるが、ドライバーが知りたい情報は、出発地点を通過する時点における到着地点に到着するまでの旅行時間 (出発地規準旅行時間: 以下、出発旅行時間) である。出発旅行時間と到着旅行時間の関係を図 2.4.5 及び図 2.4.6 に示す。現在時刻 t_1 においては、これまでに得られている当日の出発地旅行時間の実績値としては出発地点通過時刻 t_0 ($t_0 < t_1$) までである。なぜなら、出発した車両の旅行時間を得るにはその車両が到着していなければならない、それまでに要した時間が経過しているからである。一方、到着旅行時間については現在時刻 t_1 までが得られており、これまではこの最新の到着旅行時間である $T_d(t_1)$ を上流側に設置された情報板に表示することでドライバーに提供することがあった。しかしながら、朝の通勤時間などの渋滞ピーク時には交通状況が大きく変化するため、図 2.4.6 に示すように出発旅行時間に対して到着旅行時間が大きく遅れることにより誤差が大きくなるという課題があった。この統計予測モデルでは、ドライバーが知りたい情報である現在時刻 t_1 における出発旅行時間 $T_u(t_1)$ を予測するものである。

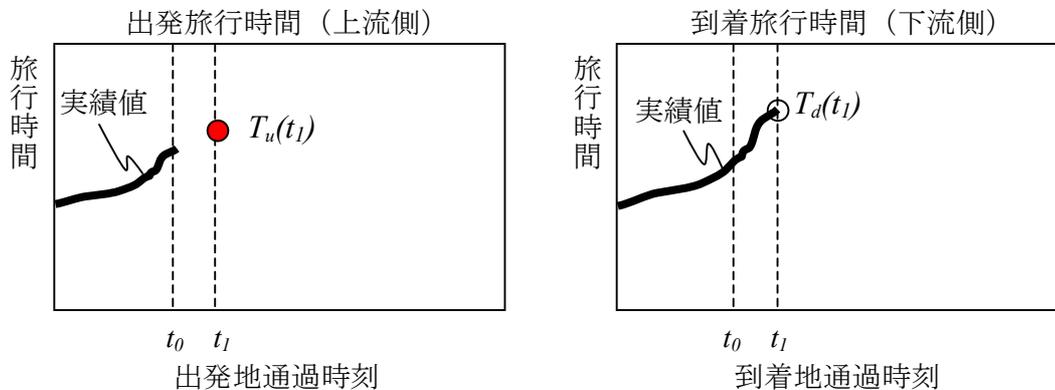
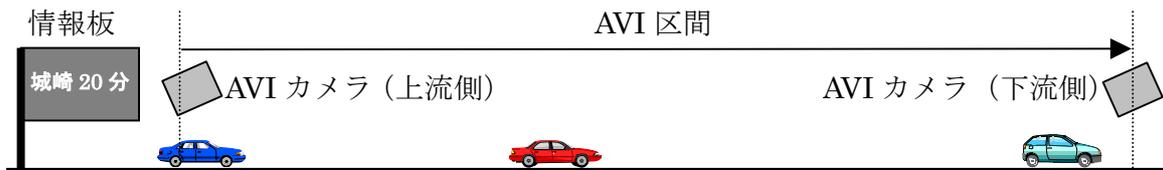


図 2.4.5 AVI システムによる旅行時間提供の課題

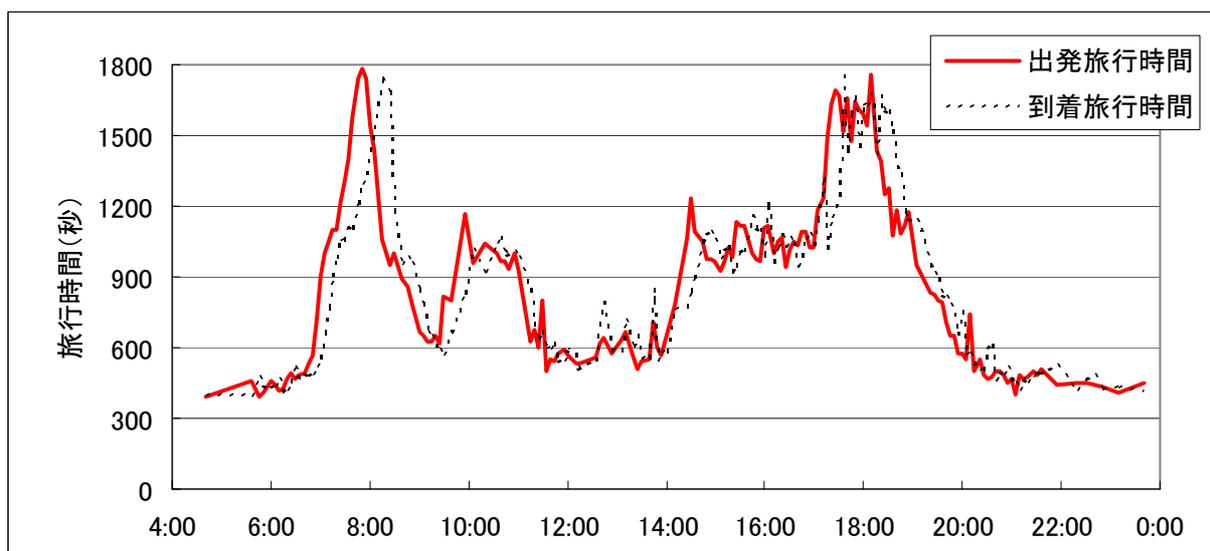


図 2.4.6 出発旅行時間と到着旅行時間

到着旅行時間及び出発旅行時間に関する統計データは、AVI によって前日までに計測された日々の旅行時間変動データから作成される。この統計データは、例えば平日、休日、土曜日、特殊日といった日種ごとに作成される。予測方法としては、図 2.4.7 に示すように、現在時刻 t_1 において得られている最新の到着旅行時間の実績値 $T_d'(t_1)$ と同時刻の統計値 $T_d(t_1)$ 、及び予測時 $t (=t_0+5 \text{ 分})$ における出発旅行時間の統計値 $T_u(t)$ を用いて、次式にて予測時における出発旅行時間の予測値 $T_u'(t)$ を求める。

$$T_u'(t) = \frac{T_d'(t_1)}{T_d(t_1)} \cdot T_u(t) \quad (2.4.7)$$

この予測モデルは、現在時刻 t_1 における到着旅行時間の実績値と統計値の比が、同じ時刻における出発旅行時間に対して類似しているという仮定に基づいた手法と言える。

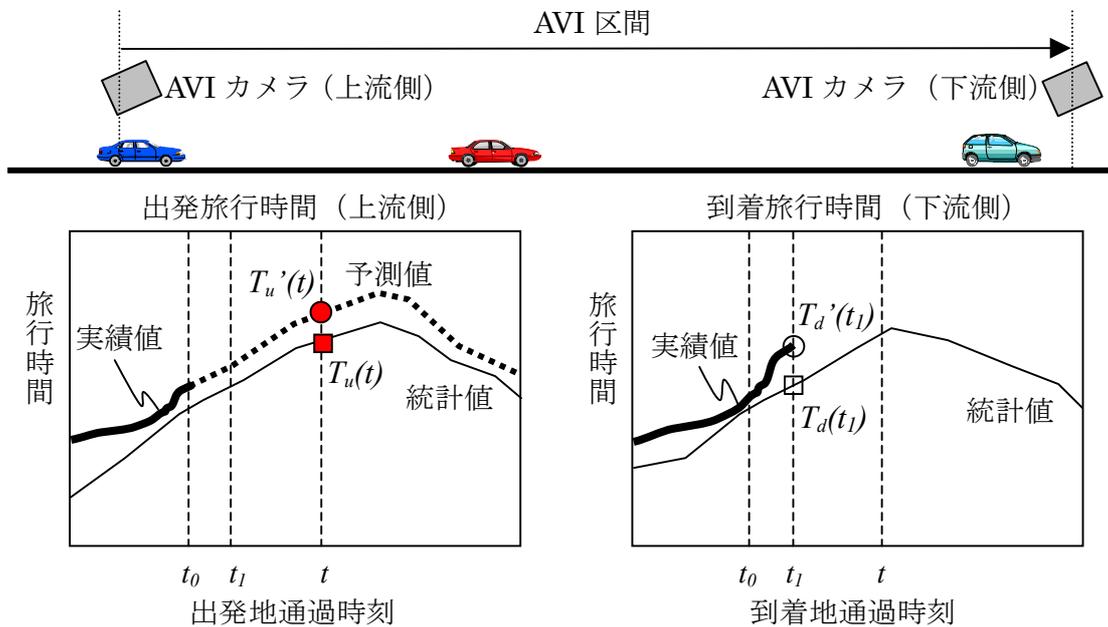


図 2.4.7 統計予測方式の概念

2.4.5 ニューラルネットワーク応用モデル

大場ら²⁶⁾は、車両感知器から得られる交通量、車速、密度のデータを元に、時系列処理によってモデリング及びモデル学習を行うニューラルネットワークを応用した旅行時間予測手法を提案している。

この手法においては、入出力間の静的な写像関係を学習する階層形ニューラルネットワークに対して動的な写像関係を学習させるよう改良した混合構造形ニューラルネットワークを適用している。この予測手法の概念図を図 2.4.8 に示す。混合構造形ニューラルネットワークの入力は、車両感知器から得られる計測情報（交通量及び占有率）より推定計算される区間速度を用いて計算される区間旅行時間である。教師信号としては、AVI システムで計測される旅行時間の実測値を利用して学習を 1 時間ごとに行い、各区間旅行時間に関する重み係数を調整する。このようにして求めた重み係数を用いて、リアルタイムの区間旅行時間を入力とすることで、予測対象区間（AVI 区間）の旅行時間を予測する。

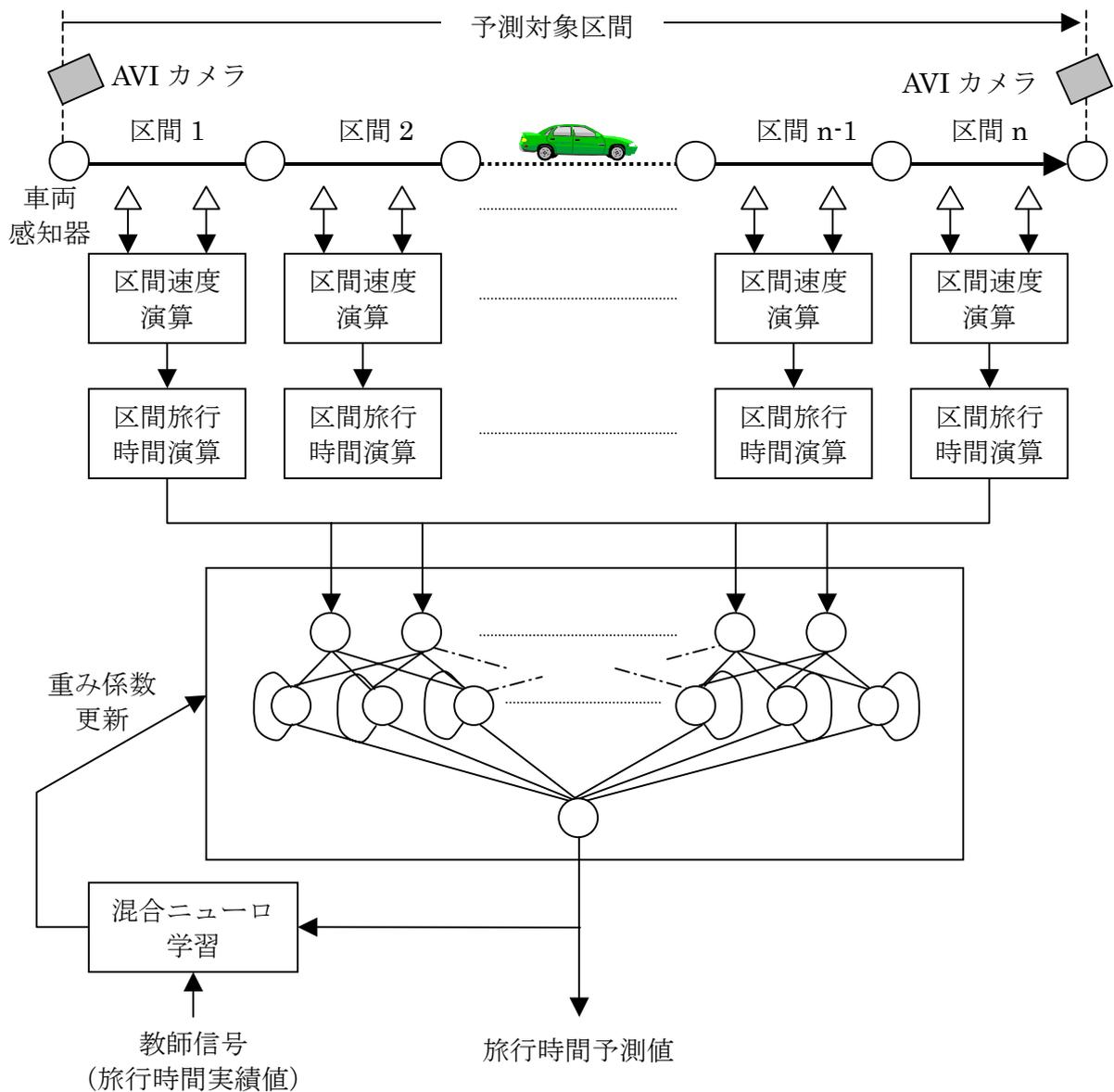


図 2.4.8 混合ニューロ応用旅行時間予測手法の概念

2.4.6 信号交差点の遅れ時間を考慮した推定モデル²⁷⁾

1977年にGipps²⁸⁾が初期モデルを提唱し、それをGault and Taylor²⁹⁾が単純化した。初期モデルは次式で表されるような、レジスター時間と占有率（オキュパンシー）に関する2次元回帰モデルである。

$$T = a + (1 - \delta)(b_{10}t^* + b_{01}\phi + b_{20}t^{*2} + b_{11}t^*\phi + b_{02}\phi^2) + \delta(c_{10}t^* + c_{01}\phi + c_{20}t^{*2} + c_{11}t^*\phi + c_{02}\phi^2) + \varepsilon \quad (2.4.8)$$

ここに、

T : 旅行時間

T^* : $t - (C - G + lag)$

ϕ : 占有率 (オキュパンシー) のレベル

t : レジスター時間

C : 下流信号のサイクル長

G : 下流信号の青信号時間

R : 下流信号の赤信号時間

lag : 車両感知器から交差点の停止線までに要する平均旅行時間

$\varepsilon : N(0, T^2)$ である乱数

$a, b_{10}, b_{01}, b_{20}, b_{11}, b_{02}, c_{10}, c_{01}, c_{20}, c_{11}, c_{02}$: パラメータ

$\delta = 0 (t \leq R)$

$\delta = 1 (t > R)$

である。レジスター時間 t は車両が車両感知器を通過してから下流交差点の停止線を通過し終えるまでの時間を表し、図 2.4.9 のような関係になっている。

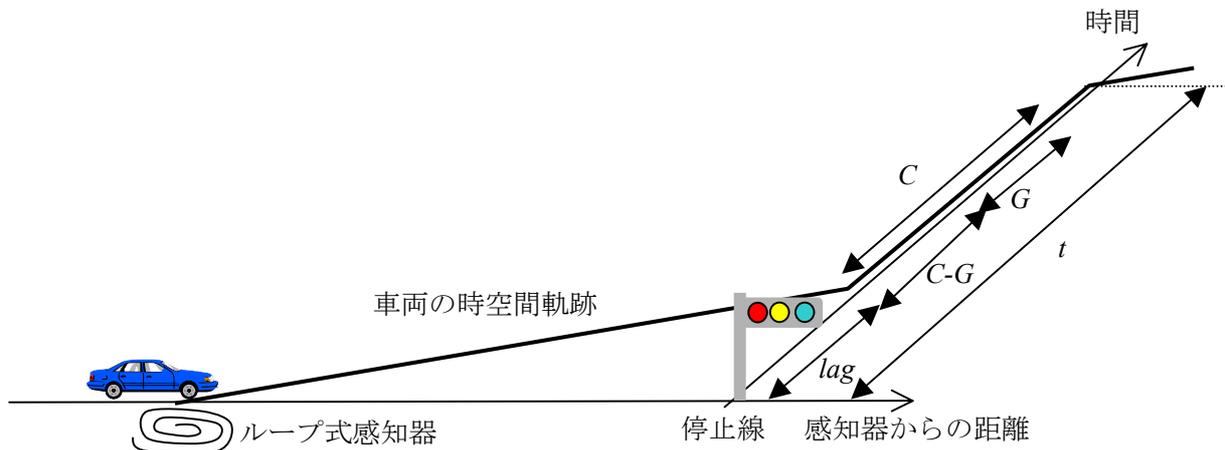


図 2.4.9 遅れ時間を考慮した旅行時間推定モデルにおけるパラメータの関係図

そして、初期モデルを近似するように単純化したモデルとして次式が最終的に報告されている。

$$T + (1 - \delta)t^* = a + (1 - \delta)b_{01}\phi + \delta(c_{10}t^* + c_{01}\phi) \quad (2.4.9)$$

そして、Gault and Taylor によって、式(2.4.7)をさらに簡便化されたものが次式である。

$$T = (1 - \delta)at^* + \delta g^{1.6} + K \quad (2.4.10)$$

ここに、 a, g, K は、いずれもオフセット、遅れのない旅行時間 (=リンク長/設計速度)、飽和交通流率から構成される関数として表現されるパラメータである。シミュレーションの結果からそれぞれの関数を同定することができる。

2.4.7 非線形時系列予測モデル

この予測手法は、D'Angelo et al.³⁰⁾によって米国のフリーウェイ向けに提案されたものである。ダブルセンサタイプのループ式車両感知器より得られる速度データを用いる。この時系列速度を V_1, V_2, \dots, V_t と表す。サフィックスは時間帯を表す。予測速度として次式でモデル化する。

$$V_{t+1} = (3^{\alpha_t} - 1)V_t - V_{t-1} \quad (2.4.11)$$

ここに、 α は局所ヘルダー指数³¹⁾である。この局所ヘルダー指数は、データ集合の凹凸を表現するもので、 $\alpha = 1$ は、完全に定常状態にあって2つ前の時間帯から同じ変化率で変化することを表す。

また、この非線形モデルは、次式で与えられる自励型自己回帰モデル (SETAR モデル: Self-exciting threshold autoregressive model) に属する。

$$V_t = a^{J_t} V_{t-1} + b^{J_t} V_{t-2} \quad (2.4.12)$$

ここに、 J_t は V_t とは独立かつランダムに変化する独立系列であり、典型的な例では、状態数が有限なマルコフ連鎖としてとらえられるものである。また、局所ヘルダー指数 α は、次式で表される。

$$\alpha_t = \log_3 \left(\frac{V_{t-1} + V_t + V_{t+1}}{V_t} \right) \quad (2.4.13)$$

V_{t+1} を求めるには、まず $V_0 \sim V_t$ を与えて $\alpha_0 \sim \alpha_{t-1}$ を求める。次に α_n の予測値である $\hat{\alpha}_n$ を求める。そして、式(2.4.11)より未来の予測旅行時間を算出する。なお、 α_n の予測においては、マルコフ連鎖であると仮定し、次のような統計的手法によって求める。

$\{\Gamma_j\} j=1,2,\dots,I$ は、 $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$ における等間隔の区切りとして、与えられた整数 I 及び H のもとに、次式で表される状況確率を算出する。

$$p_j = P_r(\alpha_t \in \Gamma_j | \alpha_{t-1}) \quad (2.4.14)$$

上式はヒューリスティックな手法である。 H は時刻 t より前にある α 値の数である。次に、確率 P_j を最大化する j, I, H として j_0, I_0, H_0 をそれぞれ算出する。そして求めるべき $\hat{\alpha}_n$ は、 Γ_{j_0} の中間点とする。

以上のようにすれば、ループ式車両感知器より得られる速度データを用いて未来の旅行時間を予測することができる。

2.5 プローブ情報を用いた旅行時間の推定

情報通信システムの普及に伴い、最近ではプローブカーによって計測された情報（プローブ情報）を用いることにより、交通情報サービスをはじめとする様々な活用が提案・実施されている。本項では、プローブ情報を用いた旅行時間推定に関するいくつかの既存の研究事例について報告する。

2.5.1 IPCar 実証実験³²⁾³³⁾³⁴⁾

IPCar 実証実験は、(財)自動車走行電子技術協会 (JSK, 現 (財)日本自動車研究所 (JARI : Japan Automobile Research Institute)) が 1999 年度 (平成 11 年度) より実施しているプローブ情報システムの実証実験である。2000 年度 (平成 12 年度) にはセンタシステムを構築し、約 300 台のプローブ車両を使ったデータ収集実験 (IPCar12) を実施し、2001 年度 (平成 13 年度) には旅行時間情報提供の高度化としてデータの収集, 加工等に関して技術的な検討がなされた (IPCar13)。

(1) データ収集

IPCar12 では 30 秒の一定間隔でプローブ車両の走行位置と状態を記録していた。これに対して堀口³⁵⁾は、IPCar13 において図 2.5.1 に示すようなショートストップ (SS: 停止状態) とショートトリップ (ST: 走行状態) の 2 つの状態が切り替わる走行イベントを基本の記録間隔とし、さらに 2 秒間隔の走行速度情報も記録している。また、IPCar13 では、この他にもウインカーの状態やパーキングブレーキの状態も記録されている。

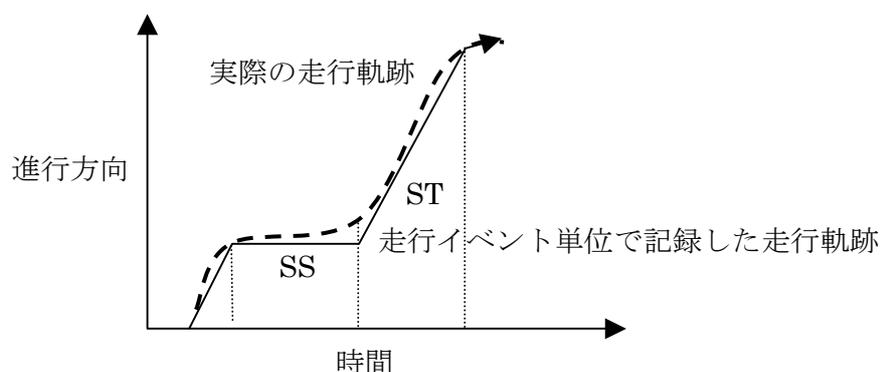


図 2.5.1 SS/ST で記録されるプローブカーの走行軌跡

(2) データ加工

プローブ情報の生データには、次のような原因によって旅行時間として加工されるべきでない不適切な情報が含まれている。

- ・ GPS 信号が十分に捕捉できず位置が精度よく同定されない
- ・ トリップ途中における駐車やUターンなど想定外の挙動による影響

IPCar13 では、こういった不適切なデータを除去または訂正する (クレンジング) 手法と

して次の処理をおこなっている。

(a) 記録ギャップの検出

プローブ情報の時間的な不連続を検出し、エンジンオフによるものはトリップエンド、それ以外は通信時のエラーとみなす。

(b) GPS 異常区間の検出

GPS 信号が捕捉できず、位置が同定されなかった区間を除去する。

(c) 駐停車挙動からのトリップエンド推定

SS とウィンカーなどの並行イベント情報を利用して運行状態を解釈し、エンジンが稼働している状態でのトリップエンドでの駐停車を推定する。

(d) Uターンやループする軌跡でのトリップエンド推定

SS と並行イベント情報では抽出されないトリップエンドに対して、地図上での軌跡形状の特徴から推定する。

(e) マップ照合 (マップマッチング) 不正区間の補正

IPCar12 の照合アルゴリズムでは、もっとも近い道路に照合する簡易なものであったため並行する道路に誤って照合されることが頻出したが、IPCar13 ではトリップ軌跡の近傍にあるリンクほど小さいコストを与えてトリップ起点から終点まで最短経路探索を行うアルゴリズムで照合し誤りを訂正する。

(3)加工情報の精度

横浜市鎌倉街道にて走行経路が特定できているデータを対象に推定経路の精度を比較したところ、街道沿いを道なりに走行した場合の道路特定率 (合致率) は 99.6%であったが、迂回ルート走行時においては 65.9%~99.0%とばらつきがあり平均では 80%程度であった。また、ウィンカー情報を使うことで精度がよくなった。迂回時の推定経路について精度向上が課題である。

(4)データ通信量

IPCar12 においては、30 秒に 1 回データを記録するため 1 時間当たりのデータ記録数は 120 回であった。IPCar13 においては、前述の SS, ST というイベント単位に収集する手法を用いたが、実績値としては 158 回であった。これは、ウィンカーなど SS, ST 以外の並行イベント情報が含まれているためと考えられ、SS, ST だけの記録数実績値では 116 回であり、IPCar12 に比べて 4 回 (3.3%) の効率向上であった。

この実証実験では、NTTDoCoMo 社のパケット通信網を利用してプローブ情報を送信しており、通信ログから試算された通信量を表 2.5.1 に示す。この試算によれば、プローブカー 1 台 1 ヶ月当たりの負担金額はかなりの高額になるため費用対効果を考慮すると、いっそうのデータ収集の効率化とより付加価値の高い情報の創生が課題と考えられる。

表 2.5.1 実証実験における通信量の試算結果³³⁾

	タクシー(137台)	バス(68台)
パケット量/日(平均)	2,101	1,555
パケット量/日(最大)	2,781	2,214
稼働日数(予測)	30	30
パケット料金*/月・台(平均)	7,000円	5,310円
パケット料金*/月・台(最大)	10,019円	7,468円

*契約料金プランはパケットプラスS

2.5.2 カーナビを用いたプローブカーシステム³⁶⁾³⁷⁾

本田は、2003年秋より、Internavi Premium Club³⁸⁾という独自のテレマティクスサービスの中で、一般車両を用いたフローティングカー(プローブカー)システムを運用している。

このシステムにおいては、プローブカーが収集対象リンクを走行した際に、そのリンクの旅行時間を計測してカーナビの記憶領域(HDD)に保存しておき、そのプローブカーユーザが交通情報をオンデマンドで入手する際に、保存したプローブ情報を情報センタに携帯電話を用いて送信する。したがって、ユーザのアクセス頻度によっては、必ずしもリアルタイム情報を収集できないこともある。また、プローブ情報を提供する会員に対してのみ、他のユーザが収集したプローブ情報からの旅行時間情報を提供する、Give & Takeの利用形態を採用している。

カーナビを用いてプローブ情報をリンク単位に収集させるようにしていることが特徴で、プローブ情報の収集対象リンクに関する情報を予め地図データの中に持っている。プローブ情報の収集対象リンクは、VICSリンクにおいて情報が提供されていないリンクや渋滞度は提供されているが旅行時間が提供されていないリンクの他に、VICSリンク以外の道路リンクでも交通情報が必要と思われるリンクを独自に設定している。この収集対象リンクを、VICSで提供されていないリンクに限定することで収集データ量の低減を図り、情報提供時にはVICSとプローブ情報を組み合わせて効率的に広範囲の交通情報を提供している。一般的に実施される緯度・経度単位に情報収集する方式に比べ、リンク単位に収集する方式は収集するデータ量を削減できる効果があると考えられる。

2.5.3 欧州におけるプローブカーシステム³⁹⁾⁴⁰⁾

欧州における代表的なプローブカーシステムにITIS Holdingsによるシステムがあり、2000年より運用開始されている。ロードサービス車両(AA)、長距離バス(National Express)、トラック(Eddie Stobart)の合計5万台以上からプローブ情報を収集している。収集したプローブ情報から旅行速度情報に変換することにより、渋滞をモニタリングすることを試みている。プローブ情報からリンク旅行速度への変換には次の特徴がある。

(a) デジタル道路ネットワーク

渋滞をモニタリングするという目的に対応するため、マイナーな道路を対象とせず高速道路を中心とする主要道路ネットワークのみを対象としている。これにより、複雑な交差点、ジャンクションの表現などを避け、単純化している。

(b) 初期データフィッティング

位置データを道路のもっとも適当な区間の中央にフィッティングする。位置精度の疑わしいデータは、同じリンクの他のデータを参照することでその位置の可能性を判定する。そして、異常データを除去する。

(c) 旅行速度の算出

リンクを最大 50m の区間に区切り、GPS の位置を各区間に割り当てる。各ペアの位置の距離から旅行速度を算出する。

(d) プローブ情報の収集間隔

最大 1 分の固定周期である。

2.5.4 プローブ情報と旅行時間の品質

Van Aerde et al.⁴¹⁾及び Mochizuki et al.⁴²⁾は、単位時間当たりのプローブ情報の数（プローブ情報密度）が増加するにつれて得られる旅行時間の信頼性が向上することを示した。これはサンプル数が増えるとサンプル平均が全体平均に近づくという実験結果によるものである。したがって、プローブカーが十分に普及することが重要であると言える。

Ishida et al.⁴³⁾や Green, M.W et al.⁴⁴⁾など多くの報告によれば、プローブカーのサンプル数と得られる旅行時間の品質の関係を明らかにしており、交通情報サービス向けに実用的なレベルの品質を確保するために必要なプローブカーの台数が提言されている。

一方、リアルタイム交通情報を提供するためには、プローブ情報を携帯電話など広域エリアで利用可能な通信手段を使って交通情報センターまで送信することになり、運用コストが必要となる。したがって、費用対効果を十分に考慮しなければならない。Taylor et al.⁴⁵⁾は、GPS に基づくプローブカーを用いて 1 秒単位にプローブ情報を得ており、また、Aoki et al.⁴⁶⁾も IPCar12 において 30 秒の固定周期でプローブ情報を得ていた。上記多くの研究事例から明らかなように、プローブ情報の収集間隔が短ければ、すなわち収集密度が高ければ、より精度の高い旅行時間が得られると考えられるが、その分通信コストがかかってしまう。さらに、多くのプローブ情報をリアルタイムに処理するのに高性能な計算機を必要とするという意味においてもコスト面が課題となる。しかし、実際にはほとんどのプローブ情報は、交通状況がほとんど同じようなデータであり、無駄が多くなる。Demir et al.⁴⁷⁾は、これに着目し、既存の放送型の交通情報サービスとプローブカーを次のように組み合わせることを提案している。交通情報センターから放送で過去のリンク旅行時間を提供しておき、一方プローブカー自身でリンク旅行時間を計測する。両者の旅行時間の差が、予め定められた閾値を超えた時のみプローブカーから計測した旅行時間を交通情報センター送信することにより効率化を図っている。Simons et al.³⁹⁾が述べたように、トラックや長距離バスなどの業務車両は、プローブ情報の収集量の観点で営業車両の 10 倍、一般車両の 30 倍の能力があり、プローブカーとしては利用価値が極めて高い。しかし、業務車両に搭載する車載機の多くは、コストを抑えるため、リンクベースの道路地図データを搭載しない簡易なものであることが多い。そのため、上記の効率的なプローブ情報送信方法が適用できる場面はほとんどないのが実情である。

Wada et al.⁴⁸⁾は、一般的に使われる固定周期での収集に代わって、IPCar13においてイベントベースの収集方法を提案している。この方法は、すでに述べたように、ショートストップ (SS:停止状態) とショートトリップ (ST:走行状態) の2つの状態が切り替わる走行イベントを基本の記録間隔とするものである。しかし、旅行時間の品質において、この方法が従来の固定周期収集法に比べて精度が向上するかどうかにについては明らかにされていない。

また、プローブカーの必要台数に対して、プローブカー1台当たりの情報収集量、すなわち情報収集頻度に関する必要量を明らかにすることも重要な課題である。Goto et al.⁴⁹⁾及びNanthawichit et al.⁵⁰⁾は、交通流シミュレータを用いてプローブ情報の収集周期をいくつか変えて得られる旅行時間の品質の関係について示した。しかし、シミュレータでは実際のプローブ情報における位置精度の問題を考慮しないため、実際のプローブ情報を用いた場合と状況が大きく異なる可能性がある。したがって、実際のデータを用いた評価が重要である。

2.6 VICS 情報を用いた旅行時間の予測

2002年に改正道路交通法が施行されて以降、VICS 情報を加工して新たな情報を提供することが可能になった。中でも未来の旅行時間を提供する、いわゆる予測旅行時間提供サービスが注目されている。この旅行時間予測に関する研究事例として代表的なものについて報告する。

2.6.1 パターンマッチングを用いた旅行時間予測

柘植ら³⁶⁾、割田ら⁵¹⁾、舟橋ら⁵²⁾などの研究報告に見られるように、現状ではもっともよく使われている手法である。この予測手法の根拠となっている考え方は、現在の直前における交通状況が過去の状況と似ていれば、未来の交通状況も似ているという仮定に基づく。

この予測手法の概念図を図 2.6.1 に示す。この手法では、過去の履歴情報としてリンク旅行時間情報を蓄積しておく。次に、リアルタイム処理の中で、現在時刻から所定の過去までのマッチング時間幅 t_m におけるリンク旅行時間に関する現在パターンを抽出し、この現在パターンを所定の検索時間幅 t_s において、過去の履歴情報から差と傾きを比較しながら最も近い過去パターンを抽出する。このマッチング手法については、区間旅行時間の二乗誤差が最小となる日を抽出する例もある。また、マッチングの空間的な範囲として、予測対象リンク自身だけではなく、ボトルネックとなるリンクを対象とする例もある。そして、マッチングにより抽出された過去パターンに関して、現在時刻以降のリンク旅行時間を予測当日の未来の予測旅行時間として取り出す。

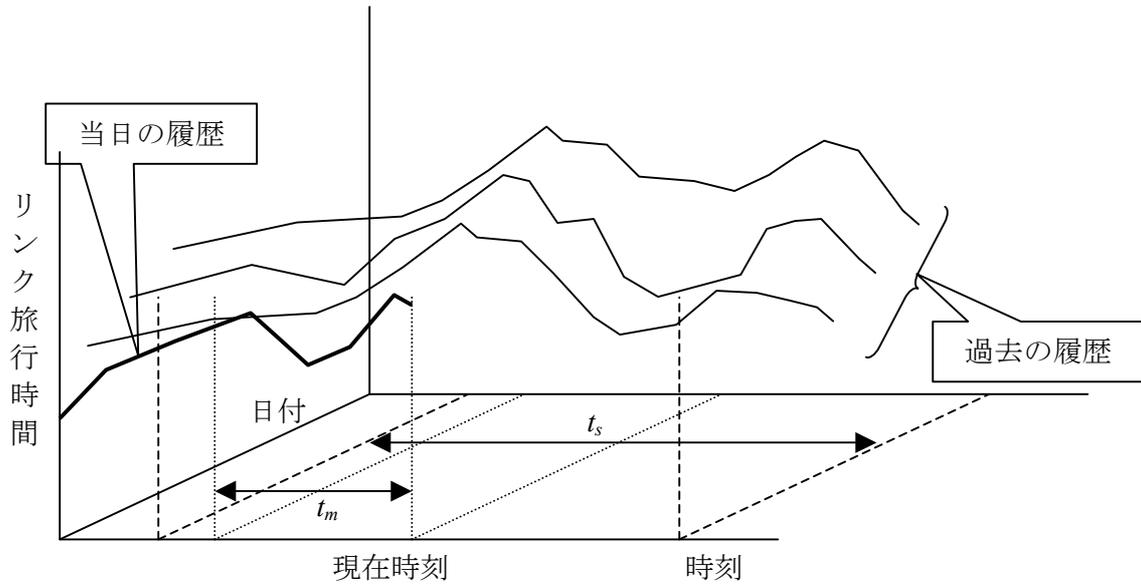


図 2.6.1 旅行時間パターンマッチングの概念図

パラメータ要素としては、マッチング時間幅 t_m 、検索時間幅 t_s 、検索対象となる履歴情報の期間などがある。柘植らの報告によれば、マッチング時間幅 t_m として数十分としている。割田らの報告によれば、マッチング時間幅 t_m 、検索時間幅 t_s としてそれぞれ 2 時間、検索対象となる履歴情報の期間として 2 年間としている。また、舟橋らはこれらのパラメータを変更しながら予測精度の評価を行っており、その結果によれば、マッチング時間幅 t_m として 30 分、検索時間幅 t_s として前後 30~60 分がもっとも良好であった。上記それぞれのパラメータ値からわかるように、実際には地域やリンクによって特性が異なると考えられ、それぞれで適切に調整すべきものであると考えられる。

2.6.2 決定木を用いた渋滞予測⁵³⁾

曜日、時刻、渋滞度といった非計量的なデータを対象としたパターン認識の手法として決定木(Decision Tree)⁵⁴⁾が知られている。この手法を渋滞状況パターンに適用することで予測するものである。

この手法では、まず、リンクをリンク素片として分割する。VICS 情報に含まれる渋滞情報は、このリンク素片単位に渋滞度を表す数値（1 = 渋滞なし，2 = 混雑，3 = 渋滞）の組の時系列データとして与えられる。そして、過去の時系列データを学習データとして、未来における渋滞度を表す数値の組を予測する。決定木の分岐を決める特徴量としては、①曜日，②時刻，③五十日，④現在の渋滞パターン，⑤現在から所定の過去までの渋滞パターンとしている。特徴量⑤における対象とする過去のステップ数と学習データの期間がパラメータである。この研究事例では、対象とする過去のステップ数として 1，学習データの期間として 3 ヶ月で十分としている。

木の分割を評価する基準として情報量利得比を採用している。この基準による決定木の分割方法は次の通りである。まず、集合 S の情報量 $i(S)$ は次式で表される。

$$i(S) = -\sum_{j=1}^k \frac{\text{freq}(C_j, S)}{|S|} \cdot \log_2 \left\{ \frac{\text{freq}(C_j, S)}{|S|} \right\} \quad (2.6.1)$$

ここで、 $\text{freq}(C_j, S)$ は、集合 S におけるクラス C_j に所属する事例数であり、 $|S|$ は集合 S の全事例数である。一般的に集合 S を条件 X で複数の集合 S_i に分割した後の情報量 $i_x(S)$ は次式で表される。

$$i_x(S) = -\sum_{i=1}^n \frac{|S_i|}{|S|} \cdot i(S_i) \quad (2.6.2)$$

次に、集合 S の情報量 $i(S)$ の定義から、 S を n 個の部分集合へ分割すること自体によって得られる情報量（分割情報量）を次式で定義する。

$$\text{split}_i(X) = -\sum_{j=1}^k \frac{\text{freq}(C_j, S)}{|S|} \cdot \log_2 \frac{|S_i|}{|S|} \quad (2.6.3)$$

分割前の情報量と分割後の情報量との差（情報量利得） $G(X)$ は、式(2.6.2)より、次式のように与えられる。

$$G(X) = i(S) - i_x(S) \quad (2.6.4)$$

よって、情報量利得の分割情報量に対する比（情報量利得比） $G_r(X)$ は、

$$G_r(X) = \frac{G(X)}{\text{split}_i(X)} \quad (2.6.4)$$

となる。

学習データの集合 S を用いて、上記した特徴量①～⑤までのそれぞれに対する情報量利得比を算出する。そして、この情報量利得比がもっとも大きい特徴量を木分割の基準とする。また、予測を有効に機能させるためには木分割の停止や枝刈りが重要であり、これを適切に処理することが必要である。

以上のように分割された決定木を元に渋滞状況のパターンを認識し、未来の渋滞状況を予測する。この手法では渋滞を予測するが、この予測された渋滞を旅行時間に変換することで予測旅行時間を得ることも可能である。

2.6.3 特徴空間射影を用いた旅行時間予測

熊谷ら⁵⁵⁾⁵⁶⁾が提案したこの手法は、曜日、祝祭日、季節、五十日など交通状況に影響を及ぼす多様な因子を加味して長期的な旅行時間予測を行うものである。その基本となる考え方は、例えば朝夕の渋滞に相当するような複数の基底データが日付に応じた各強度で合成され、旅行時間データを構成しているとの仮定に基づく。この考え方に基けば、旅行時間データは日付によって変化しない基底データと、日付によって変化する合成強度とに分解され、曜

日等の因子と関連付けて予測すべき情報は後者のみということになる。

この予測手法の概念図を図 2.6.2 に示す。基底データと合成強度への分解には、主成分分析を用いた特徴空間射影を利用する。合成強度に関する予測は特徴空間上で行われ、これは時系列旅行時間データに比べて低次元化されていることから予測モデルをコンパクトにできるという利点がある。特徴空間からの逆射影は、分解された基底データの合成による旅行時間データの復元に相当し、特徴空間上で予測された合成強度の逆射影により予測旅行時間を得る。

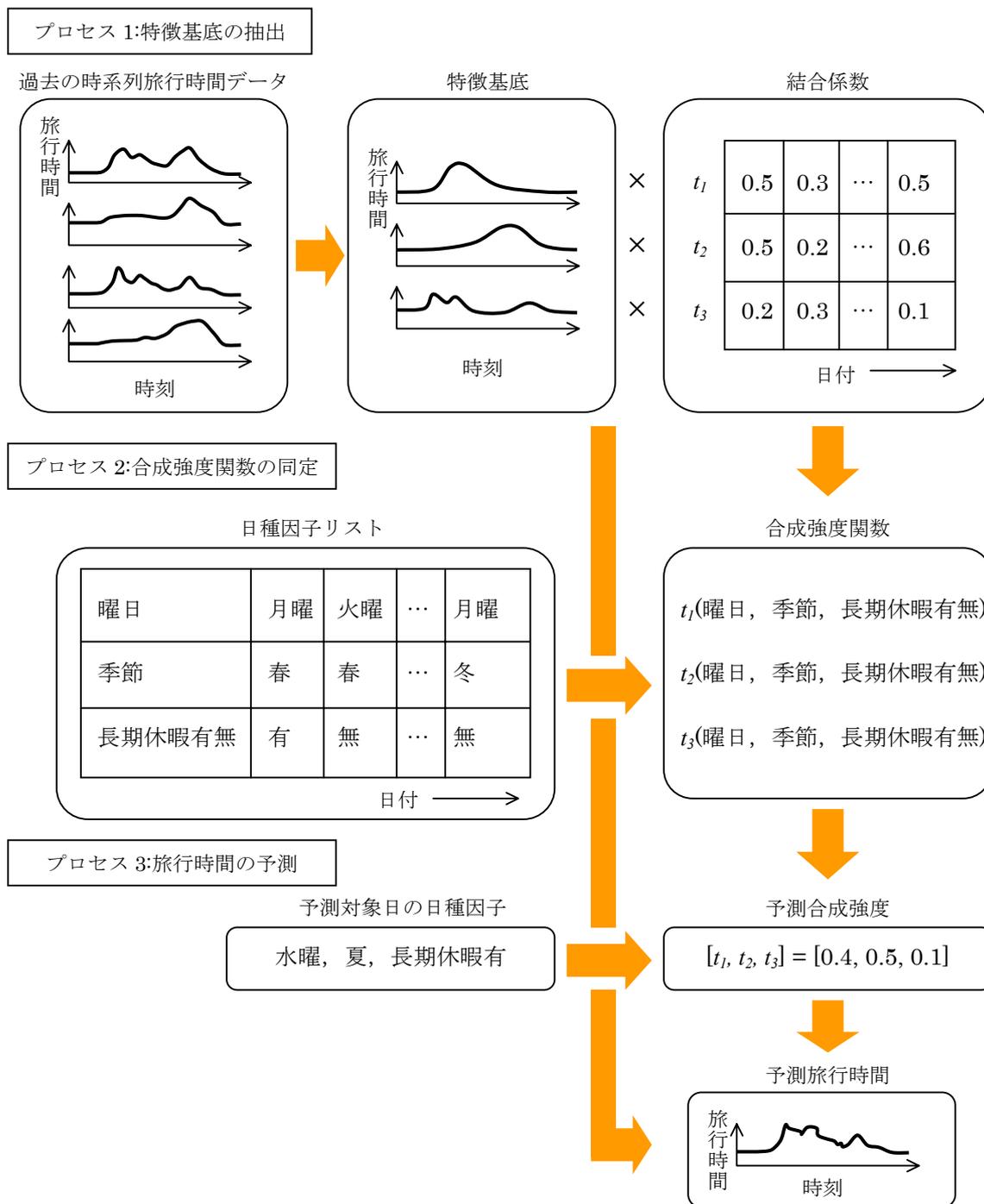


図 2.6.2 特徴空間射影を利用した予測手法の概念図

2.7 交通流シミュレーション

2.7.1 交通流シミュレーションの特徴⁵⁷⁾

道路交通流の問題について解を得る方法には、交通流の挙動（現象）を抽象化した理論モデル（数学的モデル）を使って解析的に解を求める理論的方法と、交通流の挙動について実験した結果を分析して解を求める実験的方法がある。交通流シミュレーションは、モデルによって実際の交通現象を表現しその結果を判断して解を求める実験的方法の一つであり、解析的には解けない複雑な交通現象を対象とし、コンピュータによって模擬する。交通流シミュレーションには次の特徴がある。

- ・ 多くの構成要素があるため多くの変数と関数を含む複雑な交通現象分析など解析的方法では取り扱うことが不可能あるいは困難である問題を取り扱うことができる。
- ・ モデルに対する感度分析を行うことが容易である。すなわち、モデルパラメータの値を変更してシミュレーション演算を繰り返すことによって結果がパラメータの変化に対してどれだけ敏感であるかを検討することができる。
- ・ 理論の仮定を容易に修正することができる。すなわち、新しい関数の追加・修正・削除が容易にでき、モデルの挙動が現実をよく反映するように常に調整しながら実験を進めることができる。
- ・ 時間的変動を取り扱う動学理論のモデルに適している。
- ・ 確率的変動要因を含む交通現象の分析が比較的容易にできる。

以上のような特徴を有することから交通流シミュレータは、ITS など新規に導入される道路施設、道路交通システム、あるいは交通施策に対して交通流の挙動を実験することによって安全性、円滑性、あるいは導入効果といった様々な視点で評価するのに使われることが多く、特に新システムの建設・導入が非常に高価であったり、非常に多くの時間を必要としたり、あるいは実際のシステムでの実験には大きなリスクを伴うものであるときには、交通流シミュレータを活用する場面が多く見られる。

また、一般に交通流シミュレータと呼ばれるものは、次のような交通流に影響を及ぼす要素モデル及び各種パラメータが含まれている。

- ・ 車両挙動モデル（車両追従，車線変更，停止，ドライバー運転モデルなど）
- ・ 経路選択行動モデル
- ・ 道路施設モデル（交差点，ランプ，料金所，交通容量，法定速度，信号など）
- ・ OD（Origin-Destination:起終点）交通需要
- ・ 交差点右左折率
- ・ その他

コンピュータ上に実装されるこれらのモデル、パラメータに従って実行した結果（出力）が渋滞や交通量などの交通状況を表す指標であり、実際の交通状況を再現するにはパラメー

タの緻密なチューニング(Verification 及び Validation)を行う必要がある。

2.7.2 既存の交通流シミュレータ

用途に応じて交通流シミュレータの適性は異なる。例えば、広域ネットワークを対象として評価する場合には、計算量や調整パラメータの多い離散型（一般にマイクロモデルが多い）は適さない。一方、個々の車両の挙動など詳細な評価を実施する場合には、流体型（一般にマクロモデルが多い）は適さない。このように用途に応じてシミュレータの適性は異なり、それゆえ用途が多種多様化している昨今においては、それだけ多くのシミュレータが生み出されている原因にもなっている。これまでにリリースされている主要なネットワーク対応シミュレーションモデルを表 2.7.1 に示す。

一般に流体型モデルは広域エリアを対応しやすいが、それでも都市内高速道路や都道府県の主要幹線道路に限定するなどの限界がある。したがって、火山噴火や大地震といった大規模災害発生時のように、影響範囲が広域となるエリアを対象とし、かつ対象道路も高速道路と一般道路の両方を扱う必要がある場合には、現実的な処理時間で対応できるシミュレーションモデルはほとんどない。

表 2.7.1 シミュレーションモデルの比較

モデル名	経路選択 行動モデル	タイプ	広域 対応	開発主体	発表年
AVENUE ⁵⁸⁾⁵⁹⁾	あり	流体+ 離散	困難	東京大、ITL、熊谷組ほか	1993
BOX モデル ⁶⁰⁾	あり	流体	やや難	京都大	1991
DEBNetS ⁶¹⁾	あり	離散	やや難	京都大、オムロン	1998
DYTAM-I ⁶²⁾	あり	離散	困難	科警研	1978
Paramics ⁶³⁾	あり	離散	困難	Edinburgh 大(英)	1993
SATURN ⁶⁴⁾⁶⁵⁾	あり	流体	やや難	Leeds 大(英)	1976
SOUND ⁶⁶⁾	あり	離散	やや難	東京大、ITL、松下ほか	1995
TRAF-NETSIM ⁶⁷⁾	なし	離散	困難	FHWA(米)	1971
AHS 交通シミュ レータ ⁶⁸⁾	なし	離散	困難	東芝、マツダ、日立ほか	1997
Sakura ⁶⁹⁾	あり	離散	困難	京都大、ニュージェック	2002
SIPA ⁷⁰⁾	あり	離散	やや難	国土交通省、日立、東京大	2001
TRAFFICSS ⁷¹⁾⁷²⁾	なし	離散	困難	日立	2000

2.8 既存研究の課題と本研究の位置付け

本章では、まずわが国で最も代表的な交通情報提供システムである VICS と、それを支える車両センサの概要について述べ、そして交通情報提供システムにおける既存の旅行時間推定・予測手法についてまとめた。本節では、これら既存の旅行時間推定・予測方式の課題を整理し、本研究の位置付けを明らかにする。

まず、車両センサの計測情報を用いた旅行時間の推定・予測手法について述べる。首都高方式、自己回帰モデル、砂時計モデル、ニューラルネットワーク応用モデル、非線形時系列予測モデルなど車両感知器の計測情報を用いた既存の旅行時間の推定・予測手法においては、いずれも車両感知器の影響範囲を感知器設置位置の中間点（あるいはその付近の交差点）で挟まれた区間で固定する小区間方式であるため、高精度化には車両感知器が多く必要であること、感知器影響範囲が固定のため実際の交通状況を必ずしも表現できないなどの共通課題があり、地方の一般道路を含めた広域な交通情報提供への適用性に課題がある。また、信号交差点の遅れ時間を考慮した推定モデルにおいては信号パラメータを利用するが、近年の信号システムにおいては、交通状況や時間帯等を考慮して動的かつ複雑に制御するようになっている⁷³⁾。これら複雑に変化する信号パラメータを利用する際に旅行時間推定のための各種パラメータを動的に算出する必要があることから計算処理時間に伴う時間遅れの課題がある。本研究では、3.2 節において、車両感知器の計測情報と AVI による実測旅行時間とを組み合わせることによって適切な車両感知器の影響範囲を決定し、高精度に旅行時間を推定する手法について述べる。また、本研究では、3.3 節において、AVI、超音波感知器、光ビーコンというわが国でもっとも普及している車両センサによる各計測情報の精度特性等を考慮し、これらの各計測情報を有効利用したそれぞれの推定手法について検討し、かつ各推定手法を動的・排他的に切り替えるハイブリッド方式を採用することにより、地方の一般道路を含めた広域エリアを対象とし、かつ高精度に旅行時間を推定する手法について述べる。

統計予測モデルやニューラルネットワーク応用モデルなど AVI によって計測される旅行時間情報を利用して未来の旅行時間を予測する手法においては、入力情報として恒常的に計測できる区間旅行時間データが必要なため、AVI の計測区間に対象が限定され、すなわち交通情報を提供するエリア（情報カバレッジ）の拡大には寄与できないという課題がある。また、予測区間が AVI 区間とせざるをえず、したがって長距離区間を対象とすることになり、VICS に適用できるような詳細なリンク単位の予測には対応できない。さらに、事故の発生や道路ネットワークの変更に伴い交通状況が過去の統計情報と異なる状況においては大きな誤差が発生しやすいという課題もある。本研究では、3.4 節において、普及型の車両感知器による計測情報を利用し、交通状態の伝播現象をモデル化することで AVI 計測区間以外のリンクをも対象とすることができ、かつ過去の統計情報に大きく依存せずに高精度に旅行時間を予測する手法について述べる。また、本研究では、3.5 節において、AVI 計測区間を対象として、当日の計測旅行時間の過去に蓄積した旅行時間における相対順位を用いることにより、過去の統計情報に大きく依存せずに高精度に未来の旅行時間を予測する手法について述べる。また、3.6 節ではこれらの提案手法について、それぞれの適用範囲をまとめる。

次に、プローブ情報を用いた旅行時間の推定・予測について述べる。IPCar 実証実験にお

けるプローブ情報を用いた旅行時間の推定においては、収集頻度が比較的高いため実際のシステムを運用する上での費用面に課題がある。また、カーナビを用いたフローティングカーシステムにおいては、VICS の情報提供リンクや独自設定リンク番号の年度更新に対応する必要があることから、収集対象リンクのメンテナンス性に課題がある。また、欧州におけるプローブカーシステムにおいては、複雑な処理を避けるため高速道路を中心とする主要道路のみを対象としており、一般道路が発達しているわが国の道路事情には合致しない。また、プローブ情報の収集周期とそこから得られる旅行時間の精度の関係について、実際のプローブ情報を用いて定量的に評価することによって、適切なプローブ情報の収集頻度についての知見を得ることも重要な課題である。そこで、本研究では、4章において、費用対効果を重視し、長周期のプローブ情報の状況下においても高精度に旅行時間を推定する手法について述べ、さらに、プローブ情報の収集頻度による推定旅行時間の精度を評価する。

次に、VICS 情報を用いた旅行時間予測について述べる。パターンマッチングや決定木を用いた予測手法においては、予測精度が予測パラメータに依存するところが大きい。しかも、予測パラメータは、地域、リンク、あるいは予測先時間などによって特性が異なると考えられるが、全国の道路に対して効果的に予測パラメータを推定する方法が確立されていない。また、全国を対象にリアルタイムに予測情報を更新するためには計算負荷の低減も課題である。特徴空間射影を用いた旅行時間予測においては、旅行時間データを特徴基底に分解する際に、事故や工事などの突発事象や感知器異常の影響を含んだ特異データに悪影響を及ぼされると考えられるため、この特異データを的確に検出・除去することが課題である。また、いずれの手法でも VICS より情報提供されたリンクしか予測対象とできず、すなわち情報カバレッジが不十分であるため、カーナビでの動的経路探索に利用するのに十分な性能を発揮できない。本研究では、5.2 節において、カーナビの動的経路探索に利用するための統計旅行時間を推定する手法について述べる。この手法は、VICS の特異データを適切に検出・除去し、また VICS 情報が提供されないリンクの旅行時間を空間的に補完推定することが特徴である。また、本研究では、5.3 節において、新しい予測交通情報として今後の渋滞が悪化するか緩和するかに関する渋滞傾向を提案し、その推定手法についても述べる。

最後に、広域交通流シミュレータを用いた旅行時間の予測について述べる。用途に応じて様々な交通流シミュレータが存在するが、火山噴火や大地震といった大規模災害発生時のように、影響範囲が広域となるエリアを対象とし、かつ対象道路も高速道路と一般道路の両方を扱う必要がある場合には、現実的な処理時間で対応できるシミュレーションモデルはほとんどない。本研究では、6章において、大規模ネットワークに対応でき、かつ、交通規制を実施した時の迅速な旅行時間予測を可能とする広域交通流シミュレータについて述べる。

そして、7章において本研究の結論と今後の課題について述べる。

参考文献

- 1) (財)道路交通情報通信システムセンター (VICS センター) : VICS の挑戦, (財)道路交通情報通信システムセンター (VICS センター), 1996.
- 2) 國時浩一ほか:新交通管理システム -U型交通情報系システム-,三菱電機技報, Vol. 70, No. 12, pp. 44-50, 1996.
- 3) 岡本博之 編著:道路交通の管理と運用, 交通工学実務双書-8, pp. 141-147, 技術書院, 1987.
- 4) (社)交通工学研究会:交通工学ハンドブック (2001年改訂版), CD-ROM, 2001.
- 5) Ushio, N., Lu, H. and Suzuki, M.: A Guideline for Vehicle Detector Implementation in Countries of Motorization, In: Proceedings (CD-ROM) of 6th World Congress on ITS, Toronto, Canada, 1999.
- 6) 杉本實喜男:警察の ITS を支える要素技術, 月間交通, 東京法令出版, Vol. 32, No. 7, pp. 15-26, 2001.
- 7) 警視庁交通部交通管制課:警視庁交通管制システム, 交通管制, No. 47, 交通管制施設協会, pp. 4-34, 1995.
- 8) 松下温, 屋代智之 共編:ITSと情報通信技術, p5, 裳華房, 2003.
- 9) 安居院, 雁, 中嶋:画像処理を用いたナンバープレート領域の抽出に関する研究, 電子情報通信学会論文誌(D-II), Vol. J70-D-II, No. 10, pp. 560-566, 1989.
- 10) 三島忠明ほか:画像処理を用いた車番認識システムの開発, 電気学会論文誌(D), Vol. 109-D, No. 5, pp. 333-338, 1989.
- 11) 金山憲司:画像処理ナンバープレート読取りを用いた旅行時間計測について, 電気学会論文誌(D), Vol. 109-D, No. 7, pp. 477-484, 1989.
- 12) 藤吉弘亘ほか:ニューラルネットワークによるナンバープレートの位置検出, 電子情報通信学会論文誌(D-II), Vol. J80-D-II, No. 6, pp. 1627-1634, 1997.
- 13) 宮内勝:交通情報の収集・管理の高度化, 電気学会, 産業システム情報化研究会資料, IIS-01-23, pp. 23-26, 2001.
- 14) 熊崎義純:動的経路誘導の現状と今後の課題, 交通工学, Vol. 36, No. 3, pp. 2-3, 2001.
- 15) (社)交通工学研究会:道路交通とハイテクノロジー~感知・検知技術からのアプローチ 最新の技術水準と可能性~, 第61回・第62回交通工学講習会テキスト, pp. 105-116, 1998.
- 16) 森田剛史ほか:アップリンク車両の走行経路による特性の解析, 第23回交通工学研究発表会論文報告集, pp.113-116, 2003.
- 17) 岡田知朗:首都高速道路における動的交通データの収集とその活用, 交通工学, Vol. 36, No. 3, pp. 21-25, 2001.
- 18) 齋藤純一, 割田博, 田中淳:事故・工事時における所要時間予測手法に関する研究, 第22回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 173-176, 2002.
- 19) 松尾武, 桃澤宗夫:阪神高速道路の新しい交通管制システム, 第1回道路交通研究会資料, RTA-89-2, pp. 11-19, 1989.

- 20) 森田武, 新倉聡, 織田利彦: 速度形車両感知器の活用による旅行時間予測, 第 11 回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 105-108, 1991.
- 21) (財)日本交通管理技術協会: 交通管制システムの高度化に関する調査研究報告書, pp. 173-362, 1991.
- 22) 山口盛兄ほか: 旅行時間予測方式と実験, 電気学会, 道路交通研究会資料, RTA-92-18, pp. 27-35, 1992.
- 23) 杉村博之, 金山憲司: 画像処理ナンバプレート読み取りを用いた複数路線(経路)旅行時間情報提供システム, OMRON TECHNICS, Vol. 32, No. 4, pp. 425-430, 1992.
- 24) 田中良平: 複数経路旅行(所要)時間情報提供システム, 電気設備学会誌, Vol. 13, No. 5, pp. 516-522, 1993.
- 25) (財)日本交通管理技術協会: 交通管制システムの高度化に関する調査研究報告書, pp.243-244, 1992.
- 26) 大場義和ほか: ニューラルネットワーク応用旅行時間予測システム, 電気学会, 道路交通研究会資料, RTA-95-11, pp. 87-95, 1995.
- 27) Sisiopiku, V. P. and Roupail, N. M.: Toward the Use of Detector Output for Arterial Link Travel Time Estimation: A Literature Review, Transportation Research Record 1457, pp.158-165, 1994.
- 28) Gipps, P. G.: The Estimation of a Measure of Vehicle Delay from Detector Output, Research Report 25, Transport Operations Research Group, University of Newcastle upon Tyne, England, 1977.
- 29) Gault, H. E. and Taylor, I.G.: The Use of the Output from Vehicle Detectors to Assess Delay in Computer-Controlled Area Traffic Control Systems, Research Report 31, Transport Operations Research Group, University of Newcastle upon Tyne, England, 1977.
- 30) D'Angelo, M. P., Al-Deek, H. M. and Wang, M. C.: Travel-Time Prediction for Freeway Corridors, Transportation Research Record 1676, No.99-1073, pp.184-191, 1999.
- 31) Tong, H.: Nonlinear Time Series – A Dynamical Approach, Oxford University Press, Inc., New York, 1993.
- 32) (財)自動車走行電子技術協会: ITS の社会的有効性向上に係るシステム最適化研究開発報告書, 経済産業省委託(平成 12 年度情報システム共通基盤整備のための連携推進事業), 2001-3.
- 33) (財)自動車走行電子技術協会: ITS の社会的有効性向上に係るシステムの実証 報告書, 経済産業省委託(平成 13 年度情報化推進基盤整備), 2002-3.
- 34) 堀口良太: 「IPCAR 実証実験」におけるデータ処理技術について, 交通工学, Vol. 38, No. 4, pp. 30-35, 2003.
- 35) 堀口良太: 走行イベント単位でのプローブデータ記録方式の効用, 土木計画学研究・講演集, Vol. 26, CD-ROM, 2002.
- 36) 柘植正邦, 養父利秀: カーナビゲーションの可能性を広げる新情報提供システム, 自動車技術, Vol.58, No.2, pp.44-48, 2004.
- 37) Tsuge, M. and Arai, M.: Practical Use of Floating Car Data and Its Benefits, In: Proceedings

- (CD-ROM) of 11th World Congress on ITS, Nagoya, Japan, 2004.
- 38) ホンダ・Internavi Premium Club, <http://premium-club.jp/PR/>
 - 39) Simmons, N., Gates, G. and Burr, J.: Commercial Applications Arising From a Floating Vehicle Data System in Europe, In: Proceedings (CD-ROM) of 9th World Congress on ITS, Chicago, USA, 2002.
 - 40) Storey, B. and Holtom, R.: The use of historic GPS data in transport and traffic monitoring, *tec ITIS*, pp.376-379, November, 2003.
 - 41) Van Aerde, M. et al.: Vehicle Probes as Real-Time ATMS Sources of Dynamic O-D and Travel Time Data: Large urban systems, In: Proceedings of the ATMS Conference, St.Petersburg, Florida, 207-230, 1993.
 - 42) Mochizuki, M., Adachi, S., and Tajima, T.: Verification of Traffic Information Generated from Probe Data, In: Proceedings (CD-ROM) of 10th World Congress on ITS, Madrid, Spain, 2003.
 - 43) Ishida, H., Miura, H., and Okamoto, N.: Sampling Rates for Travel Speed Survey with Car Navigation System, In: Proceedings (CD-ROM) of 7th World Congress on ITS, Turin, Italy, 2000.
 - 44) Green, M. W., Fontaine, M.D., and Smith, B. L.: Investigation of Dynamic Probe Sample Requirements for Traffic Condition Monitoring, *Transportation Research Record*, No.1870 (2004), 55-61, 2004.
 - 45) Taylor, M. A. P., Woolley, J.E., and Zito, R.: Integration of the Global Positioning System and Geographical Information Systems for Traffic Congestion Studies, *Transportation Research C 8* (2000), 257-285, 2000.
 - 46) Aoki, K., Ueda, T., and Fujii, H.: Research and Development and the Proof Test of the Probe Car, In: Proceedings (CD-ROM) of 7th World Congress on ITS, Turin, Italy, 2000.
 - 47) Demir, C. et al.: FCD for Urban Areas: Method and Analysis of Practical Realisations, In: Proceedings (CD-ROM) of 10th World Congress on ITS, Madrid, Spain, 2003.
 - 48) Wada, K. and Fujii, H.: Research, Development and Field Testing of the Probe Car Information System (II), In: Proceedings (CD-ROM) of 9th World Congress on ITS, Chicago, USA, 2002.
 - 49) Goto, Y., Kumazawa, H., and Masaki, I.: Evaluation of Quality of Traffic Information in Probe Information System, In: Proceedings (CD-ROM) of 10th World Congress on ITS, Madrid, Spain, 2003.
 - 50) Nanthawichit, C. Nakatsuji, T. and Suzuki, H.: Dynamic Estimation of Traffic States on a Freeway Using Probe Vehicle Data, *土木学会論文集*, No.730, IV-59, 43-54, 2003.
 - 51) 割田博ほか：統計的手法による所要時間情報提供に関する研究，*土木計画学研究・講演集*，Vol.27，CD-ROM，2003.
 - 52) 舟橋賢二ほか：VICS蓄積データを用いた旅行時間短期予測手法に関する研究，*土木計画学研究・講演集*，Vol.27，CD-ROM，2003.
 - 53) 金澤昭浩ほか：決定木を利用した交通渋滞予測手法に関する考察，*情報処理学会研究報告*，2004-ITS-16，pp.141-148，2004.

- 54) 尾上守夫, パターン識別, 新技術コミュニケーションズ, 2001.
- 55) Kumagai, M. et al. Long Range Traffic Situation Forecast Using Feature Space Projection Method, In: Proceedings (CD-ROM) of the 11th World Congress on ITS, Nagoya, Japan, 2004.
- 56) 熊谷正俊ほか: 全国規模の交通情報サービスを目的とする所要時間長期予測技術の開発, 情報処理学会論文誌 Dec-04, Vol. 45, No. 12, P. 2696-2705, 2004.
- 57) (社)交通工学研究会 編: やさしい交通シミュレーション, 丸善, 2000.
- 58) Horiguchi, R. et al.: A Network Simulation Model for Impact Studies of Traffic Management 'AVENUE-ver.2', In: Proceedings (CD-ROM) of the 3rd World Congress on ITS, Orlando, USA, 1996.
- 59) 堀口良太ほか: 都市街路網の交通流シミュレータ -AVENUE- の開発, 第13回交通工学研究発表会論文集, pp. 33-36, 1993.
- 60) 飯田恭敬ほか: 渋滞の延伸を考慮した動的交通流シミュレーション, 土木計画学研究講演集, No. 14(1), pp. 301-308, 1991.
- 61) 藤井聡ほか: Event-Based Approach に基づく簡便なマイクロ交通流シミュレーションの開発: 生活行動と動的交通流を考慮した実用的な交通政策評価手法の構築を目指して, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集第4部, pp. 694-695, 1998.
- 62) 木戸伴雄, 池之上慶一郎, 斉藤威: 街路網における経路探索・交通配分モデル(DYTAM-1), 科学警察研究所報告交通編 19巻1号, 1978.
- 63) Cameron, G. et al.: PARAMICS - Moving Vehicles on the Connection Machine, IEEE Conference, 1994.
- 64) Hall, M.D. et al.: SATURN -A Simulation-Assignment Model for the Evaluation of Traffic Management Schemes, Traffic Engineering and Control 21, pp.168-176, 1980.
- 65) (社)交通工学研究会 編: 交通信号の手引, pp. 125-127, 1994.
- 66) 吉井稔雄, 桑原雅夫, 森田綽之: 都市内高速道路における過飽和ネットワークシミュレーションモデルの開発, 交通工学, Vol. 30, No. 1, 1995.
- 67) Rathi, A.K. et al.: Urban Network Simulation: TRAF-NETSIM Program, Transportation Engineering, Vol.116, No.6, pp.734-743, 1992.
- 68) Mizutani, H. et al.: Evaluation for AHS Architecture - Development of Traffic Simulator -, In: Proceedings (CD-ROM) of the 4th World Congress on ITS, Berlin, Germany, 1997.
- 69) (株) ニュージェック: KUNJ-Sakura, <http://www.newjec.co.jp/>
- 70) Yokochi, K. et al.: Development of Traffic Simulator SIPA (Smart Infrastructure Performance Analyzer), In: Proceedings (CD-ROM) of the 8th World Congress on ITS, Sydney, Australia, 2001.
- 71) (株)日立製作所日立研究所: 交通流シミュレーションシステム TRAFFICSS, <http://traffics.hrl.hitachi.co.jp/>
- 72) 永井徹ほか: 対話型3次元交通流マイクロシミュレータの開発, 第17回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 57-60, 1997.
- 73) 井上健士: 交通信号機制御における感知器の計測特性分析およびオフセット設計に関する

る研究, 北海道大学大学院工学研究科学位論文, 2001.

第3章 車両センサの計測情報を用いた旅行時間の推定・予測

3.1 概説

本章では、VICS に代表されるインフラサイドの交通情報提供システムを対象として、システムを支える各種車両センサの計測情報を効率的に利用することにより、精度の向上と情報カバレッジの拡大を目指す旅行時間推定及び予測について述べる。車両センサには多くの種類があるが、それぞれで計測されるデータの種類は異なっており¹⁾²⁾、旅行時間の推定・予測においては、収集される情報の特性に応じて適切な処理を行うことが精度向上と情報カバレッジ拡大のためには重要である。

まず、車両センサの計測情報を効率的に利用した旅行時間推定に関する二つの手法について述べる。一つは AVI のように比較的長距離区間を計測する区間の内部リンクに関する旅行時間を推定する手法³⁾で、もう一つは光ビーコンのように比較的短距離区間を計測する区間の内部リンクに関する旅行時間を推定するのに適した手法⁴⁾⁵⁾⁶⁾である。前者は、車両感知器の影響範囲を車両感知器の計測情報と AVI による実測旅行時間とを組み合わせることによって適切に決定する手法である。後者は、AVI、超音波感知器、光ビーコンによる各計測情報の精度特性等を考慮し、これらの各計測情報を有効利用したそれぞれの推定手法について検討し、かつ各推定手法を動的・排他的に切り替えるハイブリッド方式を採用することにより高精度化を図った手法である。これらは、いずれも VICS のように交通の現況情報を提供する交通情報提供システムに向けた技術として位置付けられる。

次に、車両センサの計測情報を高度利用することにより近未来の旅行時間を予測する旅行時間予測に関する二つの手法について述べる。一つは道路区間において交通流の状態が上流から下流（あるいは下流から上流）へ伝播する現象を利用して近未来の旅行時間を予測する手法³⁾で、もう一つは当日の計測旅行時間の過去に蓄積した旅行時間における相対順位に着目し、当日の交通状況と類似した過去の交通状況を見つけて未来の旅行時間を予測する手法⁷⁾である。これらは、いずれも提供旅行時間のさらなる高精度化を図ったものであり、次世代の交通情報提供システムに向けた技術として位置付けられる。

また、提案した各手法について、実際のフィールドデータを用いて精度評価を行い、既存技術に対する有効性・実用性を確認する。

そして、これらの提案手法それぞれの適用範囲をまとめる。

3.2 感知器の影響範囲を事前学習する旅行時間推定³⁾

3.2.1 本推定手法の目的

車両感知器の計測情報を用いた既存の旅行時間推定手法においては、2.4 節で述べたように、車両感知器の影響範囲を感知器設置位置の中間点（あるいはその付近の交差点）で挟まれた区間で固定する小区間方式を採用している。そのため、高精度化には車両感知器が多く必要であること、感知器影響範囲が固定のため実際の交通状況を必ずしも表現できないなどの課題があり、地方の一般道路を含めた広域な交通情報提供への適用性に課題がある。

本推定手法は、車両感知器の計測情報と AVI による実測旅行時間とを組み合わせることによって適切な車両感知器の影響範囲を事前に学習し、車両感知器が十分に整備されていない地方の一般道路においても高精度に旅行時間を推定することを目的とするものである。

3.2.2 旅行時間推定アルゴリズム

本推定手法の概要を図 3.2.1 に示す。まず、オフライン処理として、各感知器の影響範囲 L_i をパラメータとして、次式に示されるように、この影響範囲と時刻 t における感知器からの速度 v_i に基づいて算出される推定旅行時間と AVI によって計測される実測旅行時間 T_{AVI} との誤差として定義される評価関数 E を最小化するように、最適な影響範囲 L_i を事前に算出しておく。

min :

$$E(t) = (T_{AVI}(t) - \sum_i \frac{L_i}{v_i(t)})^2 \quad (3.2.1)$$

そして、オンライン処理として、最適化された各感知器の影響範囲 L_i に基づき、リアルタイムに得られる感知器から得られる速度 v_i を用いて各内部リンクの旅行時間を順次推定していくものである。

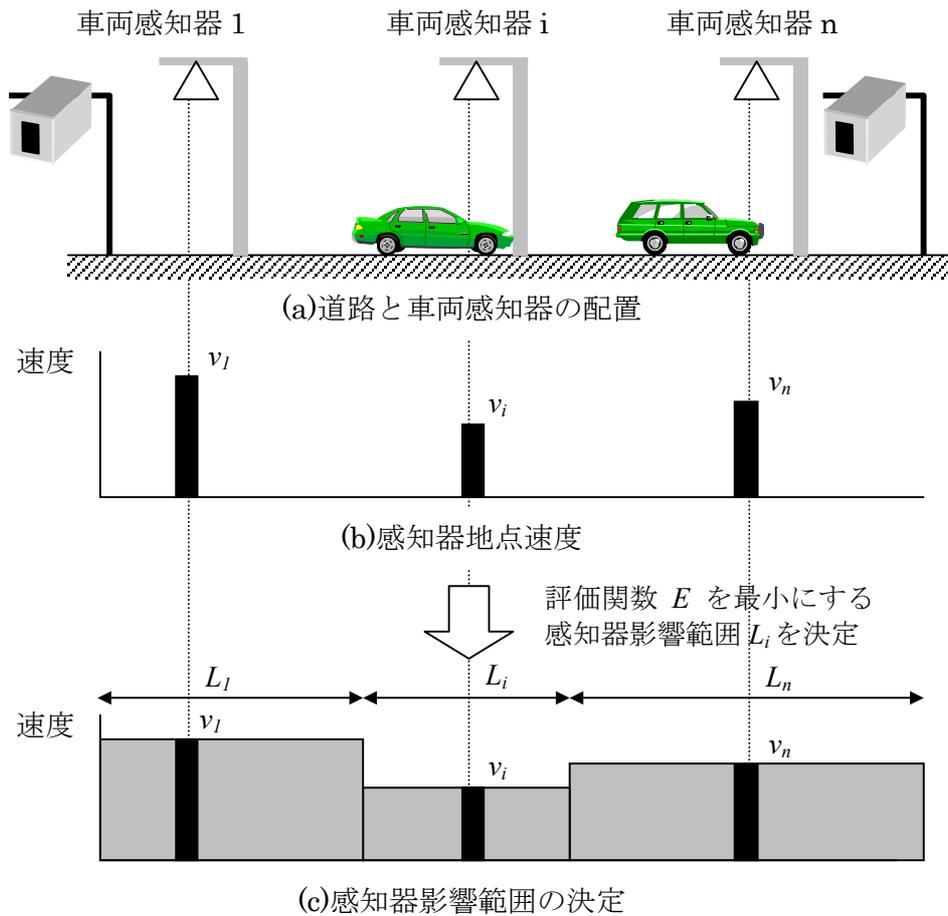


図 3.2.1 感知器の影響範囲を事前学習する旅行時間推定手法の概要

ここで、オフライン処理について、図 3.2.2 のフローチャートを用いて具体的な処理について以下説明する。

[Step1] 対象となる AVI 計測区間の内部リンクに関する距離や設置されている感知器 ID 等の情報、各感知器の計測情報、及び AVI の計測情報を入力情報として読み込む。

[Step2] AVI 計測区間内部に存在する各感知器の影響範囲の候補を設定する。ここで、影響範囲の候補を設定するにあたり、その区切り位置（影響範囲の端点）として、例えば 1 m 単位のように細切れに設定できるようにしてもよいが、ここでは一般道路を対象とするので、交通流に与える影響が大きいと考えられる交差点を単位とすることにする。すなわち、AVI 計測区間内部に存在する感知器において、隣接する感知器との間に存在する交差点の数に応じて影響範囲の組み合わせが決定される。

[Step3] 設定された影響範囲と感知器及び AVI の計測情報に基づき、評価値 E を算出する。ただし、[Step1] で読み込まれた感知器及び AVI の計測情報が複数の時間帯を跨る場合には、式(3.2.1)における単位時間当たりの評価値 E に関して全対象時間の総和で規定される。

[Step4] 評価値 E がこれまでのものより小さければ、新たな最適解として、評価値 E と影響範囲

圏を記憶する。評価値 E がこれまでのものより小さくなければ、次のステップへ進む。
 [Step5] [Step2] から [Step4] までの処理を、全ての組み合わせについて実施する。
 [Step6] 最適解として記憶されている組み合わせにより影響範囲を決定する。

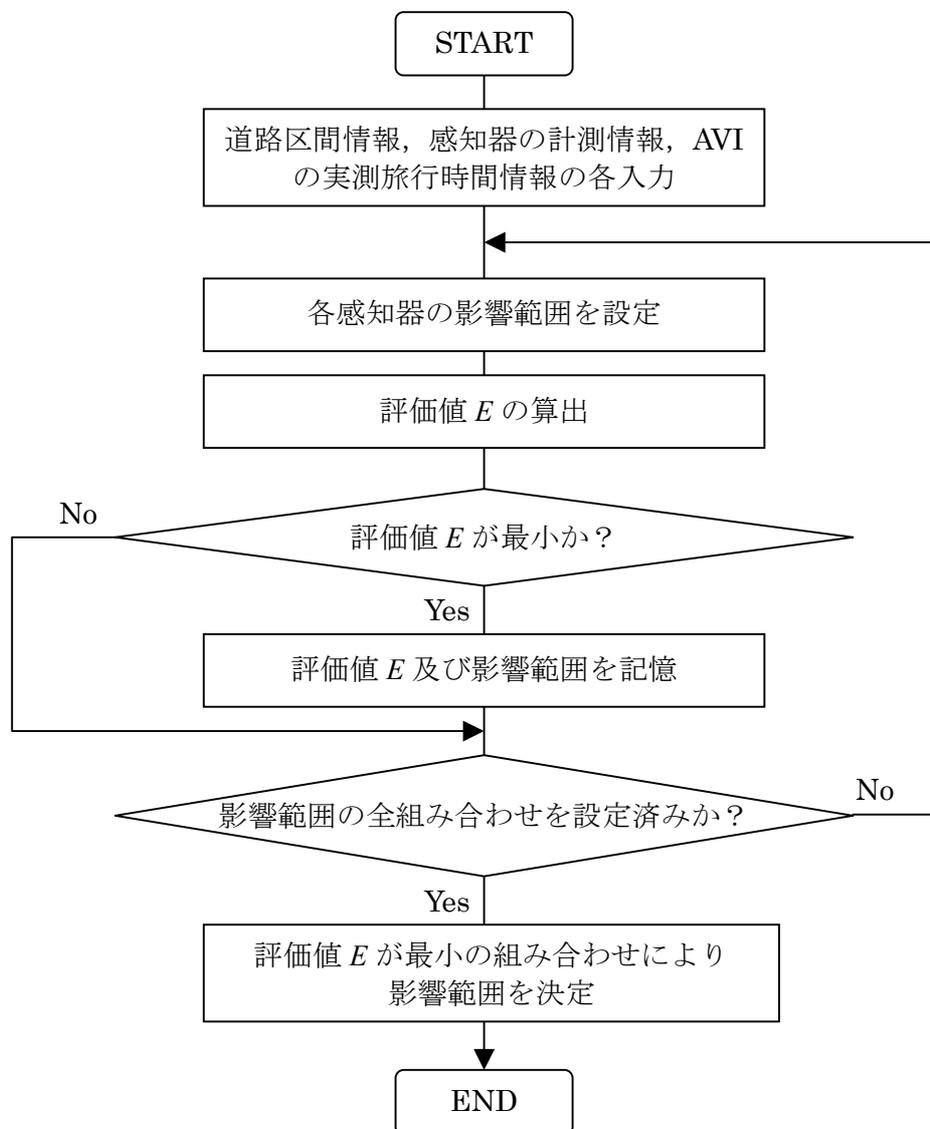


図 3.2.2 旅行時間推定手法におけるオフライン処理のフローチャート

上述したように、本手法では感知器の影響範囲について全ての組み合わせを対象として評価しているが、一般に AVI の計測区間は数 km から十数 km 程度の距離であり、その内部に存在する感知器の位置と交差点数から決定される総組み合わせ数が膨大になることは通常なく、現在の計算機性能であれば十分に処理できる計算量である。しかし、影響範囲の区切り位置を、今回採用した交差点単位とするのではなく、例えば任意の地点（実質的には 1m 単位）のように、より細分化する必要がある場合には全組み合わせを対象とする方式では対応が困難な可能性があり、その場合には様々な最適化手法⁸⁾を用いた対応を検討する必要がある。

3.2.3 データの補正による精度向上策

上記した基本的な推定手法による推定旅行時間の精度をさらに向上する策として、次の2つの観点から検討を行う。

(1) 感知器の計測情報の補正

図 3.2.1(c)に示したように、推定手法においては感知器影響範囲内の速度は一定であるとしたが、実際には、図 3.2.3 の例に示すように速度は位置によって異なっている。しかし、感知器ではその設置位置での速度を計測することになるため、設置位置によっては旅行時間の推定結果に大きな誤差が含まれる場合がある。その誤差を軽減するため、感知器の速度情報を補正することにする。具体的には、上記した推定手法によって決定された感知器影響範囲の両端部（図の交差点 A, B）にそれぞれビデオカメラを設置し、AVI と同じ要領で車番認識をおこなってリンク旅行時間を実測する。次に、感知器の速度情報に基づき計算される推定旅行時間と実測旅行時間とを用いて回帰分析を行い、補正パラメータを同定する。オンライン処理では、この補正パラメータを用いて推定旅行時間を補正する。

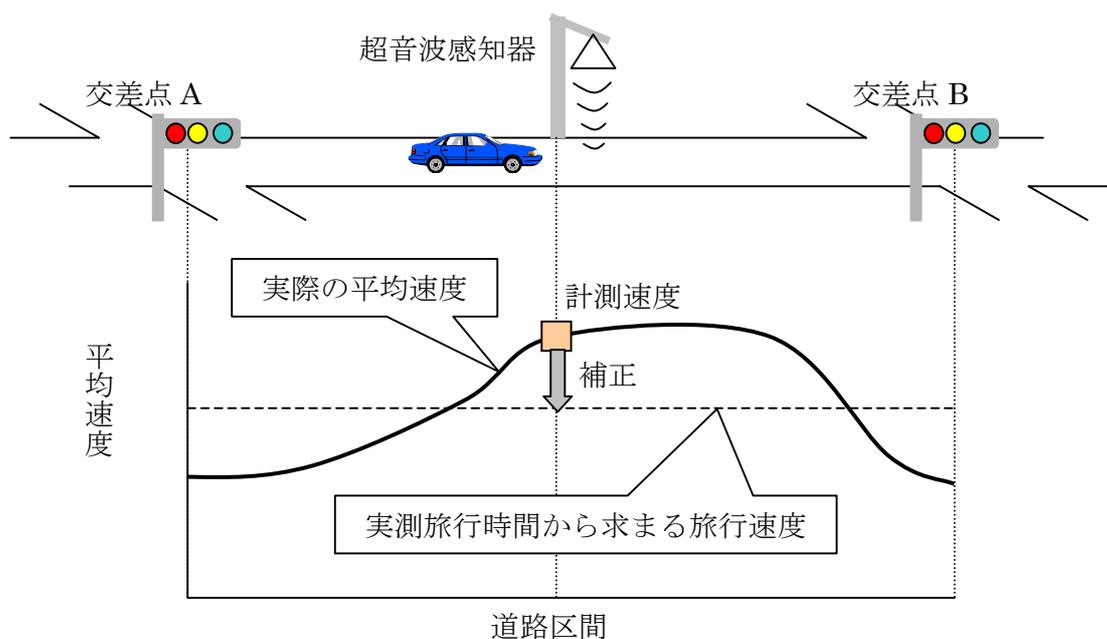


図 3.2.3 感知器設置位置と車両速度の関係

(2) 旅行時間の平滑化

図 3.2.4 は、ある一般道路における2箇所の超音波感知器で計測した5分間の平均速度データの時間変動を示している。交通状態はある程度滑らかに変化すると考えられるが、図を見るとわかるように時間帯によっては通常では考えにくい程度に大きく変化する場合がある。これは、超音波感知器による次のいずれかの測定誤差がランダムに発生することに起因するものと考えられる。

- (i) 超音波感知器により直接計測されるデータは通過交通量と占有時間であり、これらと予め固定的に設定される平均車長から平均速度を算定する際に、実際の平均車長との乖離のために生ずる誤差。
- (ii) 路肩における駐車車両やバス停で停車するバスのように実際の交通流とは異なる車両を感知してしまうことにより生ずる誤差。
- (iii) 追い越しなどの際に感知領域を避けるなど実際の交通流を計測しないことにより生ずる誤差。

また、上記の測定誤差に加えて、超音波感知器の設置位置が、信号機の近くなど駐車車両の影響を大きく受けやすく計測される交通状態が不安定になりやすいような場所でも時間変動が大きくなると考えられる。

このように、超音波感知器で測定される平均速度データにはランダムな誤差成分が含まれている可能性があるため、この影響を軽減することを目的としてデータを平滑化することにする。ここでは、平滑化の手法として15分間（3収集周期）のデータによる移動平均とすることにした。

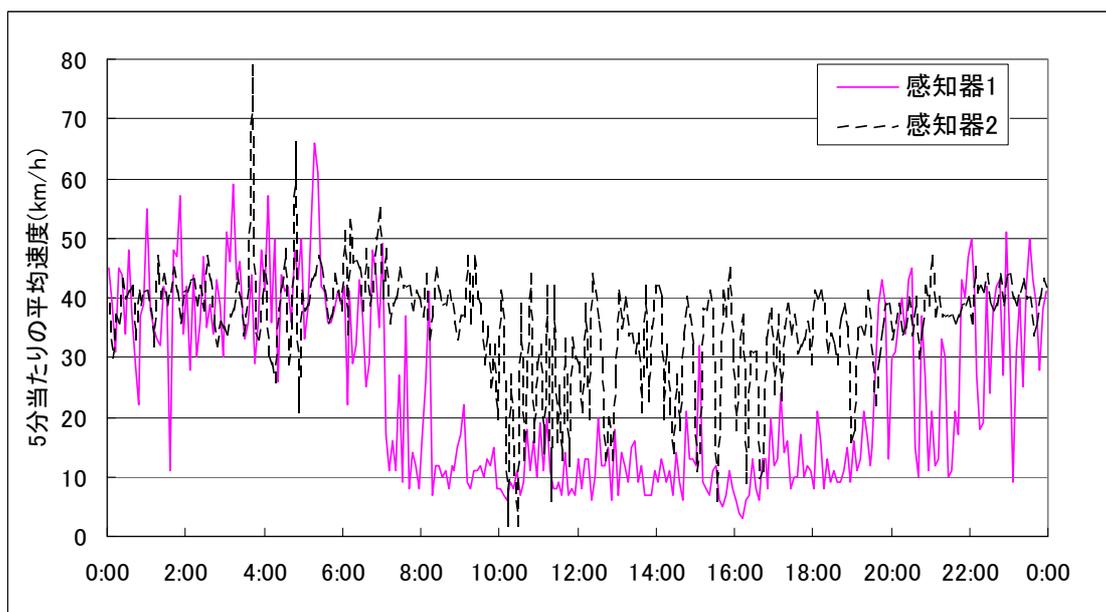


図 3. 2. 4 超音波感知器によって計測された平均速度データの時間変動の例

3.2.4 性能評価

茨城県日立市の主要幹線道路である国道6号下りにおける AVI 計測区間である大和田から兔平に至る約 11km の区間を対象とした。対象道路の概略図を図 3.2.5 に示す。図に示すように、対象区間内部に超音波感知器が 7 基設置されているのみで、設置密度としてはかなり低い部類であった（1994 年 10 月の評価当時）。

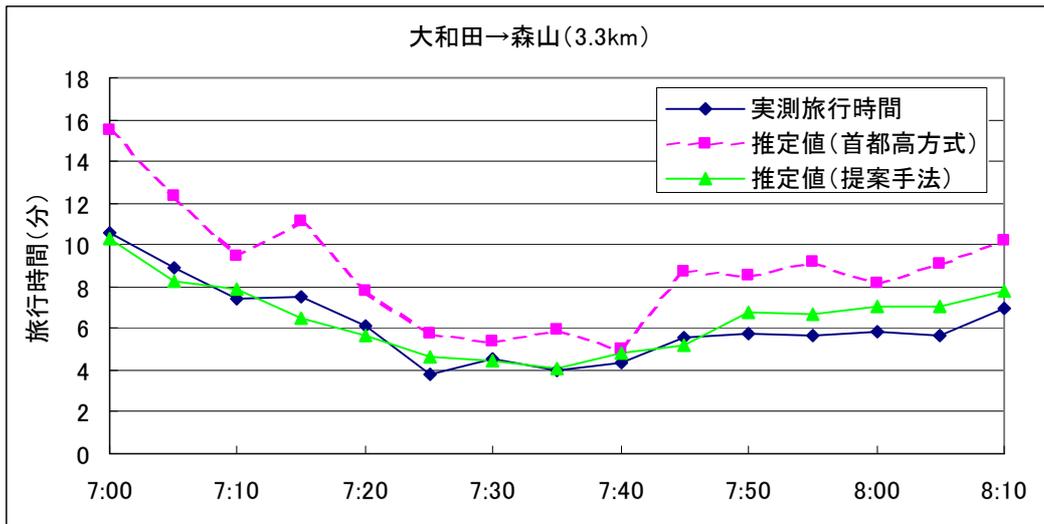


図 3.2.5 評価対象区間の概略図

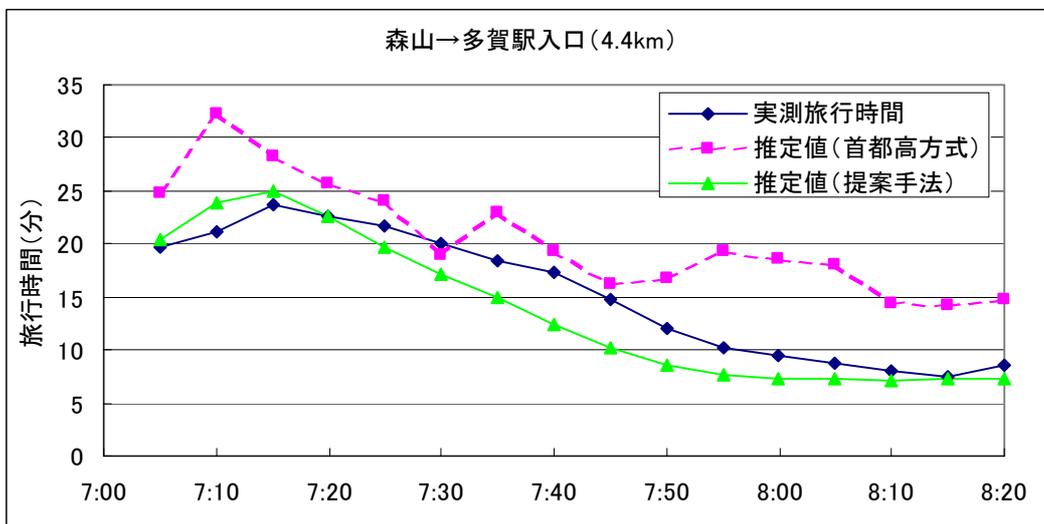
今回、対象区間の内部区間の一部である内部区間 1 及び内部区間 2 を対象として旅行時間推定精度の評価を行った。なお、内部区間 3 については、実測旅行時間が測定できなかったためここでは評価対象とはしない。評価の手順は次の通りである。

- (1) 評価対象区間（内部区間 1 及び内部区間 2）の出発地点と到着地点のそれぞれにビデオカメラを設置して録画しておき、後に目視によって車両のナンバープレート及びその通過時刻を記録し、ナンバーが一致した車両の通過時刻の差を 5 分後毎に集計・平均化することにより、当該区間の実測旅行時間を得る。
- (2) 事前（1994 年 10 月 13 日（木））に得た (1) の実測旅行時間、超音波感知器の平均速度データ、及び AVI の実測旅行時間を用いて、今回提案した感知器の影響範囲を学習し決定するとともに、推定旅行時間を補正するためのパラメータを回帰分析により求める。
- (3) (2) のデータを集計した後の 1994 年 10 月 18 日（火）を評価当日として設定し、当日の超音波感知器の平均速度データと事前に決定された (2) の各情報とに基づいて、従来の手法である首都高方式 (2.4.1 項参照) と今回提案した旅行時間推定手法の各手法によって旅行時間を推定する。そして、(1) の方法で計測された評価当日の実測旅行時間を真値として、各旅行時間の誤差を比較する。

内部区間 1 及び 2 のそれぞれにおいて、首都高方式と本提案手法による各精度を全体的に評価した結果を図 3.2.6 及び表 3.2.1 に示す。また、上記 2 区間において、首都高方式と本提案手法による各精度を渋滞状況別に評価した結果を表 3.2.2 に示す。ここでは、渋滞とは実測旅行時間の平均速度が 20km/h 以下の状態と定義している。いずれの評価結果からも、提案手法の精度が首都高方式を上回る結果を得ており、本手法は従来に比べて推定旅行時間の精度向上へ寄与できることを確認した。



(a) 内部区間 1 (大和田→森山) の精度評価



(b) 内部区間 2 (森山→多賀駅入口) の精度評価

図 3.2.6 推定旅行時間の精度比較 (その 1)

表 3.2.1 推定旅行時間の精度比較 (その 2)

	内部区間 1		内部区間 2	
	首都高方式	提案手法	首都高方式	提案手法
平均絶対誤差率	42.3%	11.3%	46.6%	15.4%
RMS 誤差率	44.6%	13.3%	58.4%	18.2%
最大誤差率	62.2%	24.6%	107%	30.8%

表 3.2.2 渋滞状況別の推定旅行時間の精度比較

	非渋滞時		渋滞時	
	首都高方式	提案手法	首都高方式	提案手法
平均絶対誤差率	55.2%	14.5%	22.1%	10.8%
RMS 誤差率	60.7%	16.9%	26.8%	17.5%
最大誤差率	107%	30.8%	52.1%	28.8%

3.3 個々の感知器の重みを事前学習する旅行時間推定⁴⁾⁵⁾⁶⁾

3.3.1 VICS における旅行時間推定の課題

(1) 車両センサの種類

我が国において、自動車交通流の計測に使用される車両センサには多くの種類があるが、それぞれで計測されるデータの種類の異なっている¹⁾²⁾。したがって、旅行時間の推定は車両センサの種類に応じて個別になされる必要がある。本項では、このうち我が国で比較的普及しているいくつかの車両センサを紹介し、そのデータを用いた一般的な旅行時間推定手法とその課題について述べる。

(2) AVI を用いた推定法

2.3.2 項で報告したように、AVI (Automatic Vehicle Identification) システムは、道路上に設置されたカメラ画像より撮影された車両のナンバープレートを自動認識し、2箇所で計測されたナンバーが一致した時の各通過時刻の差を推定旅行時間として出力するものである。このシステムは、直接旅行時間を計測する方式であるため高精度である点が特長である。

しかし、このシステムは、屋外で連続運用する撮影用カメラとナンバーを自動認識するための画像処理装置等が必要なため、車両センサとしてはかなり高コストとなる。そのため、AVI システムが実際に設置される路線は、交通管制上極めて重要な主要幹線道路の重要区間に限られ、しかもその計測区間の距離は、数キロメートルから十数キロメートルと比較的長距離となっているのが実情である。したがって、広域エリアを対象とし、かつ通常は交差点間の区間として定義されるリンク単位のきめ細かな情報提供を行う VICS のようなサービスには必ずしも適さない。

(3) 超音波感知器を用いた推定法

2.3.1 項で報告したように、超音波感知器は我が国で最も広く普及している車両センサである。直接的には5分間の通過交通量及び占有率を計測するものであり、交通管制センターでこれら計測データを集計し、先に述べた式(2.3.1)により平均速度を推定する。

例えば、埼玉県的一般道路向け VICS に関する文献⁹⁾で紹介されているように、この平均速度を用いて小区間ごとの平均速度を算出し、それから平均旅行時間を算出する。次に、各小区間の平均旅行時間を積算することによってリンク旅行時間を算出する。そして、このリンク旅行時間に対して予測処理などの補正処理を加え、VICS のリンク旅行時間として出力される。予測処理は過去の統計情報を用いるものと交通流シミュレーションを用いるものとに大別される¹⁰⁾が、リアルタイム性を重視した VICS のようなシステムでは上記埼玉県の VICS を含めて前者が一般的である。

しかし、過去の統計情報を用いた予測処理は、一般道路においては信号機の影響を受けるため VICS のリンク単位では定常的な統計情報が得られにくいこと、また事故やイベントなどの突発事象発生時に不利になることが多いという課題があり、実際に予測処理が行われる事例はほとんどない。

(4) 光ビーコンを用いた推定法

2.3.3 項で報告したように、近年一般道路で整備が進みつつある車両センサとして光ビーコンがあり、2001年現在で約3万基整備されているがこれを6万基に増やすことが計画されており¹¹⁾、AVIに比べ普及している状況にある。光ビーコンは、路上に設置され、光ビーコン対応の車載機を搭載した車両と双方向で情報通信することが特徴である。車載機から前回通過した光ビーコンのIDと前回から今回までに要した実際の旅行時間情報を光ビーコン経由で交通管制センターへ送信する（アップリンクと呼ばれている）。したがって、この方式もAVIシステムと同様に直接旅行時間を計測するものであるため高精度である。一方、光ビーコンから車載機へはリアルタイム交通情報が送信される（ダウンリンクと呼ばれている）。光ビーコンはセンサのコストが比較的安価であるため多くが主要交差点ごとに設置される。そのため、数百メートルから数キロメートルの道路区間が旅行時間計測区間になり、設置間隔の点ではAVIに比べてVICSサービスに適していると言える。

しかし、2000年度末に約13万基¹²⁾が設置されている超音波感知器に比べると十分とは言えず、また光ビーコン対応の車載機を搭載した車両しかアップリンクデータを送信できず、FM多重放送を含むVICS通信メディアに対応した車載機の累積出荷台数が増加傾向にあるとは言え、実際にアップリンクデータを送信できる車両は全走行車両のうちの数%程度であると思われる。したがって、常に旅行時間が計測できるとは限らず、終日連続運用するVICSサービスのためにはこの光ビーコンだけでは十分とは言えない。

3.3.2 旅行時間推定アルゴリズム

(1) 旅行時間推定法の概要

本節において提案する旅行時間推定法は、上記課題を考慮し、終日連続運用できることはもちろん、できる限り広域なエリアを対象としてリンク単位のきめ細かな旅行時間情報を高精度に提供することに加え、年度更新等の維持管理に関わる工数を軽減することをも考慮した実用性・信頼性の高いサービスシステムを実現することを目的としている。

旅行時間推定の基本処理概念を図3.3.1に示す。推定処理の基幹部では、リンクごと時間ごとに計測されるデータが異なっていることに対応するため、データの種類に応じた旅行時間推定法として「直接計測された旅行時間に基づく推定法」と「超音波感知器データに基づく推定法」の2方法を考案し、これらを動的・排他的に切り替えるハイブリッド方式としている。上記2方法のうち、前者は計測データの種類が光ビーコンによるアップリンク旅行時間及びAVIによる測定旅行時間の時に対応し、後者は超音波感知器データの時に対応する。同時に複数種類のデータが計測されている場合には、それぞれの精度特性を考慮して、

(i) 光ビーコンによるアップリンク旅行時間

(ii) AVIによる測定旅行時間

(iii) 超音波感知器データ

の各データを用いた推定法の順に予め優先順位付けを行っている。

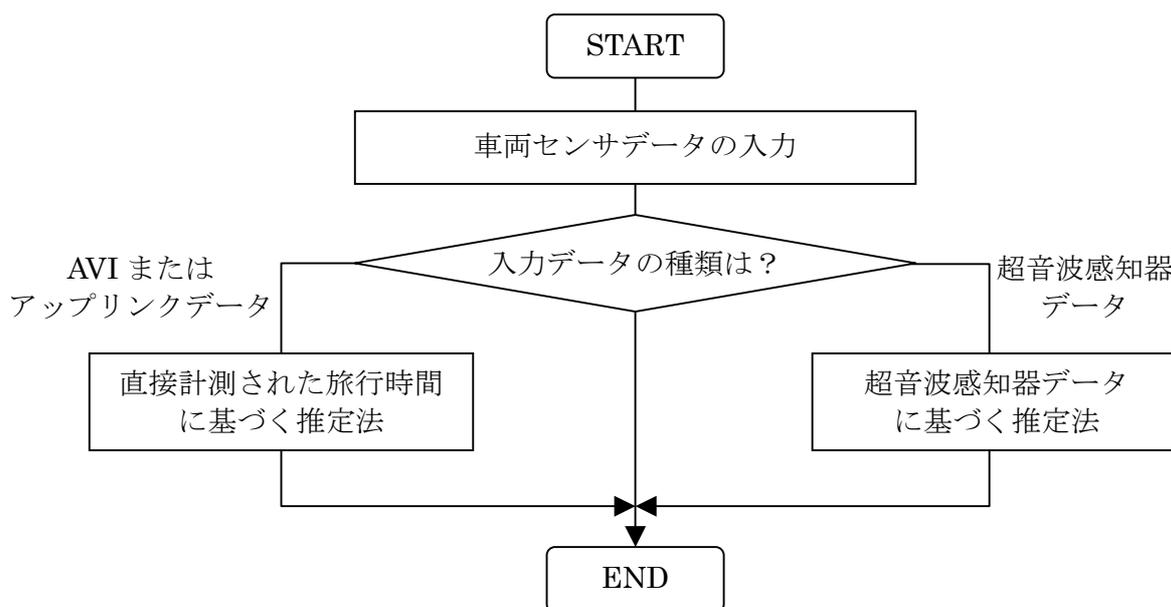


図 3.3.1 旅行時間推定の基本フロー

以降では、ハイブリッド方式を構成する上記2方法のそれぞれについて述べ、さらには、「超音波感知器データに基づく推定法」における利便性向上・精度維持を目的とした追加機能である「超音波感知器のデータ異常時の対応」についても述べる。

(2) 直接計測された旅行時間に基づく推定法

上記に示した(i)～(iii)の3種類のデータのうち、(i)と(ii)については、データそのものが直接計測された旅行時間であるため精度が高く、原則としてこれをそのままドライバーに提供できると考えられる。それぞれの計測区間距離が一般にリンク距離よりも大きいため複数リンクに跨っており、リンク単位の推定旅行時間を算出するには、計測区間で得られた旅行時間を各リンクの距離に応じて比例配分する。

しかし、精度が高いと考えられるこれらのデータも、計測区間の途中での休憩や、抜道・寄道など想定外の経路を走行するなどして実際の交通状態を表していない異常データが混入することがあり、これをリアルタイムに検出・除去する仕組みが必要である。従来においては、アップリンク旅行時間が異常か否かを的確に判定する明確な方法がなかったため、異常データが混入してもその影響が軽減されるように単位時間あたりに所定数以上の計測データがなければ提供旅行時間に反映されないことにしていた。しかし、この方法では、全通過交通を対象とできる“AVIによる測定旅行時間”の場合には問題となることはほとんどなかったが、“光ビーコンによるアップリンク旅行時間”の場合には、車載機及び光ビーコンの普及が充分でないため単位時間あたりのアップリンク数が所定数を満たさず、結果としてアップリンク情報を必ずしも有効に活用していなかった。また、異常値を除去しないため異常値が含まれると精度が悪化するおそれがあった。そこで、計測旅行時間に関して、次のように異常判定するための上下限值を作成し、できる限り有効利用するとともに精度向上を図った。

一般に行われる旅行時間の異常値除去の方法として、指数平滑法による検定手法¹³⁾が挙げられる。アップリンク旅行時間は、前述したようにリアルタイムのアップリンク数が十分でないため、AVIのように恒常的なデータ収集が必要となるこの方法では適切な異常値除去を行うことができない。そこで、アップリンク旅行時間の収集頻度特性を考慮した新しい異常値除去方式が必要であり、その具体的手法について図 3.3.2 のフローチャートを参照しつつ述べる。

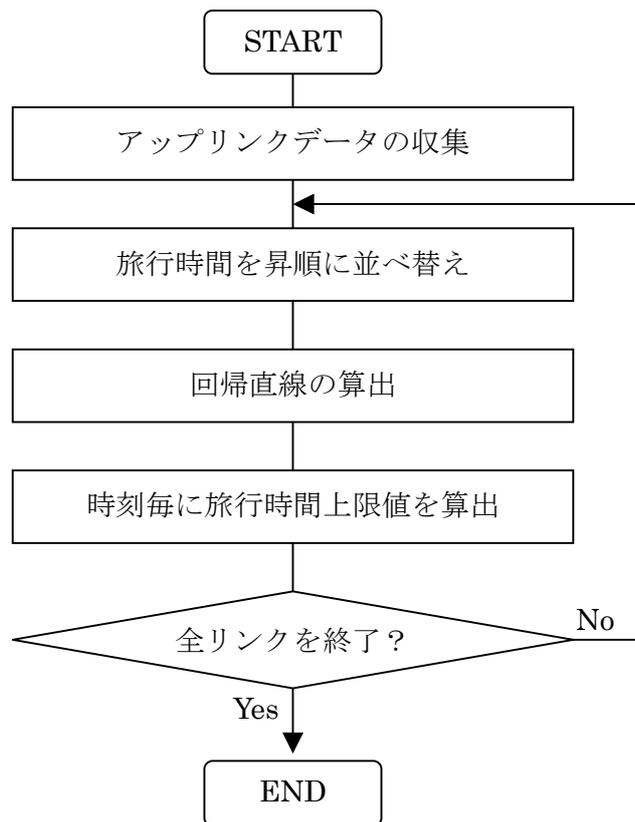


図 3.3.2 旅行時間上限値の算出フロー

まず、予め計測区間ごと日種（平日、土曜日、日曜日）ごとに計測旅行時間データを集計し、それをさらに VICS の情報更新周期である 5 分間隔の時間帯別に蓄積する。次に、各時間帯別に蓄積されたアップリンク旅行時間データを標本データとして上限値を推定することにする。ここで、上限値とは、旅行時間母集団から異常値を除去した後に残る正常データ群の最大値であると定義する。そこで、標本データから上限値を推定するため、標本データ数を n とし図 3.3.3 のようにそれらを昇順に並べ替えた上で、異常値混入の可能性が高いと考えられる値の大きい方と小さい方からそれぞれ所定数（標本数に応じて増減）だけデータを除去し、残った正常データ群を用いて次式で表される回帰直線を求める。

$$\hat{T}_p = \alpha \cdot p + \beta \quad (3.3.1)$$

p は旅行時間順位（昇順）であり、パラメータ α , β は最小二乗法により求められる。この回帰直線は、標本データを一様分布と見なして近似したものに相当する。次に、標本データ

のうちの最大値である T_n と回帰直線上の最大値 \hat{T}_n とを比較し、 T_n と \hat{T}_n の小さい方をこの時間帯における上限値 T_{UL} とする（図 3.3.3 の例では $T_{UL} = T_n$ となる）。これを時間帯ごとに繰り返してそれぞれの上限值を求めることができる。また、夜間など十分なアップリンクが蓄積されなかった時間帯においては、その近傍の蓄積データを使って線形補完することとする。このようにして、図 3.3.4 のような 24 時間（5 分間隔）分の上限値データを作成することができる。

また、下限値については路線の規制速度に応じて決定されるため時間帯に関わらず一定値となっている。リアルタイム処理では、この上下限值データベースを参照して個々の計測旅行時間が異常か否かを判定する。本方式により、計測旅行時間の信頼性が向上するため、計測期間内（通常は 5 分）にわずかでも計測旅行時間データがあれば提供旅行時間に反映することが可能となり、精度の高い旅行時間を提供することができると考えられる。

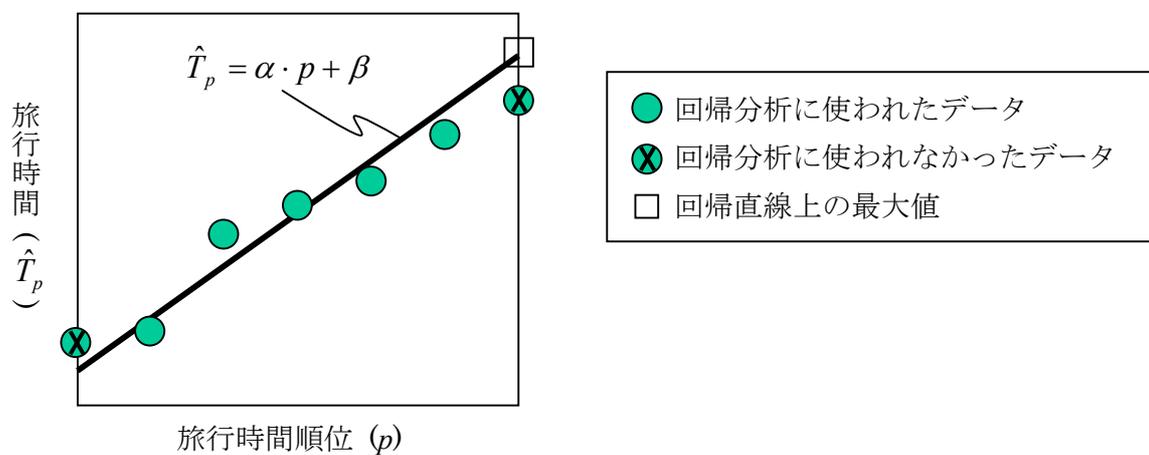


図 3.3.3 旅行時間の順位に基づく上限値算出方法

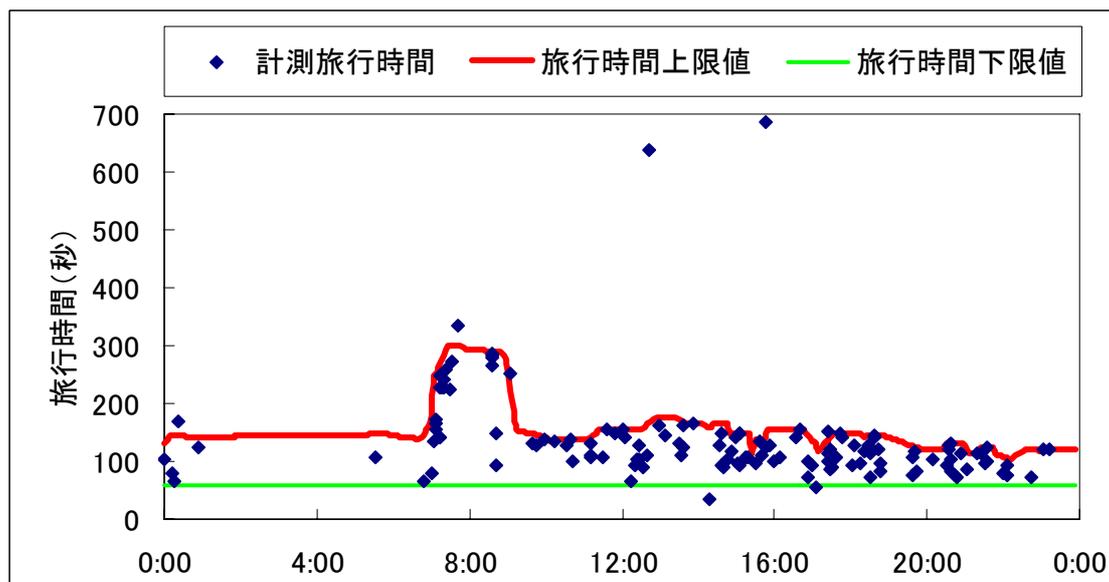


図 3.3.4 計測旅行時間とその上下限值のサンプル

(3) 超音波感知器データに基づく推定法

超音波感知器は直接旅行時間を計測できないため、地点における計測データから区間に展開するための推定処理が必須であり、そのため精度の点では上記の直接計測できる場合に比べて不利である。しかしながら、比較的短い時間周期（通常5分）での計測データが得られることから時間遅れが少ないことに加え、特に我が国で最も広く普及しているため、情報カバレッジの拡大のためには最も重要なデータである。そこで、課題である推定精度の向上を目的として次の推定法を考案した。

リンクにおいて、感知器 n の出力から計算される平均速度データ v_n を用いて式 (3.3.2) により時刻 t における推定旅行時間 T_e を算出する。ここに L は対象リンクの長さ、 a_n は感知器速度の補正係数、 b は補正係数だけでは表現できない信号交差点による待ち時間等を表現するためのパラメータ（バイアス）である。

$$T_e(t) = \frac{L}{\sum_n (a_n \cdot v_n(t))} + b \quad (3.3.2)$$

従来は、超音波感知器から得られる平均速度より小区間の旅行時間を算出し、積算した各小区間の旅行時間をリンク旅行時間として一旦求め、そのリンク旅行時間を一括補正（パラメータは回帰分析等により算出）することにより求めるものであったが、上式は各感知器の平均速度を補正できるようにしたものである。なぜなら、感知器データから推定される平均速度 v 自体に誤差が含まれる上、実際の一般道路において、周辺構造物の影響等により各感知器の設置位置（信号機からの距離）が一定でないなど計測環境はそれぞれ異なっており、また各信号機の数やサイクル、スプリット（青時間）等も様々なため、それぞれを個別に補正できる式(3.3.2)の方が高精度化のためには有利と考えられ、さらに後述する感知器故障時にも対応できることにより精度を維持することができる点でも有効なためである。

上式で表される推定旅行時間の推定精度を向上するために、蓄積された計測旅行時間データを教師データとして補正係数 a_n 及びバイアス b を式(3.3.3)の評価関数 E が最小となるように算出する。ここに T_u は計測旅行時間、 \bar{a} は補正係数 a_n の平均値、 c は予め定められる係数である。以下では、この補正係数 a_n 及びバイアス b の最適化をパラメータ推定と呼ぶ。

$$E = \sum_t |T_u(t) - T_e(t)|^2 + c \sum_n |a_n - \bar{a}| \quad (3.3.3)$$

上式の右辺第一項は推定旅行時間と計測旅行時間の二乗誤差、第二項は補正係数と平均値の差を表しており、この評価関数 E を最小化することによって、誤差を最小化するだけでなく補正係数を出来るだけ均等に用いて感知器による突発異常値出力時のリスクを分散させる働きを持たせている。なお、評価関数 E の最小化には、今後評価関数を改良するなどの汎用性に備え、かつ良質な推定を行うため遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた手法とした。しかし、このままでは各パラメータの自由度が大きいため機械的に最小化すると、補正係数やバイアスが負になったり、あるいは過大・過小になるなど非現実的な結果となることがあるため、式(3.3.4)～(3.3.6)のような制約条件を設定した。

$$a_n \geq 0 \quad (3.3.4)$$

$$S_{\min} \leq \sum_n a_n \leq S_{\max} \quad (3.3.5)$$

$$0 \leq b \leq \frac{L}{V_r} \quad (3.3.6)$$

S_{\min} , S_{\max} , V_r は、実際の運用において現地担当者が経験的に決めるものである。ここでは、 V_r としてリンクの規制速度としたが、式(3.3.2)において b が支配的にならない範囲で定められるべきものである。また、 S_{\min} , S_{\max} は、仮にこの制約条件内での最適補正係数でさえ誤差が大きいという状況であれば、感知器データと計測旅行時間データの差が通常考えられるより大きい状況であり、故障など何らかの異常を疑うべきであると判断できる基準であり、通常では0.5~1.5の範囲内に抑えられるように設定される。

感知器はその設置地点の直下の交通状況しか計測しないため、感知器の設置間隔が広くなる（設置密度が低下する）と感知器データを用いて区間の旅行時間を推定する場合においては一般に推定精度が低下する。しかし、本方法は実測旅行時間に合うように各種パラメータの最適解を求める方式であるため、感知器の設置間隔がある程度広くなるような主要幹線以外の道路においても推定精度の低下を抑える効果があり、したがって従来は積極的には提供対象としなかった主要幹線道路以外の道路も対象とすることが可能となる。

また、地域によっては降雨や積雪など季節によって路面状況が変化したり、あるいは新しく道路が整備されるなどのために交通状況が大きく変化したりする場合がある。このような場合に、一度推定したパラメータのままでは旅行時間の推定精度を必ずしも維持できないことが考えられる。このような状況においては定期的なパラメータの推定作業が必要となるが、VICSシステムにおいては入力データである計測旅行時間データ（アップリンク旅行時間データ）と感知器データがオンラインで得られるため、図3.3.5のようにパラメータ推定の自動化を実現した。これにより、例えば1~数ヶ月ごとにこのパラメータ自動推定を行うことにより、維持管理工数をほとんど増加することなく推定旅行時間の精度の低下抑制と安定化を実現することが可能となる。

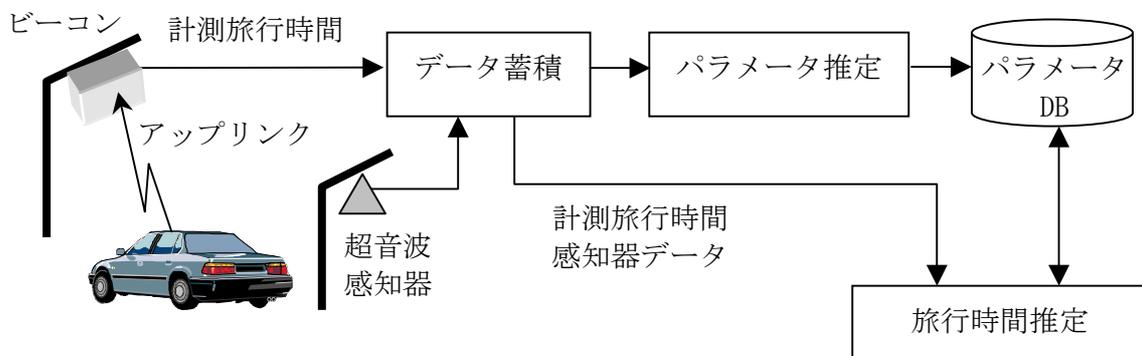


図 3.3.5 パラメータ自動推定システム

(4) 超音波感知器のデータ異常時の対応

超音波感知器は、それ自体の突発的な故障やセンシングエリアにおける駐車車両等の影響により突発的に異常値を出力することがある。複数の感知器が設置されているリンクに関して旅行時間推定を行う場合、従来では、感知器が1基でも異常値を出力した場合には精度の安全性を最優先し、残りの感知器がたとえ正常値を出力してもそれらを破棄し旅行時間不明として出力していたため、サービスを受ける側としては利便性が低下する問題があった。

そこで、今回は完全ではなくともある程度の精度が確保できると思われる状況においては、積極的に情報提供することにより利便性を向上させることを目的として対応法を考案した。具体的には、正常な感知器データを有効利用するため、異常値を出力した感知器のデータを破棄し残りの感知器による正常値のみを利用する。ただし、できるだけ精度を確保する必要があるため、異常値の混入率が所定値(0.5)以下の場合のみ対応することにした。また、旅行時間推定を行うには、各感知器の補正係数 a_n の合計及び比を保持して動的に補正係数を再配分する。以上の対応処理は、システムでリアルタイム処理されるため自動化される。

一例として、4基の感知器によるデータを利用して旅行時間推定する区間において、3番目の感知器のみが異常値を出力した場合の補正係数を再配分する例を表3.3.1に示す。すなわち、異常値を出力した感知器(3番目の感知器)の補正係数 a_3 をゼロとし、残りの正常な感知器の補正係数の比($a_1 : a_2 : a_4 = 1 : 2 : 4$)を保持して元の合計値(1.0)となるように再配分する。

本技術により、故障感知器の影響を排除し、残りの正常な感知器データを有効活用することが可能となり、そのため推定旅行時間の精度確保をしつつ積極的に情報提供できるようになるため、利用者にとって利便性が向上すると考えられる。

表 3.3.1 感知器1基が異常値を出力した場合における補正係数の再配分例

感知器の状態	補正係数				
	a_1	a_2	a_3	a_4	合計
全感知器が正常 (デフォルト)	0.1	0.2	0.3	0.4	1.0
3番目の感知器が異常 (再配分)	0.143	0.286	0	0.571	1.0

3.3.3 性能評価

(1) 計測旅行時間異常判定技術の評価

北海道函館地区の一般道路に配備されている光ビーコンのデータを対象として、本技術の評価を行った（図 3.3.6）。

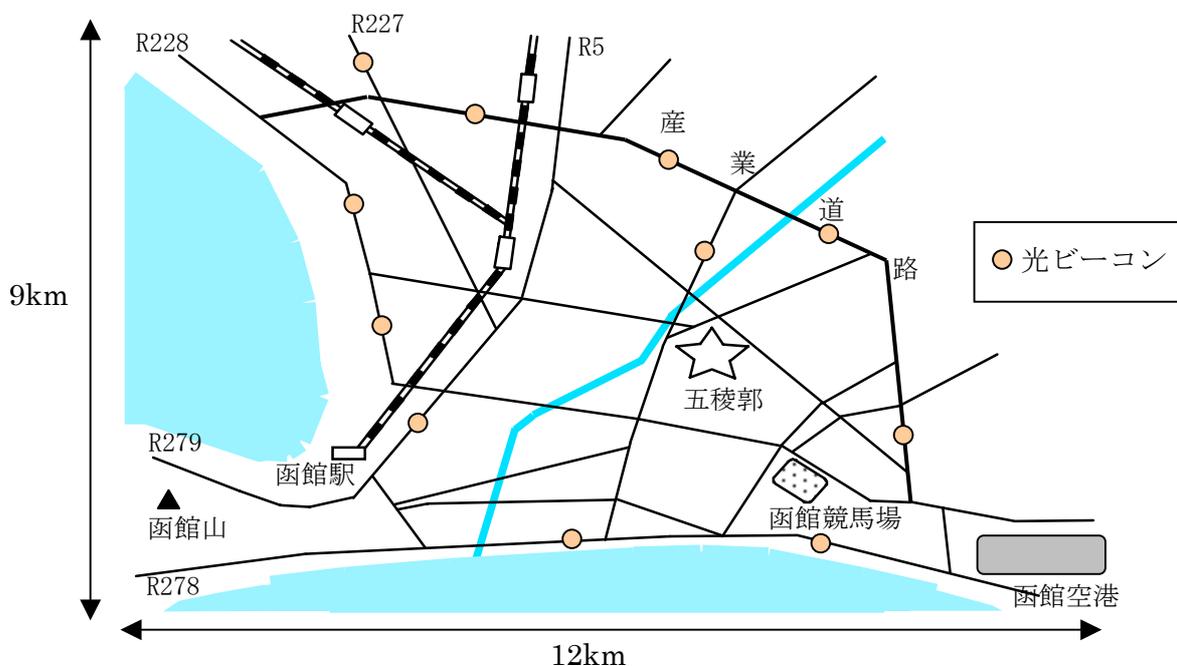


図 3.3.6 函館地区の対象道路ネットワーク

表 3.3.2 は、函館地区の VICS サービスが開始された直後である 2000 年 5 月 20 日～31 日の 12 日間に収集されたアップリンク実績を示している。表において、“Measured”は前回通過した光ビーコン（上流側）と今回通過した光ビーコン（下流側）の通過時刻の差から旅行時間を計測できた回数を意味し、“Initial”は車載機を電源オンにしてから初めてビーコンを通過した回数を意味し、“No-match”は予め想定しなかった経路を通過してアップリンクを実施した回数を意味する。したがって、アップリンクデータのうち“Measured”以外は旅行時間を計測できておらず、全アップリンクのうち旅行時間が実測できたものは平均で 32%であった。

上記の 12 日間に収集されたアップリンク旅行時間データを元に異常判定のための旅行時間上限値データベースをアップリンク旅行時間の計測区間ごとに作成し、これに基づいて 2000 年 6 月 5 日、6 日、8 日、及び 9 日のアップリンクデータの異常判定を行った（表 3.3.3）。判定の結果、旅行時間が実測できたアップリンクの 85%が正常であり、本方式によってそれらが全て利用可能となり、5 分間に 3 以上のアップリンクが必要であった従来方式においてはほとんどのアップリンクデータが利用できない状況であったことに比べて大幅に利用効率が向上することになり、その結果として精度の高いアップリンク旅行時間で提供できる状況が確実に増加する。

表 3.3.2 函館地区におけるアップリンク実績

日付	Measured	Initial	No-match	合計
2000.05.20(Sat)	82	170	28	280
2000.05.21(Sun)	129	157	37	323
2000.05.22(Mon)	92	171	34	297
2000.05.23(Tue)	112	179	33	324
2000.05.24(Wed)	80	164	30	274
2000.05.25(Thu)	86	192	37	315
2000.05.26(Fri)	88	201	23	312
2000.05.27(Sat)	105	157	27	289
2000.05.28(Sun)	85	172	21	278
2000.05.29(Mon)	121	206	32	359
2000.05.30(Tue)	92	167	22	281
2000.05.31(Wed)	99	170	36	305
平均	97.58	175.5	30	303.08

表 3.3.3 アップリンク旅行時間の異常判定結果

判定	度数(率)
正常アップリンク	232(85%)
異常アップリンク	40(15%)

(2) 超音波感知器データに基づく推定法の評価

この推定法に対する評価として、パラメータ推定の効果と本手法の精度を評価した。VICS サービスエリアのうち主要幹線道路である函館市の産業道路の6区間を対象とし、「パラメータ推定なし」(2000年6月5,6日)と「パラメータ推定あり」(2000年6月8,9日)の推定旅行時間の誤差を比較した。ここで、「パラメータ推定あり」は、2000年5月20日~31日の12日間に収集されたアップリンク旅行時間データと感知器データを元に予めパラメータ推定を行い、その結果を用いて推定したもので、「パラメータ推定なし」は、通常行われる手法として感知器の補正係数 a_n を合計1になるように均等配分し、かつバイアス b をゼロにして推定したものである。なお、今回の評価においてはアップリンク旅行時間を真値としており、渋滞ピーク時から交通閑散時まで様々な交通状況のデータを含んでいる。産業道路の6区間は、全て片側2車線の道路でそれぞれの概要は表3.3.4に示す通りである。

表 3.3.4 評価区間の概要

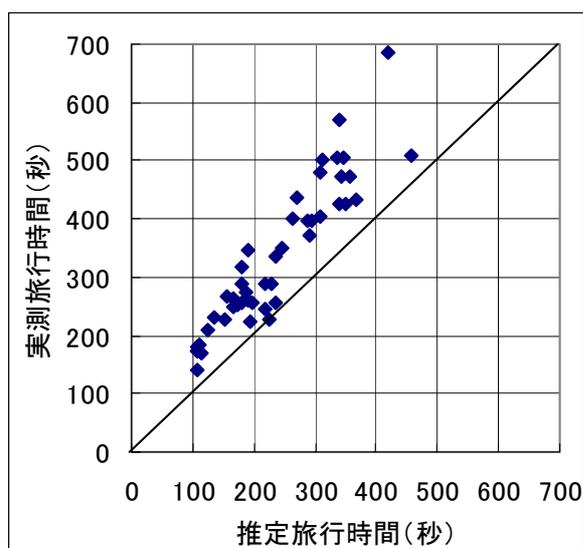
区間番号	区間	距離*)	設置感知器数	感知器の平均設置間隔(m/基・レーン)
1	昭和1丁目→西桔梗町	2281m	14	326
2	西桔梗町→昭和1丁目	2134m	12	356
3	昭和1丁目→中道2丁目	1506m	14	215
4	中道2丁目→昭和1丁目	1496m	12	249
5	中道2丁目→日吉町1丁目	3696m	12	616
6	日吉町1丁目→中道2丁目	3803m	18	423

*)同一区間の上り下りで距離が異なるのは、デジタル道路地図データベース(DRM)に基づき算出しているため。

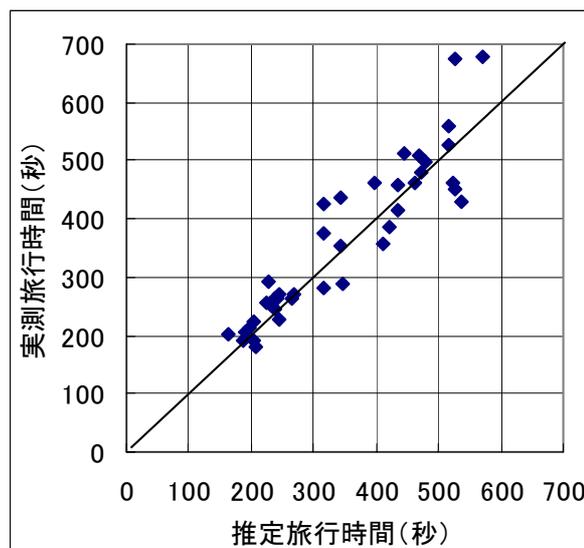
対象区間について「パラメータ推定なし」と「パラメータ推定あり」の推定旅行時間の精度について評価し、その結果を表 3.3.5 に示す。また、表 3.3.6、図 3.3.7、及び図 3.3.8 は、上記各区間に関する全評価データについて集計した結果である。「パラメータ推定あり」においては、「パラメータ推定なし」に比べ、評価データ全体のうち渋滞状態（旅行速度が 20km/h 以下）にあるデータの占める割合が多いにもかかわらず、いずれの路線でも推定精度向上の効果があり、全体としても平均絶対誤差率を 29.4%から 10.5%へと大幅に低減する結果を得た。特に、区間 5（中道 2 丁目→日吉町 1 丁目）は、感知器の設置密度が比較的低い（616m/基・車線）にもかかわらず平均絶対誤差率が 7.6%と良好な結果であり、車両センサが十分でなくとも十分提供可能であることが確認できた。また、対象道路は信号交差点を含む一般道路であるため、信号による待ち時間のため推定誤差に大きく影響を及ぼすことが少ない。信号機のサイクルが通常 90~150 秒であることと提供情報を受けるドライバーにとっての実用性を考慮すると、平均絶対誤差率が 10%程度であり、かつ誤差 90 秒以内に全体の 87%程度が含まれたという結果は、実用においても良好な性能を持っていると考えられる。

表 3.3.5 各区間におけるパラメータ推定有無別の推定旅行時間精度の比較

区間番号	パラメータ推定なし		パラメータ推定あり	
	平均絶対誤差 (率)	データ数	平均絶対誤差 (率)	データ数
1	97.9 秒 (33.8%)	7	23.1 秒 (8.8%)	1
2	63.3 秒 (22.1%)	10	76.9 秒 (19.7%)	11
3	58.9 秒 (26.4%)	7	19.8 秒 (7.9%)	4
4	85.0 秒 (38.2%)	6	33.2 秒 (11.5%)	10
5	124.9 秒 (28.3%)	8	33.0 秒 (7.6%)	7
6	150.3 秒 (29.8%)	9	63.4 秒 (11.1%)	8
合計	97.4 秒 (29.4%)	47	39.5 秒 (10.5%)	41



(a) パラメータ推定なし (6月5, 6日)



(b) パラメータ推定あり (6月8, 9日)

図 3.3.7 旅行時間推定値と実測値の比較

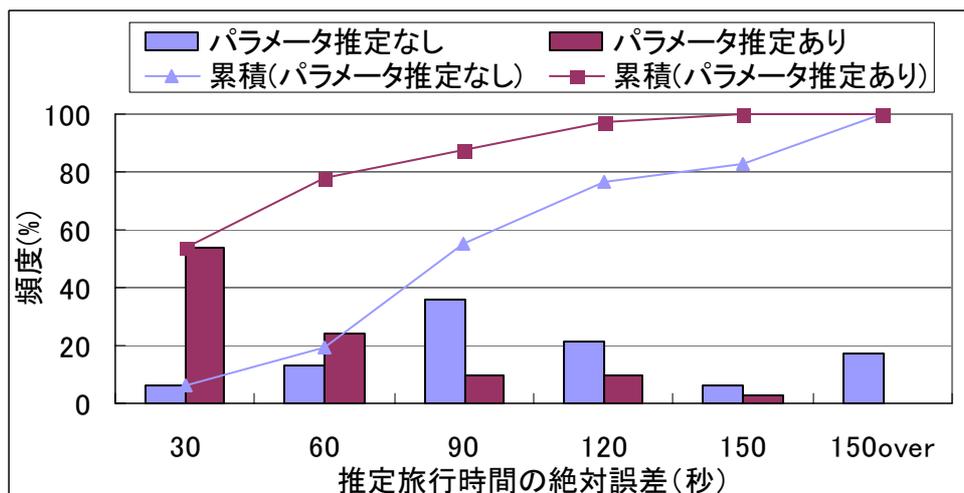


図 3.3.8 旅行時間誤差ヒストグラムの比較

表 3.3.6 旅行時間推定精度の評価結果 (全評価データ)

	パラメータ推定なし	パラメータ推定あり
データ数 (うち渋滞時)	47 (6)	41 (16)
平均絶対誤差 (率)	97.4 秒 (29.4%)	39.5 秒 (10.5%)
RMS 誤差 (率)	110 秒 (31.0%)	52.3 秒 (12.7%)
最大絶対誤差	267 秒	148 秒
誤差 90 秒以下の占める割合	55.3%	87.8%

次に、渋滞状況別の旅行時間推定精度の評価結果を表 3.3.7 に示す。パラメータ推定の有無によらず、非渋滞時に比べて渋滞時には平均絶対誤差で 5%程度悪化しているが、パラメータ推定の有無で悪化の程度はほとんど変わらない。一方、非渋滞時及び渋滞時のいずれにおいても、「パラメータ推定なし」に比べ「パラメータ推定あり」では平均絶対誤差で 20%程度向上しており、渋滞状況によらず同等の改善効果が見られた。以上のことから、本手法は渋滞状況によらず精度向上に効果があることが確認された。

表 3.3.7 渋滞状況別の旅行時間推定精度の評価結果 (全評価データ)

	パラメータ推定なし		パラメータ推定あり	
	非渋滞時	渋滞時	非渋滞時	渋滞時
渋滞状況	非渋滞時	渋滞時	非渋滞時	渋滞時
データ数	41	6	25	16
平均絶対誤差 (率)	93.7 秒 (28.6%)	123 秒 (33.6%)	28.6 秒 (8.4%)	56.5 秒 (13.9%)
RMS 誤差 (率)	105 秒 (30.6%)	140 秒 (34.1%)	35.3 秒 (9.9%)	71.1 秒 (16.1%)
最大絶対誤差	230 秒	267 秒	75.5 秒	148 秒
誤差 90 秒以下の占める割合	61.0%	16.7%	100%	68.8%

次に、上記評価結果について考察を行う。函館地区では、感知器が信号交差点から比較的距離をおいて配置されているため、感知器にとって赤信号による信号待ちの影響を受けにくくなっている。したがって、感知器の設置地点で計測される速度は比較的高速になりやすい。

ところが、実際に道路区間を走行する車両は信号の影響を受けるため、区間全体としての平均速度は感知器が計測する速度に比べて低速になると考えられ、パラメータ推定を行うことによって感知器による車両速度が実態に合うように適切に補正されたため精度が向上したと考えられる（図 3.3.7(a) (b)参照）。このように、本手法を用いれば、感知器の配置方法に関わらず容易に推定精度を向上することができる。

(3) 超音波感知器データ異常時における対策技術の評価

2000年6月5日における対象路線に設置された全感知器（光ビーコンを含む708基）を対象として次のような評価を行った。

まず、各感知器による5分ごとの1日分の出力状況を調査したところ、異常を出力した回数の合計は6719回であり、異常の発生頻度は全体の3.3%であった。次に、本方式の効果を評価するため、各区間の旅行時間を推定する際に感知器データを使えたか否かの合計回数について本方式と従来方式それぞれの場合を比較した。結果を表3.3.8に示す。この結果によると、従来方式では感知器データを使えなかった場合（3495回）でも、本方式を適用すればそのうちの36%（ $3495 - 2230 = 1265$ 回）の場合において感知器データを破棄することなく有効に使えるようになり、感知器が異常値を出力した場合の3分の1程度は精度を確保しつつ情報提供できる見通しを得た。

また、表3.3.9に示すように、中道2丁目付近のリンク（リンク長975m）においては6基の感知器が設置されているが、仮にこのうち2基（5, 6番目の感知器）が異常値を出力した場合を想定して本方式による推定精度の変化について評価を行った。表3.3.10に示すように、感知器が突発的に故障しても推定精度に関して遜色なく精度を保持できることが確認できた。

また、表3.3.11に示すように、渋滞状況別の精度比較を行ったところ、感知器が故障しても渋滞状況によらず精度悪化の程度がいずれも1%未満にとどまった。ここで、渋滞とはリンクの旅行速度が20km/h以下にある交通状況と定義した。このことから、本方式は、渋滞状況によらず精度悪化を抑制する効果があると言える。

表 3.3.8 旅行時間推定に使用したデータ状況別の合計回数

データ利用状況	従来手法	本手法
感知器データ利用	50361 (93.5%)	51626 (95.9%)
感知器データを利用できず	3495 (6.5%)	2230 (4.1%)

表 3.3.9 感知器2基が異常値を出力した場合における補正係数の再配分例

感知器の状態	補正係数						合計
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	
全感知器が正常 (デフォルト)	0.21	0.2	0.16	0.17	0.09	0.16	0.99
感知器2器が異常 (再配分)	0.28	0.27	0.21	0.23	0	0	0.99

表 3.3.10 感知器異常時の推定精度評価

感知器の状況	全感知器が正常 (デフォルト)	感知器 2 器が異常 (再配分)
平均絶対誤差 (率)	13.2 秒 (9.7%)	13.7 秒 (10.1%)
RMS 誤差 (率)	17.0 秒 (13.7%)	18.0 秒 (14.4%)

表 3.3.11 感知器異常時の渋滞状況別の推定精度評価

感知器の状況	全感知器が正常 (デフォルト)		感知器 2 器が異常 (再配分)	
	非渋滞時	渋滞時	非渋滞時	渋滞時
平均絶対誤差 (率)	11.6 秒 (9.3%)	24.0 秒 (12.4%)	12.1 秒 (9.7%)	24.2 秒 (12.7%)
RMS 誤差 (率)	14.9 秒 (13.7%)	27.0 秒 (13.9%)	16.0 秒 (14.4%)	27.6 秒 (14.3%)

(4) 推定旅行時間を用いた最短時間経路の評価

函館地区で、本提案方式を実施した日 (2000 年 6 月 8 日 (木)) 以後において、提供された推定旅行時間を用いた最短時間経路に関する評価を行った。評価対象 OD を図 3.3.9 に示す函館駅前から日吉町 1 丁目までとした。この OD 間の直線距離は約 5.1 km である。本提案方式による最短時間経路は、出発時刻の時点で提供された旅行時間を用いた同時刻和方式による経路探索によって算出されるため出発時刻によって異なる経路が算出されることがある。その他の経路は静的なリンクコスト (距離または平均速度) を用いて計算されるため常に一定であるが、VICS 情報を取得していないカーナビゲーションシステムにおいてよく利用されるものである。

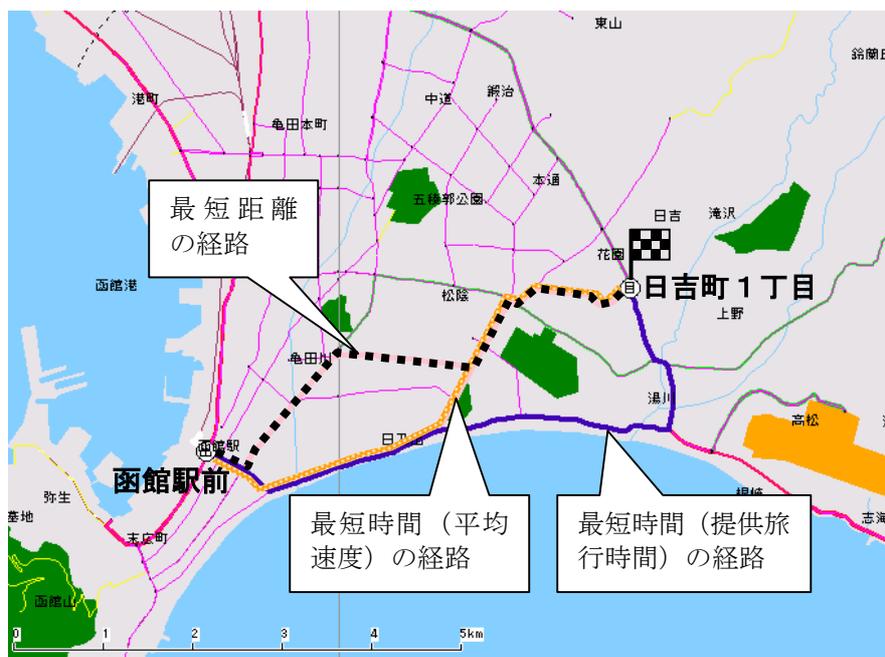


図 3.3.9 対象 OD における経路の比較

出発時刻別の各経路に関する旅行時間のシミュレーション結果を図 3.3.10 及び表 3.3.12 に示す。シミュレーションにおいては、各経路について出発時刻から時間追従方式によって旅行時間を算出しており、実際に車両がその時刻に出発して目的地まで到着するのにかかる旅行時間に近い計算を行っている。これらの結果から明らかなように、最短時間（提供旅行時間）の経路の旅行時間が最も短くなっており、最短距離の経路及び最短時間（平均速度）の経路に対して、平均でそれぞれ 33%及び 11%の時間短縮効果が得られている。最短時間（提供旅行時間）の経路は、最短時間（平均速度）の経路に対して、夕方のピーク時に一度だけ旅行時間が長くなることがあった。これは、上述したように経路探索時には出発時における旅行時間の同時刻和で計算しているが、シミュレーションでは時間追従方式で計算しており、出発時と到着時では交通状況が大きく異なることに起因していると考えられる。つまり、交通状況が大きく変化するような場合には、経路探索にはリアルタイム旅行時間だけでは不十分であり、近未来の予測旅行時間が必要になってくると考えられる。

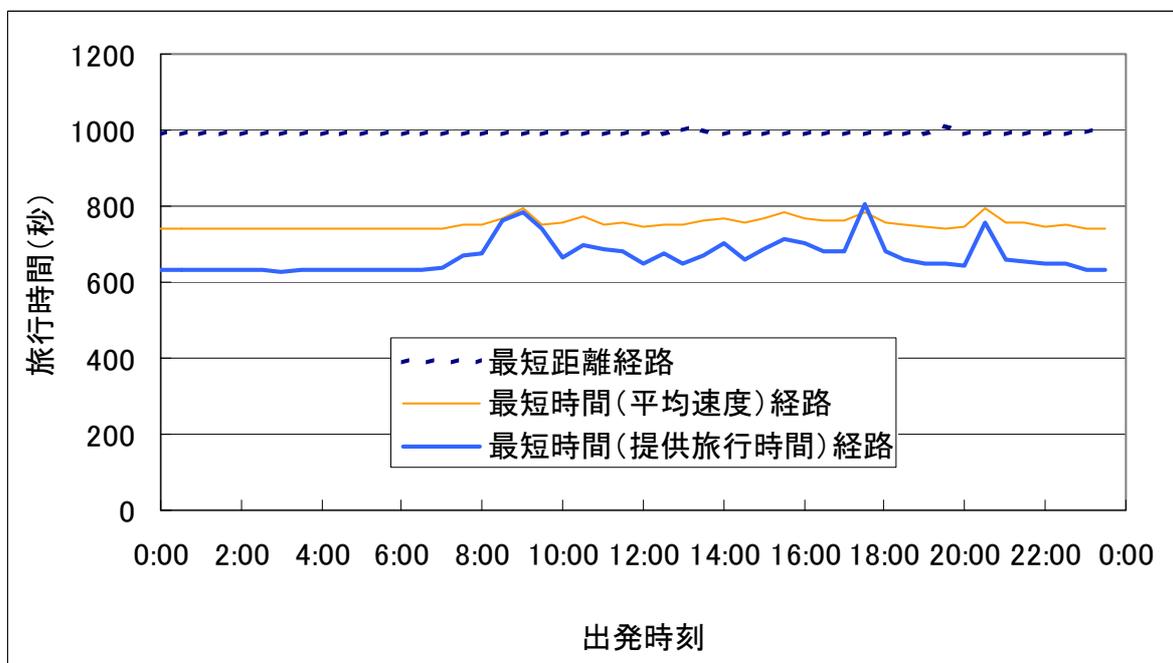


図 3.3.10 各経路における出発時刻別旅行時間シミュレーションの結果

表 3.3.12 各経路における旅行時間シミュレーションの結果

	最短距離の経路	最短時間（平均速度）の経路	最短時間（提供旅行時間）の経路
平均旅行時間	991 秒	752 秒	667 秒
最短時間（提供旅行時間）の経路による短縮時間の平均	324 秒 (33%)	85 秒 (11%)	—

3.4 車両センサによる計測情報の伝播現象を利用した旅行時間予測³⁾

3.4.1 本予測手法の目的

車両センサによる計測情報を用いた既存の旅行時間推定手法においては、2.4 節で述べたように、AVI によって計測される旅行時間を前提とすることがほとんどであり、情報カバレッジの拡大に寄与できないという課題がある。また、事故などの突発事象の発生や道路ネットワークの変更に伴い交通状況が過去の統計と異なる状況においては、誤差が大きくなるという課題もある。

本予測手法は、AVI の計測区間に対象を限定することなく車両感知器の計測情報のみを用いて情報カバレッジの拡大に寄与することができ、かつ過去の統計旅行時間を用いる代わりに渋滞の伝播現象をモデル化することにより、高精度に旅行時間を予測することを目的とするものである。

3.4.2 旅行時間予測アルゴリズム

図 3.4.1 は、首都高速道路における実際の交通状況の変動を時空間遷移図に示したものである。この図から交通状況がある速度で伝播する様子がうかがえる。

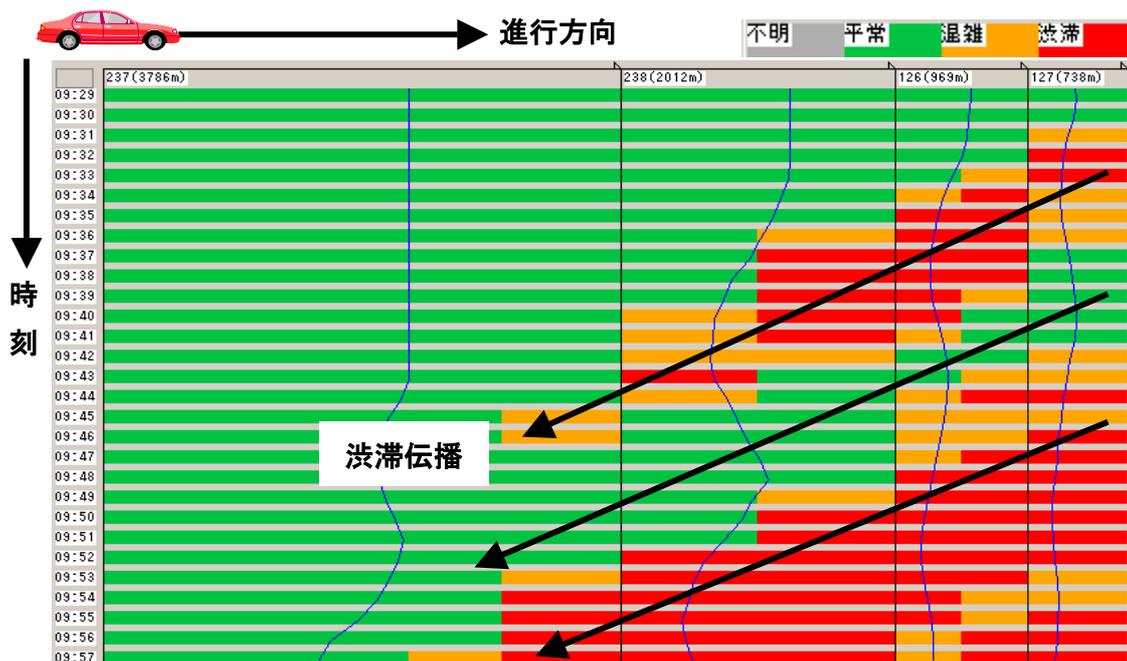


図 3.4.1 交通状況の伝播現象

本予測手法では、この伝播現象をモデル化することを検討する。すなわち、図 3.4.2 に示すように、近隣の感知器データには状態遅れを伴った相関関係があると考え、これに着目する。ところで、感知器データには交通量と占有率（占有時間）の2種類がある。このうち交通量は渋滞状況に応じて2次的に変化するため正確に渋滞状況を把握するのは難しいが占有率はリニアに変化する¹⁴⁾ため、この占有率を用いて相関関係を算出することにした。以下に予測手法の具体的な手順を示す。

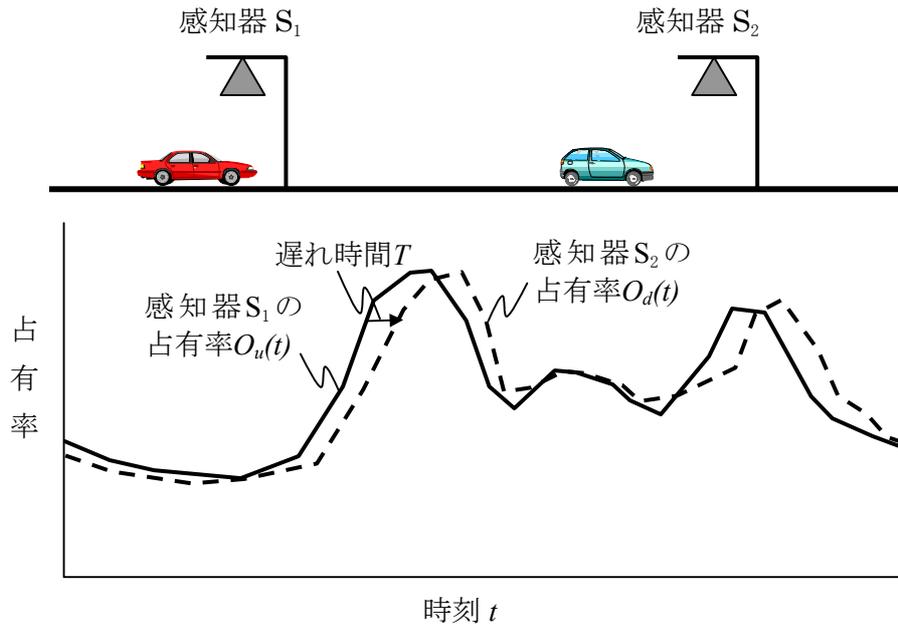


図 3.4.2 占有率データの伝播

(1) 状態遅れ時間の算出

まず、対象区間やその近隣に存在する全ての占有率データについて相関関係の強い状態を見つけ、さらにその状態における遅れ時間を求める。ここでは、次式にて誤差 Err を定義する。

$$Err = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_t \{O_u(t - \tau) - O_d(t)\}^2} \quad (3.4.1)$$

O_u 及び O_d は、それぞれ上流側感知器、下流側感知器によって計測される占有率を表す。また、時刻 t は現在から所定の時間分だけ過去に遡った時間までについて対象とする。上式において、遅れ時間 τ として、例えば 0 分、 ± 1 分、 ± 2 分、 \dots 、 ± 30 分の全てに対して誤差 Err を求め、 Err が最小となる時の τ を当該 2 基の感知器間における遅れ時間 T とする。なお、求められた遅れ時間 T が正の場合は伝播の進行方向が上流から下流方向であることを表し、負の場合は下流から上流方向であることを表す。すなわち、遅れ時間 T の正負により伝播元及び伝播先となる感知器が決定し、このうち伝播先の感知器地点における未来の交通状況が予測対象となる。図 3.4.2 は、遅れ時間 T が正であり、伝播の進行方向が上流から下流方向である場合の例を示している。したがって、この場合の予測対象は下流側の感知器 S_2 における未来の占有率 O_d ということになる。予測対象となる未来の占有率 O_d を O_p と表記することにし、以下、この例に則して、図 3.4.3 を用いて予測アルゴリズムの詳細について説明していく。

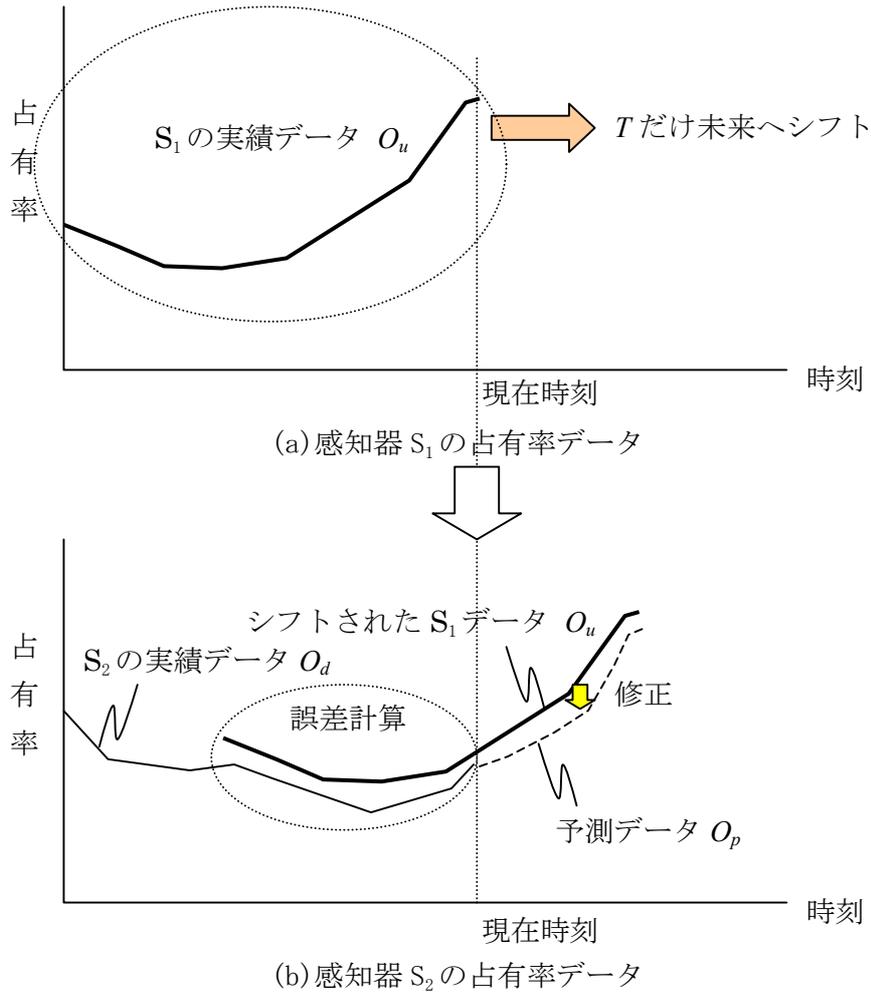


図 3.4.3 占有率データのシフト・修正

(2) データの時間シフト

図 3.4.3(a)に示すように、伝播元である感知器 S_1 の占有率データを上記で求めた遅れ時間 T だけ未来方向へシフトしたものを予測対象である感知器 S_2 の暫定的な予測占有率データとする。

(3) 暫定予測データの修正

一方、感知器 S_2 においては現在までに得られている占有率データの実績値 O_d が得られている。図 3.4.3(b)に示すように、現在から所定の過去の時刻数 n に関して、上記暫定予測データと実績値との誤差計算を行う。誤差計算の方法としては、まず式(3.4.2)に示す平均誤差 e を求め、上記暫定予測データのうち、現在時刻以降の未来について上記で求められた平均誤差 e を用いて式(3.4.3)にて修正する。

$$e = \frac{1}{n} \sum_t \{O_d(t) - O_u(t-T)\} \quad (3.4.2)$$

$$O_p(t) = O_u(t-T) + e \quad (3.4.3)$$

平均誤差 e の算出方法としては、式(3.4.2)に示した差分によるものの代替案として、式(3.4.4)に示す比率で定義してもよく、その場合の修正式は式(3.4.5)になる。

$$e = \frac{1}{n} \sum_t \frac{O_d(t)}{O_u(t-T)} \quad (3.4.4)$$

$$O_p(t) = O_u(t-T) \cdot e \quad (3.4.5)$$

(4) 予測旅行速度の算出

次に、予測された占有率 O_p から予測旅行速度 v_p を算出することを考える。まず、占有率 O と密度 k の関係式は、全ての車両速度と車長 l が等しいと仮定した場合には、計測時間 T_m の元で、次式(3.4.6)が成り立つ。¹⁴⁾

$$O = \frac{l \cdot \sum_i (1/v_i)}{T_m} \cdot 100 = 100lk \quad (3.4.6)$$

よって、密度 k は次式となる。

$$k = \frac{O}{100 \cdot l} \quad (3.4.7)$$

速度算出にあたっては、すでに知られている密度 (k) - 速度 (v) の関係を表す式を用いる。ここでは、次式で表される Greenshields の関係式¹⁴⁾を用いる。

$$v = v_f \cdot \left(1 - \frac{k}{k_j}\right) \quad (3.4.8)$$

自由速度 v_f 及び飽和密度 k_j は最小二乗法によって求められる。式(3.4.3)または式(3.4.5)で求められた予測占有率 O_p を式(3.4.7)に代入して求まる密度 k を式(3.4.8)に代入すると、次式に示す予測旅行速度 v_p が得られる。

$$v_p = v_f \cdot \left(1 - \frac{O_p}{100 \cdot l \cdot k_j}\right) \quad (3.4.9)$$

なお、車長 l としては通常、事前に計測された大型車の混入率等を用いて得られる平均車長を用いる。

(5) 予測旅行時間の算出

3.2 節に提案した手法によって決定された感知器の影響範囲をもとに、上記で算出した各感知器の予測旅行速度 v_p を用いて対象区間の旅行時間予測値を時間追従方式によって求める。

3.4.3 性能評価

1994年10月18日(火)を評価日として設定し、茨城県日立市の主要幹線道路である国道6号下りにおけるAVI計測区間である大和田から兎平に至る約11kmのうちの内部区間2を対象として旅行時間推定精度の評価を行った(図3.4.4)。なお、内部区間1については、伝播方向が上流から下流方向であったため今回は予測ができず、内部区間3については、実測旅行時間が測定できなかったため、それぞれ評価対象とはしない。



図 3.4.4 評価対象区間の概略図

評価の手順は次の通りである。

- (1) 評価対象区間(内部区間2)の出発地点と到着地点のそれぞれにビデオカメラを設置して録画しておき、後に目視によって車両のナンバープレート及びその通過時刻を記録し、ナンバーが一致した車両の通過時刻の差を5分毎に集計・平均化することにより、当該区間の実測旅行時間(出発旅行時間)を得る。
- (2) 本提案の予測手法による予測旅行時間と、従来手法である統計予測方式による予測旅行時間を算出し、それぞれの誤差率を比較する。なお、統計予測方式に用いる統計値は、事前(1994年10月13日(木))に撮影した映像を(1)と同様にして得た実測旅行時間(出発旅行時間)とすることにした。

5分後の予測値に対する精度比較を図3.4.5に示し、さらに30分後までの各予測に対する精度の評価結果を表3.4.1に示す。表の平均絶対誤差率で見ると、5分後の予測値は、提案手法が既存の予測手法である統計予測方式を2.5%改善しており、また3.2節に提案した現況推定手法による推定値の平均絶対誤差率15.4%からも約3%改善した。さらに、30分後までの予測値のいずれもが、統計予測方式を改善していることがわかる。一方、RMS誤差率で見ると両者に有意な差異は見られなかった。これは、本方式は統計予測方式に比べ誤差のばらつき(標準偏差)が若干大きめであることに起因していると考えられる。

次に、表3.4.2に、渋滞状況別の精度(平均絶対誤差率)の比較を示す。渋滞とは実測旅行時間から求まる旅行速度が20km/h以下にある交通状況と定義している。いずれの手法においても、予測先時間によらず概ね渋滞時の方が非渋滞時よりも精度が悪化する傾向にあることがわかる。また、いずれの手法においても予測先時間が未来になればなるほど非渋滞時と渋滞時の精度の差が拡大する傾向にあることがわかる。このことから、非渋滞時に比べて渋

滞時には未来になればなるほど予測がより困難になってくることが予想される。

統計予測方式の適用範囲は AVI など旅行時間を直接計測できる路線に限定されるが、本方式においては普及型感知器による計測情報を使うため適用範囲は広く、情報カバレッジの拡大に寄与できると考えられる。また、精度評価結果においては同等の予測精度であったが、交通事故や工事などの突発事象発生時には、交通状況が過去の同時刻と大きく異なってくるため統計予測方式では誤差が大きくなると考えられる。しかし、本方式でモデル化した状態伝播についてはそれほど大きくは影響を受けないと考えられ、本手法の特性として精度上の安定性が期待できる。

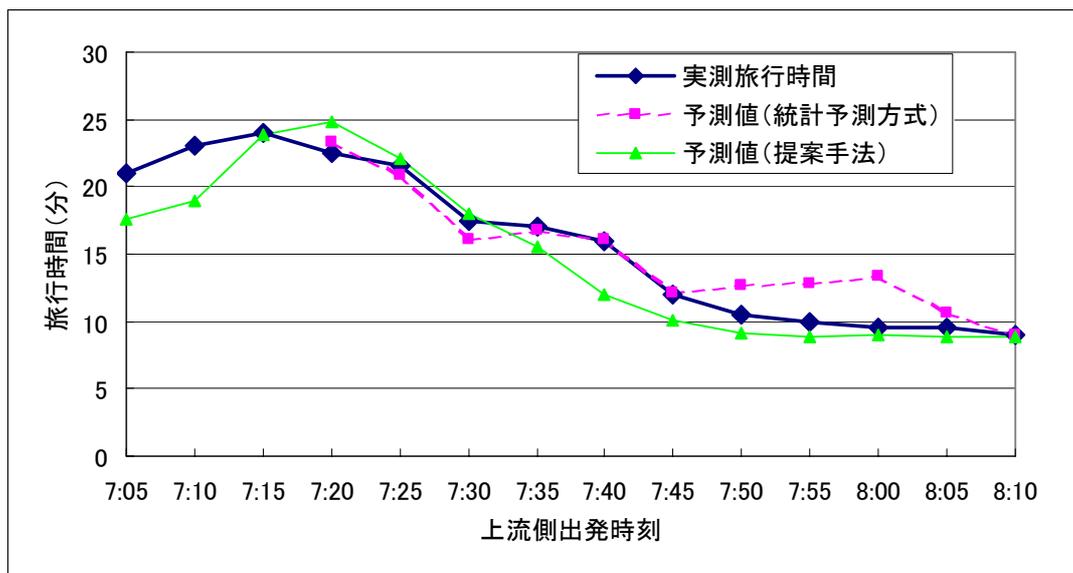


図 3.4.5 予測旅行時間の精度比較 (5分後)

表 3.4.1 予測先時間別の予測精度比較

予測先時間	平均絶対誤差率			
	統計予測方式		提案手法	
	平均絶対誤差率	RMS 誤差率	平均絶対誤差率	RMS 誤差率
5分後	15.0%	18.5%	12.5%	15.8%
10分後	18.6%	21.8%	16.8%	21.7%
15分後	24.7%	26.5%	22.8%	26.5%
20分後	29.5%	32.1%	28.6%	32.9%
25分後	36.0%	38.7%	32.2%	37.2%
30分後	39.9%	42.4%	39.8%	43.1%

表 3. 4. 2 予測先時間別・渋滞状況別の予測精度比較（平均絶対誤差率）

予測先時間	平均絶対誤差率			
	統計予測方式		提案手法	
	非渋滞時	渋滞時	非渋滞時	渋滞時
5 分後	18.0%	10.2%	10.7%	13.5%
10 分後	19.4%	19.7%	15.6%	17.5%
15 分後	19.1%	29.5%	16.8%	26.1%
20 分後	19.6%	36.1%	23.6%	31.4%
25 分後	23.4%	41.9%	24.1%	37.3%
30 分後	17.3%*	47.4%	12.3%*	47.7%

*対象データ数が他に比べて十分でないため参考程度と理解されたい

3.5 蓄積旅行時間の順位マッチングを用いた旅行時間予測⁷⁾

3.5.1 大分県における旅行時間提供とその課題

大分県警では、近年深刻化している渋滞対策として最新技術を駆使した各種設備の導入を進めている。その一つとして AVI (2.3.2 項参照) を導入し、ドライバーに対してリアルタイムに旅行時間を提供することになった。

対象路線を図 3.5.1 に示す。図の太線部が交通情報提供対象路線を表し、その路線上に 395 基の超音波感知器が設置されている。また、12 台の AVI 端末によって旅行時間の計測される区間 (AVI 区間: 合計 8 区間) も示されている。それぞれの AVI 区間の距離は 4~8km であり、各区間はそれぞれ複数の内部区間に区切られている。交通特性としては、朝の通勤時間帯においては大分駅方面に向かう道路が渋滞し、夕方の退勤時間帯においては逆方面が渋滞する傾向がある。

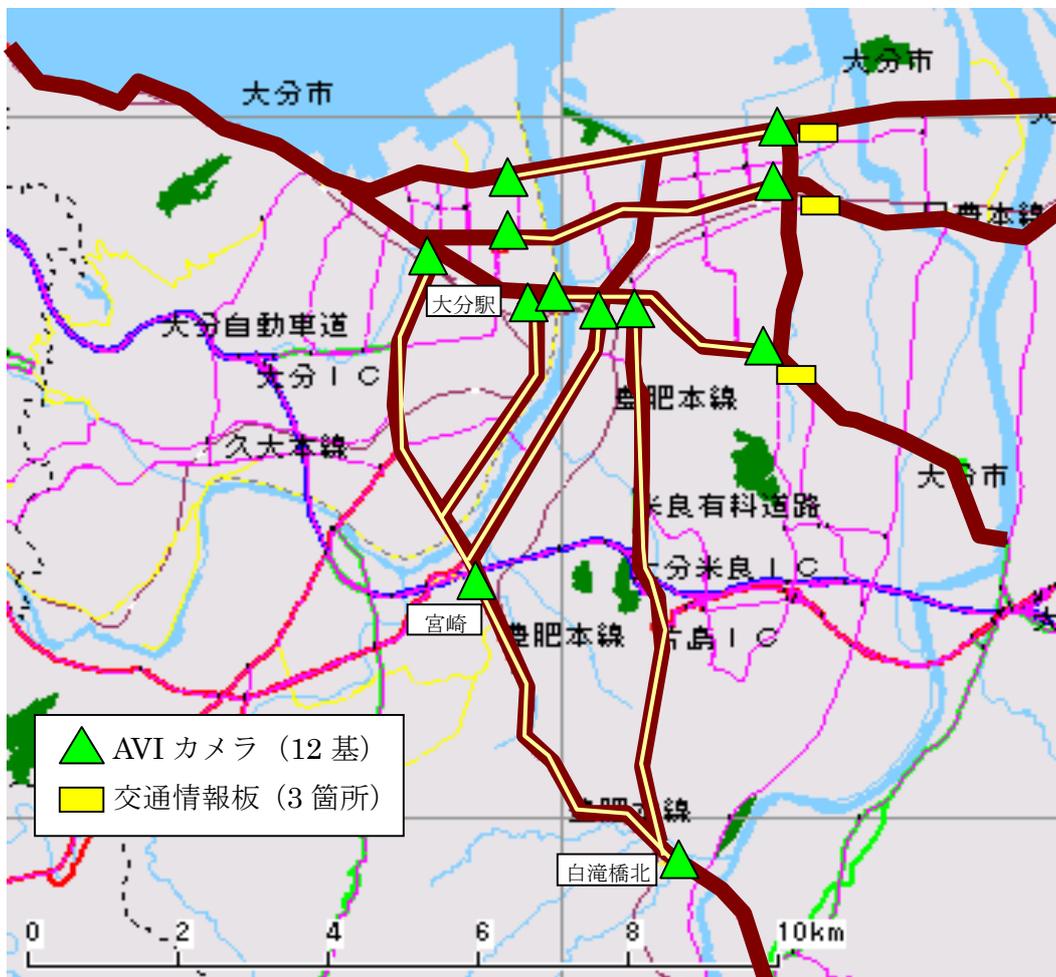


図 3.5.1 対象路線図

次に、システムの概要を図 3.5.2 に示す。AVI システムは画像処理技術によって路上を走行する車両の車番とその通過時刻を自動認識するものである。この AVI システムによって得られる情報は、リアルタイムに U 型信号制御下位装置を経由して旅行時間計測中央装置に集

計される。旅行時間計測中央装置では、2 端末間での車番が照合されその通過時刻の差を求めることによって旅行時間を算出し、さらに各車両の算出旅行時間を 5 分毎に平均化する処理も行う。

一方、超音波感知器の計測情報は、交通情報系中央装置を経由して 5 分毎に旅行時間集計処理装置に集計される。旅行時間集計処理装置では、旅行時間計測中央装置による 5 分間平均旅行時間と超音波感知器による計測情報を利用してリアルタイムに対象区間の旅行時間を推定し、推定結果をモニタ及び交通情報板に表示する。

また、旅行時間集計処理装置で得られる推定旅行時間は路上の交通情報板に表示される。このようにしてドライバーはリアルタイムに交通情報を得ることができ、経路変更などの判断材料として利用することができる。

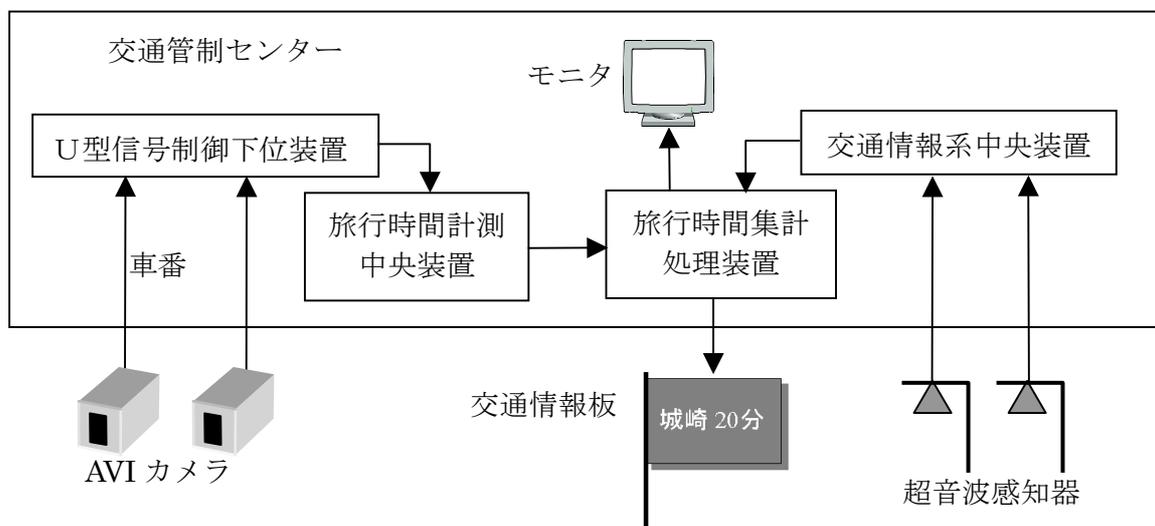


図 3.5.2 システム構成概要

2.4.4 項で説明したように、AVI によって計測される旅行時間には、出発地通過時刻、到着地通過時刻をそれぞれ規準とした 2 種類の旅行時間が存在し、それぞれ出発旅行時間、到着旅行時間と呼ばれる。本来は最新の出発旅行時間を提供すべきであるが、提供する時点で得られている最新の出発旅行時間は過去のものである。このため、これまでの大分県においては、現在時刻において得られる最新の到着旅行時間を出発旅行時間の代わりに上流側の AVI 付近の情報板にてドライバーに提供していた。しかしながら、朝の通勤時間などの渋滞ピーク時には交通状況が大きく変化するため、図 3.5.3 に示すように出発旅行時間に対して到着旅行時間が大きく遅れることにより誤差が大きくなるという課題があった。このため、出発旅行時間を提供すべきであるが、この実測データが得られるのは未来のためこれには予測を行う必要があった。

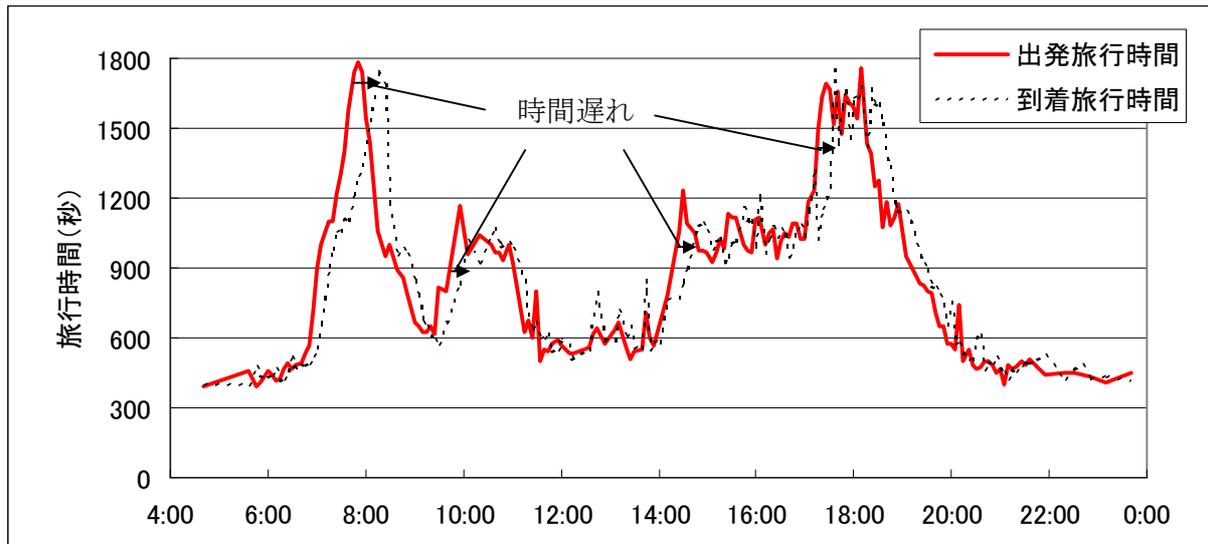


図 3.5.3 到着旅行時間の時間遅れ

3.5.2 AVI 内部区間における旅行時間推定

旅行時間集計処理装置において、図 3.5.4 に示すような AVI 区間の内部区間は超音波感知器の計測情報を補助的に用いて旅行時間を推定する。



図 3.5.4 AVI 区間とその内部区間

AVI 区間で計測された 5 分間平均旅行時間 T_{AVI} に合うように、各内部区間の超音波感知器から得られる速度 v_i を利用して旅行時間を次の式によって内部区間に配分する。

$$V_i = \sum_n a_i(n) \cdot v_i(n) \quad (3.5.1)$$

$$T_i = c \cdot (L_i / V_i + b_i) \quad (3.5.2)$$

$$T_{AVI} = \sum_i T_i \quad (3.5.3)$$

ここで、式(3.5.1)において V_i は区間 i の平均速度、 $a_i(n)$ は n 番目の超音波感知器の補正係数、 $v_i(n)$ は n 番目の感知器から得られる速度である。式(3.5.2)において T_i は区間 i の旅行時間、 L_i は区間長、 b_i は速度の補正係数だけでは表現できない交差点遅れ等を表現するためのバイアス値である。 c は式(3.5.3)の旅行時間 T_{AVI} に合うように動的に補正されるパラメータである。なお、補正係数 $a_i(n)$ 及びバイアス値 b_i は、3.3 節に示したパラメータ推定の手法を

用いて、区間の実測旅行時間より予め求められるパラメータである⁴⁾⁵⁾⁶⁾。また、AVI 計測路線以外の区間では、AVI による計測情報を利用できず超音波感知器による計測情報のみを利用することになるので式(3.5.1)及び式(3.5.2)のみを利用し、式(3.5.2)において $c=1$ として区間旅行時間 T_i を求めることができる。

3.5.3 AVI 計測の時間遅れを解消する旅行時間の推定・予測

AVI システムは、旅行時間を直接計測するシステムであるためその精度の高さに特徴がある。しかし、AVI 区間の距離が長くなると旅行時間計測までの時間遅れが生じやすくなり、朝ピーク時など交通状況が大きく変動する場合に推定旅行時間の誤差が大きくなる場合がある。このような状況への対策として次の2方法によるアプローチを行った。

(1) AVI の計測値と超音波感知器の計測値を用いた旅行時間推定方法 (方法1)

この方法は、超音波感知器の計測情報のみで算出した内部区間旅行時間の和（同時刻和方式で算出）と AVI 計測旅行時間との差が大きければ AVI 計測値の信頼性が低いと判定し、AVI の計測旅行時間と超音波感知器の計測情報からの推定旅行時間の重みをその差に応じて動的に変え旅行時間を推定する方法である。すなわち、一般に精度の高い AVI 計測旅行時間を優先しつつ、時間遅れという弱点を補うためにリアルタイム性の高い超音波感知器の計測情報を用いた推定旅行時間で補完するものである。

(2) 近未来旅行時間予測方法 (方法2)

この方法は、近過去の旅行時間と過去に蓄積した旅行時間とを利用することによって近未来の旅行時間を予測する方法である。図 3.5.5 を用いて具体的に説明する。

まず、下流側 AVI の通過時刻基準で計測された近過去における下流側蓄積旅行時間（到着旅行時間）に対する予測当日の同じ時刻における到着旅行時間の相対順位を算出する。次に、その相対順位に対応する現在時刻（あるいは近未来時刻）における上流側蓄積旅行時間（出発旅行時間）を算出し、その時刻における上流側の予測旅行時間として採用する。これは、本日の交通状態をそれ以前の交通状態と比べて旅行時間相対順位として定量化し、その相対順位が上流側と下流側では大きく変化しないとの仮定に基づいて過去の実績から旅行時間を予測するものである。従来の統計予測モデルによる予測手法の場合には、曜日等の日種ごとの交通変動パターンを基準とするため、この日種の分だけ統計旅行時間を作成する必要がある。それに対して、本手法では、相対順位を用いるため特に日種ごとにデータの管理を行う必要がなく、したがって実際の情報提供システムに組み込む場合にシステム管理を容易にすることができながら高精度に予測できる点に特長がある。図 3.5.6 の旅行時間分布を見るとわかるように、朝、昼、夕のそれぞれにおいて休日と平日では旅行時間の分布に違いが見られるため、予め分離しなくとも相対順位を用いることによって分離できることを期待するものである。

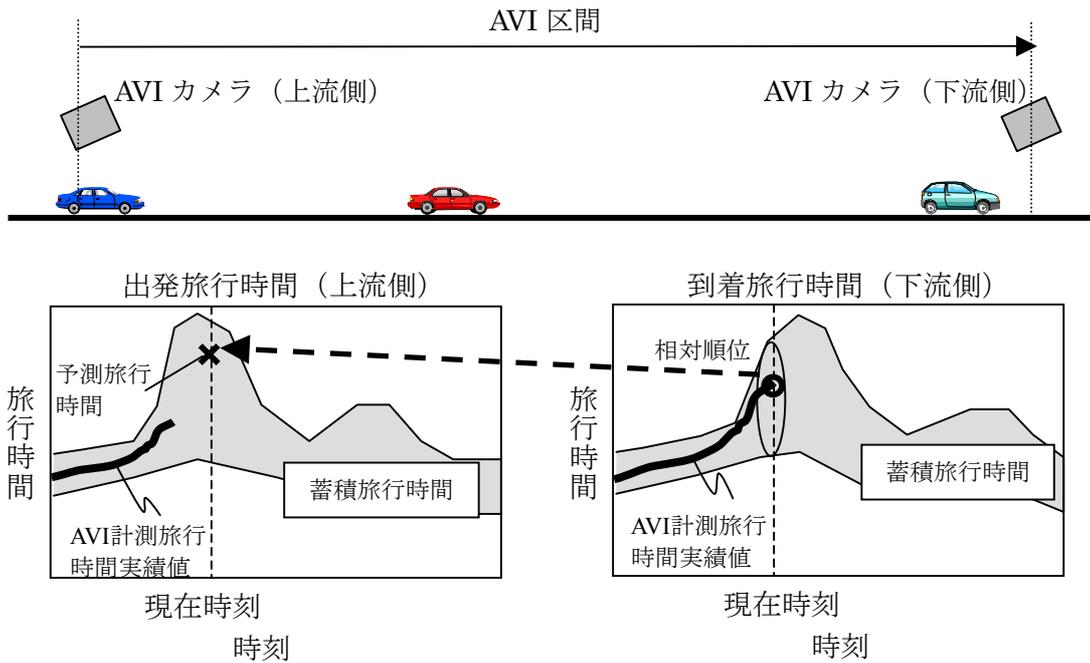


図 3.5.5 旅行時間予測方式の概要

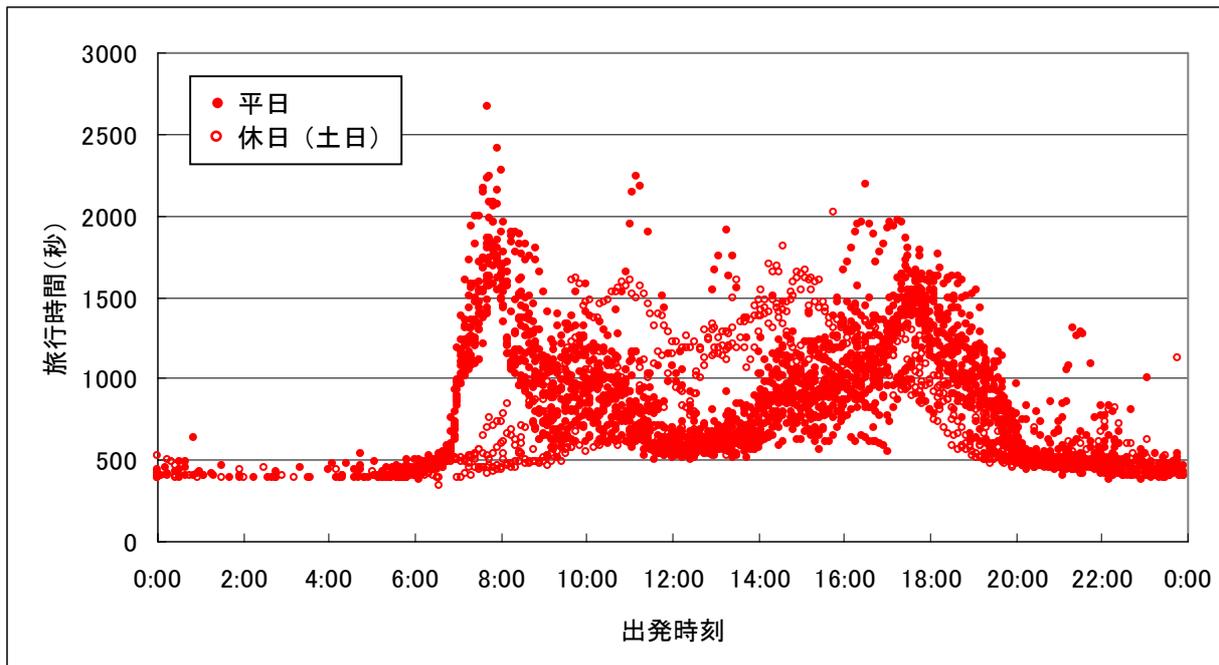


図 3.5.6 平日・休日別の旅行時間分布

3.5.4 性能評価

旅行時間計算方法として超音波感知器のみを利用した推定方法と、上述の AVI 計測の時間遅れを解消する旅行時間推定・予測方法の計 3 方法に関する精度評価を行った。

まず、1999 年 3 月 3 日 (水) の早朝から深夜にかけて、国道 10 号白滝橋北から宮崎までの 5710m の区間について評価を行った。

この日計測した実測旅行時間をまとめた結果は表 3.5.1 に示す通りである。

表 3.5.1 実測旅行時間概況（白滝橋北→宮崎，1999 年 3 月 3 日）

データ数	171
平均旅行時間	865 秒
最小旅行時間	391 秒
最大旅行時間	1787 秒
標準偏差	369 秒

旅行時間計算方法の評価結果を図 3.5.7 及び表 3.5.2 に示す。図 3.5.7 のグラフにおいて、「実測値」は AVI によって計測された出発旅行時間（今回の評価において真値とする）、「AVI」は到着旅行時間、「感知器」は超音波感知器のみを利用した推定方法による推定値、「方法 1」及び「方法 2」はそれぞれ AVI 計測の時間遅れを解消する旅行時間推定方法・予測方法による推定値・予測値である。

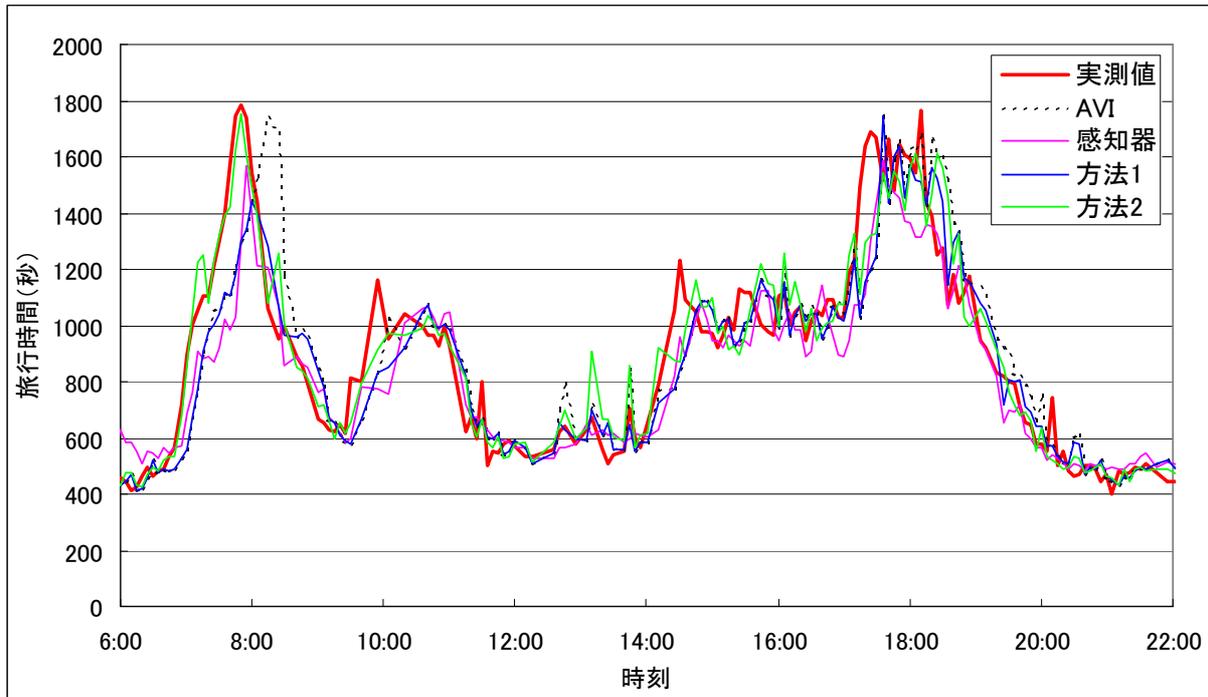


図 3.5.7 推定方法別 5 分毎評価グラフ（1999 年 3 月 3 日）

表 3.5.2 旅行時間推定方法別精度評価結果（1999 年 3 月 3 日）

	AVI	感知器	方法 1	方法 2
平均絶対誤差	177 秒	160 秒	152 秒	118 秒
平均絶対誤差率	12.5%	12.1%	10.6%	8.9%
RMS 誤差率	16.8%	15.6%	13.7%	11.9%
最大誤差	732 秒	712 秒	564 秒	384 秒
最大誤差率	76%	48%	37%	35%
相関係数	0.879	0.922	0.913	0.947

次に、1999年2月16日（火）から3月4日（木）の間の同じ区間における評価を行った。一日平均の誤差評価グラフを図 3.5.8 に、朝ピーク時（6:30AM～9:00AM）における平均絶対誤差の評価グラフを図 3.5.9 に示す。（2月28日（日）はデータが取れなかったため評価していない。）

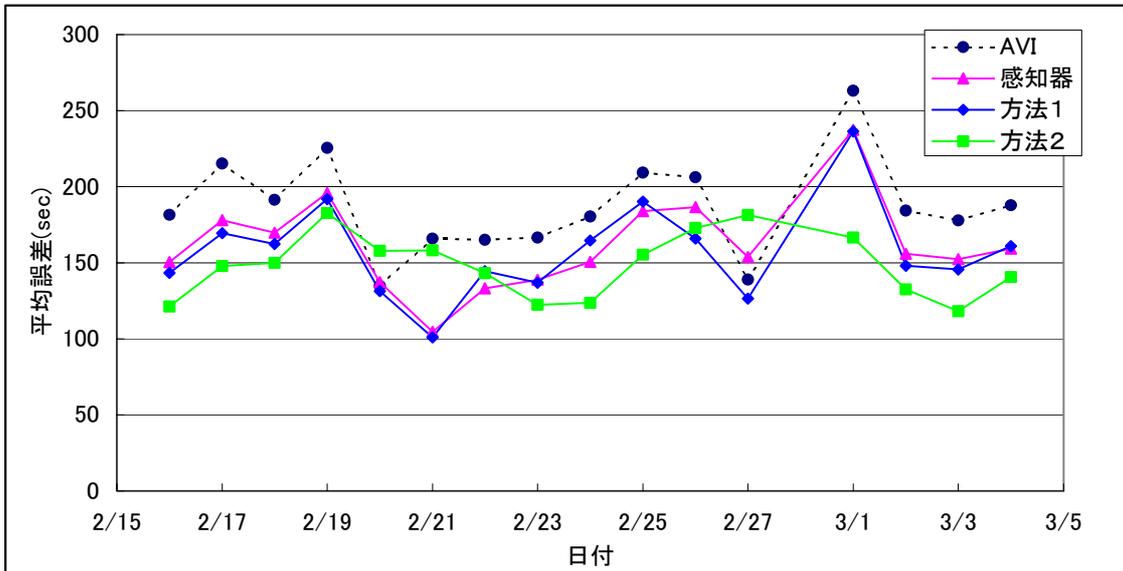


図 3.5.8 1日の推定方法別平均絶対誤差評価グラフ（1999年2月16日～3月4日）

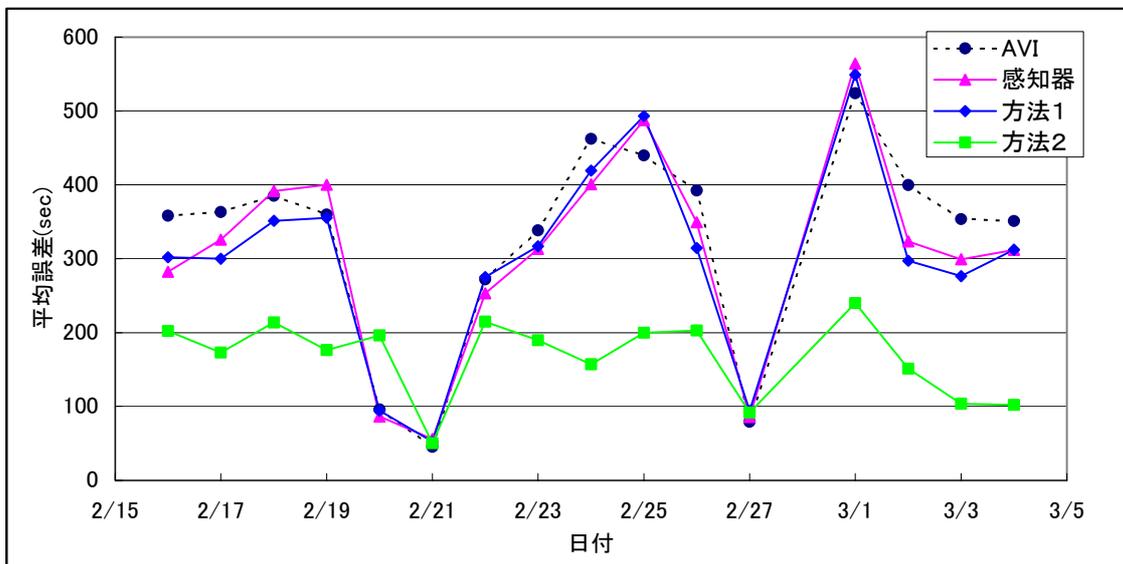


図 3.5.9 朝ピーク時の推定方法別平均絶対誤差評価グラフ（1999年2月16日～3月4日）

これらの結果を考察すると次のことが言える。

- ・ 3月3日の一日全体で評価すると、方法2，方法1，感知器，AVIの順に精度がよく、その他の日でも概ね同様である。

- ・ 3方法とも概ね精度は良好だが、方法2以外は近未来予測を行わないため、朝ピーク時など交通変動が激しい場合に時間遅れを伴い誤差が大きくなる傾向がある。
- ・ 方法2は朝ピーク時など交通パターンが決まっている場合には精度がよいが、それ以外では他の方法と同程度である。

以上から精度の点で方法2が最も優れていると言えるが、詳細に分析すると次の問題があることがわかった。

- ・ 方法2を適用するためには、対象道路が AVI システムで計測する区間であることと、一定量以上の通過交通量によって質のよい旅行時間が蓄積されることが条件である。したがって情報カバレッジの拡大にはあまり寄与できない。
- ・ 土日、祝日など交通パターンが定まりがたい時間帯（平日と休日が明確に分離できない時間帯）には、交通状況によっては精度が不安定になる場合がある。ただし誤差のレベルとしては他の手法と遜色はない。

したがって今後のシステムにおいては、方法2だけを採用するのではなく、方法1あるいは超音波感知器による推定方法の精度特性を踏まえた上で、時間帯または交通状況に応じて動的に各方法に切り替えるようなハイブリッド方式を採用することにより、精度をさらに向上させることができると考えられる。

3.6 提案した旅行時間推定・予測手法の適用範囲

これまで述べたように、本章では、VICS に代表されるインフラサイドの交通情報提供システムを対象として、システムを支える各種車両センサの計測情報を効率的に利用することにより、精度及び情報カバレッジの向上を目指す旅行時間推定及び予測について述べた。

このうち、車両センサの計測情報を効率的に利用した旅行時間推定に関して、感知器の影響範囲を事前学習する旅行時間推定（3.2 節）と個々の感知器の重みを事前学習する旅行時間推定（3.3 節）の二つの手法を挙げた。

また、車両センサの計測情報を高度利用することにより近未来の旅行時間を予測する旅行時間予測に関して、車両センサによる計測情報の伝播現象を利用した旅行時間予測（3.4 節）と蓄積旅行時間の順位マッチングを用いた旅行時間予測（3.5 節）の二つの手法を挙げた。

これら四つの旅行時間推定・予測手法は、それぞれ適用できる区間や得られる交通情報の区分が異なる。各手法の適用範囲を表 3.6.1 にまとめる。適用区間を超音波感知器設置区間と位置付けた各手法は、超音波感知器の設置エリアが広範囲であるため通常においては AVI 設置区間においても適用可能であるが、AVI 設置区間においては、それに適した手法の方が精度としては有利であると考えられる。したがって、この適用範囲に則り、実際の道路区間の交通流計測環境に応じてこれらの手法を組み合わせることにより、交通情報提供システムとしては、精度の向上と情報カバレッジの拡大という 1.1 節で挙げた 2 つの条件をより満足させやすくなると考える。

表 3.6.1 旅行時間推定・予測方法の適用範囲

適用区間	推定（現況）	予測（未来）
AVI 設置区間 （狭域エリア）	感知器の影響範囲を事前学習する旅行時間推定（3.2 節）	蓄積旅行時間の順位マッチングを用いた旅行時間予測（3.5 節）
超音波感知器設置区間 （広域エリア）	個々の感知器の重みを事前学習する旅行時間推定（3.3 節）	車両センサによる計測情報の伝播現象を利用した旅行時間予測（3.4 節）

3.7 まとめ

本章では、VICS に代表されるインフラサイドの交通情報提供システムを対象として、システムを支える各種車両センサの計測情報を効率的に利用することにより、精度及び情報カバレッジの向上を目指す旅行時間推定及び予測について述べた。

感知器の影響範囲を事前学習する旅行時間推定は、感知器の影響範囲が固定であった従来の小区間方式に対して、車両感知器の計測情報と AVI による実測旅行時間とを組み合わせることによって適切な車両感知器の影響範囲を事前に学習するものである。実際の道路において推定精度を評価した結果、提案手法の推定精度が従来手法を上回る結果を得ることができ、本手法によって推定精度を向上できることを確認した。

この推定手法では、過去データを学習することによって得られる感知器の影響範囲を固定的に利用することとしているが、渋滞状況や時間帯等によって影響範囲を可変とすることによりさらに精度を向上できる可能性があり、この動的な影響範囲の学習方法の検討が今後の課題である。

個々の感知器の重みを事前学習する旅行時間推定は、AVI、超音波感知器、光ビーコンによる各計測情報の精度特性等を考慮し、これらの各計測情報を有効利用したそれぞれの推定手法について検討し、かつ各推定手法を動的・排他的に切り替えるハイブリッド方式を採用することにより高精度化を図ったものである。実際の道路において性能を評価した結果、光ビーコンによるアップリンクデータの利用率を大幅に向上でき、また超音波感知器データに基づく推定法においても推定精度を大幅に向上でき、さらに超音波感知器データが異常値を出力した場合でも残りの正常なデータを有効活用することにより推定精度の悪化を抑制できる見通しを得たことをそれぞれ確認できた。さらに、本推定手法による推定旅行時間の効果を確認するため、推定旅行時間を用いた最短時間経路と交通情報を取得しないカーナビゲーションシステムにおいて提供される経路におけるそれぞれの旅行時間についてシミュレーションを用いて比較したところ、前者が時間を短縮する結果を得たことから本推定手法の2次的な効果をも確認することができた。

この推定手法が対象とする情報は、あくまでも現在の交通状況を表す推定情報であるため、例えば 10km を超えるような長距離においては、交通状況が大きく変化すると誤差が悪化することが懸念される。そのような状況においては予測手法が適していると考えられるが、推定手法と予測手法のそれぞれが適している境界条件を見つけることができれば、これらをその条件に応じて動的に使い分けることによって、より精度の高い旅行時間情報を提供することができると考えられる。この境界条件を見出すことが今後の課題である。

車両センサによる計測情報の伝播現象を利用した旅行時間予測は、AVI の計測区間に対象を限定することなく車両感知器の計測情報のみを用いて情報カバレッジの拡大に寄与することができ、かつ過去の統計旅行時間を用いる代わりに渋滞の伝播現象をモデル化することにより、高精度に未来の旅行時間を予測するものである。実際の道路において性能を評価した結果、統計旅行時間をベースとした従来の予測手法と同等の性能であることを確認した。

統計旅行時間をベースとした従来の予測手法に対するこの予測手法の他の利点として、交通事故や工事などの突発事象発生時の影響を抑えられる点が挙げられるが、実際に突発事象が発生した場合の評価を今後実施していきたいと考える。また、この予測手法は、交通状況の伝播遅れを利用したものであるため、この遅れ時間を超える未来の旅行時間を予測することができないという限界がある。今後は、この限界を超えた未来の旅行時間予測手法についても検討していきたいと考える。

蓄積旅行時間の順位マッチングを用いた旅行時間予測は、当日の計測旅行時間の過去に蓄積した旅行時間における相対順位に着目し、当日の交通状況と類似した過去の交通状況を抽出して未来の旅行時間を予測するものである。この予測手法では、相対順位を用いるため特に日種ごとにデータの管理を行う必要がなく、したがって実際の情報提供システムに組み込む場合にシステム管理を容易としながらも高精度に予測できる点に特長がある。実際の道路において性能を評価した結果、この予測手法が他の予測手法に比べて精度の点でも最も優れていることを確認できた。

土日、祝日など交通パターンが定まりがたい日の特定の時間帯では、この予測手法では精度が不安定になることも見られた。こういった状況下においても安定した予測手法を検討することが今後の課題である。

最後に、本章で提案した4手法の適用範囲についてまとめた。この適用範囲に則り、実際の道路区間の交通流計測環境に応じてこれらの手法を組み合わせることにより、交通情報提供システムとしては、精度の向上と情報カバレッジの拡大という2つの条件を満たすことができると考えられる。

参考文献

- 1) 宮内勝：交通情報の収集・管理の高度化，電気学会，産業システム情報化研究会資料，IIS-01-23，pp. 23-26，2001.
- 2) (社)交通工学研究会：交通工学ハンドブック（2001年改訂版），CD-ROM，2001.
- 3) 山根憲一郎ほか：高度道路交通システムのための旅行時間計算方式，平成7年電気学会産業応用部門全国大会，pp. 109-110，1995.
- 4) 横田孝義，山根憲一郎ほか：長野冬季オリンピック大会に向けた高度交通情報提供システムの開発，第18回交通工学研究発表会論文報告集，pp.25-28，1998.
- 5) Yamane, K., Kakuta, M. and Fushiki, T.: Development of VICS with Adaptive Parameter Tuning for Providing Traffic Information, 7th World Congress on Intelligent Transport Systems, Turin, Italy, 2000.
- 6) 山根憲一郎，横田孝義，伏木匠：広域交通情報サービス向け旅行時間推定法，電子情報通信学会論文誌(D-I)，Vol. J87-D-I，No. 3，pp. 329-338，2004.
- 7) Yamane, K. et al., Development of Travel Time Estimation System Combining License Plate Recognition AVI and Ultrasonic Vehicle Detectors, 6th World Congress on Intelligent Transport Systems, Toronto, Canada, 1999.
- 8) 飯田恭敬 編著：土木計画システム分析，森北出版，1991.
- 9) 國時浩一ほか：新交通管理システム -U型交通情報系システム-，三菱電機技報，Vol. 70，No. 12，pp. 44-50，1996.
- 10) 木村昌司：動的交通予測の動向と課題，交通工学，Vol. 36，No. 3，pp. 4-5，2001.
- 11) 熊崎義純：動的経路誘導の現状と今後の課題，交通工学，Vol. 36，No. 3，pp. 2-3，2001.
- 12) 杉本實喜男：警察のITSを支える要素技術，月間交通，東京法令出版，Vol. 32，No. 7，pp. 15-26，2001.
- 13) 金山憲司：画像処理ナンバプレート読取りを用いた旅行時間計測について，電気学会論文誌(D)，vol. 109-D，No. 7，pp. 477-484，1989.
- 14) 飯田恭敬 編著：交通工学，pp. 124-127，国民科学社，1992.

第4章 長周期プローブ情報を用いた旅行時間の推定・予測

4.1 概説

2002年6月より施行された改正道路交通法により規制緩和が実施され、民間事業者が交通情報を収集・加工して提供できるようになった。一方、従来の車両感知器による計測情報をベースとしたVICSシステムにおいては精度や情報収集量に限界があるため、新しい交通情報の収集形態であるプローブカー（フローティングカーとも呼ばれる）が期待されている。

本章では、移動型センサであるプローブカーによる計測情報（以下、プローブ情報）を収集し、このプローブ情報を加工することにより旅行時間を推定する手法¹⁾について述べる。ここでは、一般にプライバシーの問題が少なく収集効率が高い²⁾ことから実用性・実現性の面で有望と期待される業務車両（トラックやタクシー等）をプローブカーの対象とし、またプローブ情報を処理して渋滞や旅行時間などの交通情報を推定する交通情報センターとして業務車両向けの運行管理システムを利用する。業務車両向けの運行管理システムにおいては、車両位置を中心とする動態管理など各システムに応じて様々な目的の上に構築されるが、それに加えて情報通信手段も業務無線からパケット通信まで様々であり、位置や速度等から成るプローブ情報を運行管理システムに収集する頻度は数秒から15分まで様々である。特に、15分に1回など収集頻度が低い場合には、プローブ情報を用いて旅行時間を推定するのが困難になる。なぜなら、連続する二地点間に走行しうる経路が複数存在する状況になりやすくなるためである。そこで、このように収集頻度の低いプローブ情報でも旅行時間推定が可能となるよう、マップマッチングと走行経路の推定技術を融合した手法を検討する。

また、推定された旅行時間を統計処理することにより統計旅行時間データベースを作成し、これを用いて出発時刻に対する目的地への到着時刻や到着時刻に対する出発時刻を予測する旅行時間予測システムについても述べる。

プローブカーシステムにおいて、全国などの広域エリアを対象とし、かつリアルタイムに交通情報を提供するには、携帯電話のような普及型の情報通信手段を用いてプローブ情報を交通情報センターへ送信することが必要となる。プローブ情報の収集頻度が高ければ推定される旅行時間の精度も高くなると考えられるが、その分通信コストも高くなる。すなわち、精度とデータ収集コストの間にはトレードオフの関係があると考えられ、プローブカーシステムの運用者にとっては、プローブ情報の収集頻度が極めて重要な要素となる。そこで、本章では、実際のプローブ情報を用いて、プローブ情報の収集頻度による推定旅行時間の精度を評価することにより、収集頻度が性能にどの程度影響するかについても述べる³⁾⁴⁾。

4.2 VICS の課題

我が国における代表的な交通情報提供システムである VICS は、カーナビゲーションや交通状況推定技術の発達など産官学による努力の甲斐あって 1996 年以来着実に定着しつつある。2004 年度（平成 16 年度）においては、カーナビゲーションの追加オプションである VICS ユニットの年間出荷台数が 270 万台を超えるまで普及している⁵⁾。

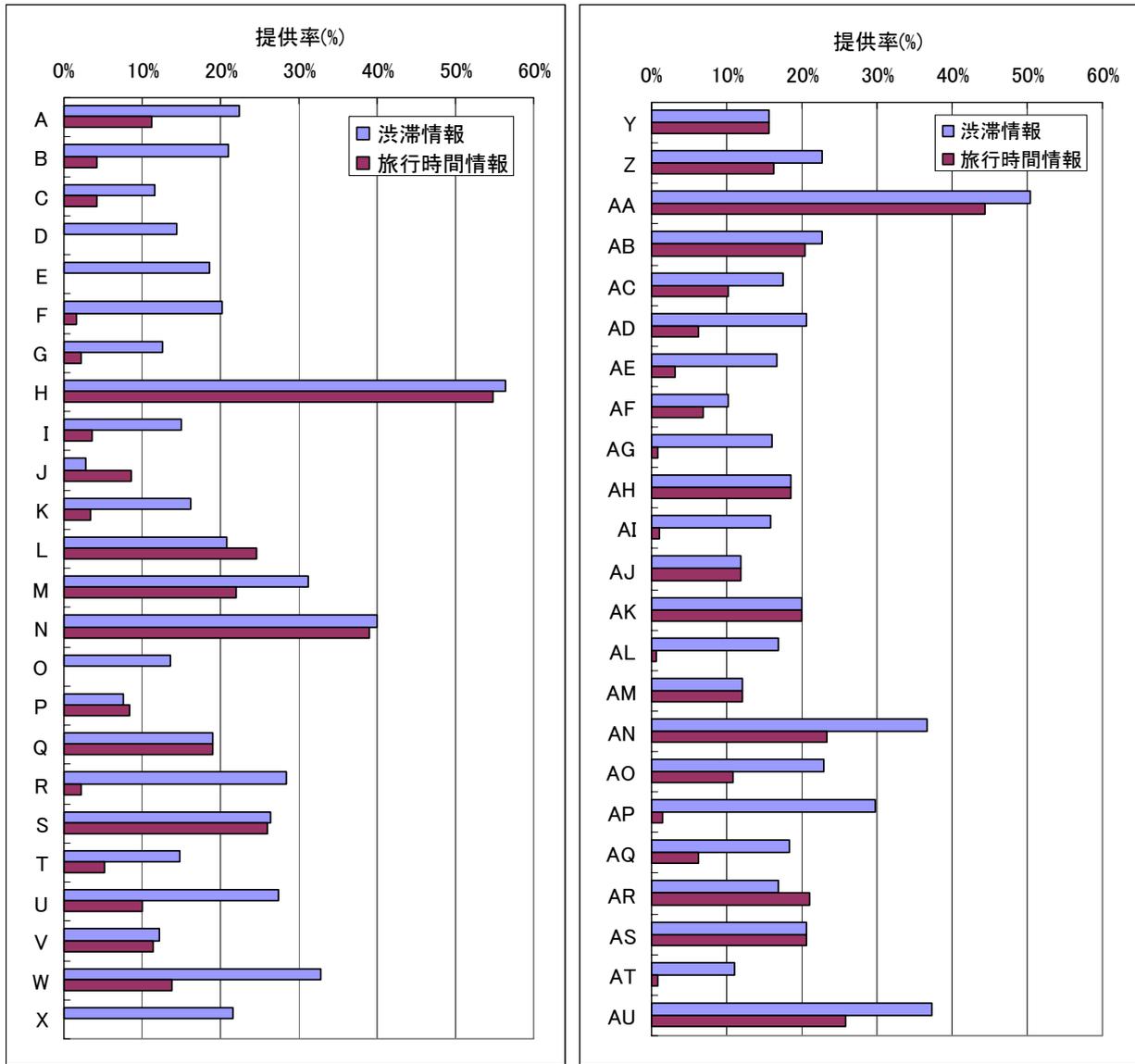
しかしながら、VICS には次に挙げる課題がある。

- (1) 提供される交通情報は現在時点（リアルタイム）の交通状況を示すものであって¹、多くのユーザが欲する、今後の交通状況に関する情報である「予測情報」は提供されていない。
- (2) 道路全体に対して交通情報が提供されている道路の割合（以下では、これを交通情報提供率と呼ぶ）が必ずしも十分でない。

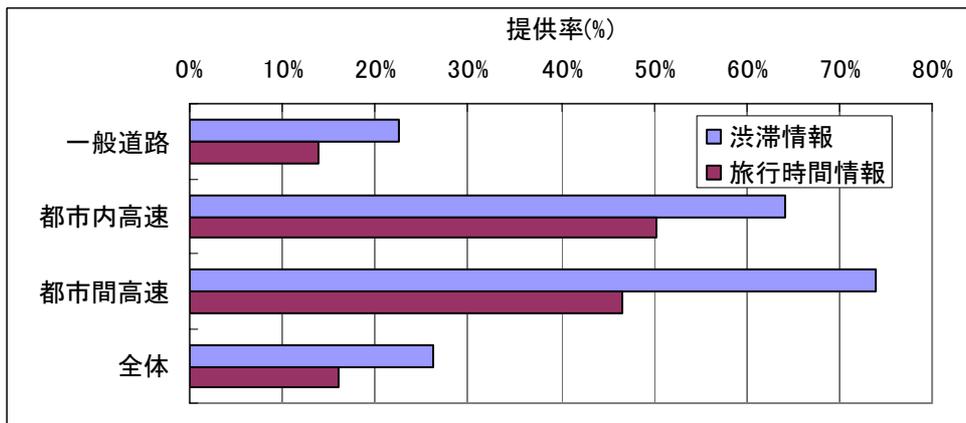
(1)の課題に対しては、2002 年 6 月に施行された改正道路交通法に伴い情報の加工が可能となったため、今後民間事業者をはじめとする各者が研究開発を加速し実用化に向けて推進していくものと考えられる。

(2)の課題に関わる根拠として、実際に提供されている VICS 情報の分析結果を図 4.2.1 に示す。これは、2004 年 1 月 5 日における有効な VICS 情報が提供されたリンクの全 VICS リンクに占める割合を示している。これによれば、一般道路においては渋滞情報の提供率が 50% 以下のところがほとんどである。特に、利用価値の高い旅行時間の提供率についてはほとんどが 30% 以下となっており、中には全く提供されていない地域もある。さらに、図 4.2.2 に東京と関東のある地方工業都市（人口約 20 万人）における実際の VICS 情報の提供状況を示す。図において、VICS リンク道路（ピンク）の両脇に 3 色（赤、橙、緑）で表示されている太線は、各道路方向別の渋滞状況を意味している。無表示あるいは灰色表示（不明）の道路は渋滞情報が実質的に提供されていないことを表している。図から地方工業都市は東京よりも情報提供密度がはるかに少ないことがわかる。VICS 情報は VICS リンクを対象として提供する仕組みになっているが、実際には VICS リンクではないが交通量の少なくない道路（非 VICS リンクと呼ぶ）が多数存在し、この非 VICS リンクまで含めると提供率はさらに大きく低下する。このように VICS において交通情報提供率が低い原因として、車両感知器を運用するとデータを交通管制センターまで送信するための通信やメンテナンスに関わるコストが恒常的に必要となるためと考えられる。これらコストの面から、今後においても車両感知器の普及と交通情報提供率は必ずしも拡大していく状況ではないと考えられる。このような状況にあってもなお交通情報提供率（交通情報カバレッジ）を拡大していくために、近年では、これまでの車両感知器を整備するという施策からプローブカーによって交通情報を収集するという効率の良い新しい施策への転換が図られている。

¹ データ集計及び送信の時間が必要なため、厳密には数分から十分程度の時間遅れがある

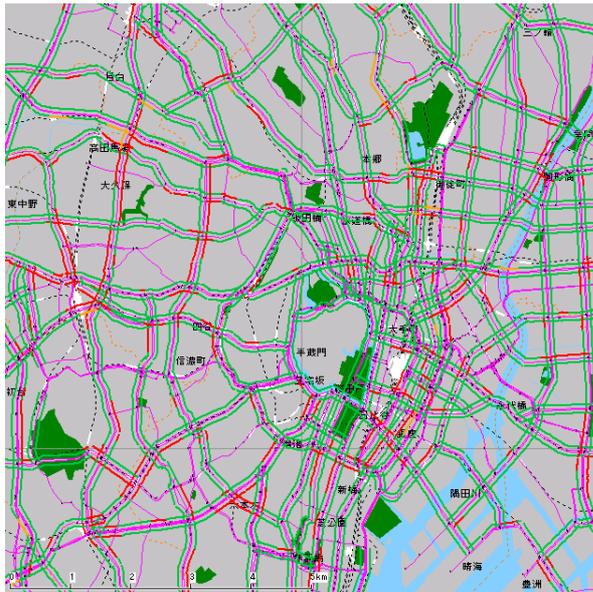


(a) 一般道路 (都道府県別)

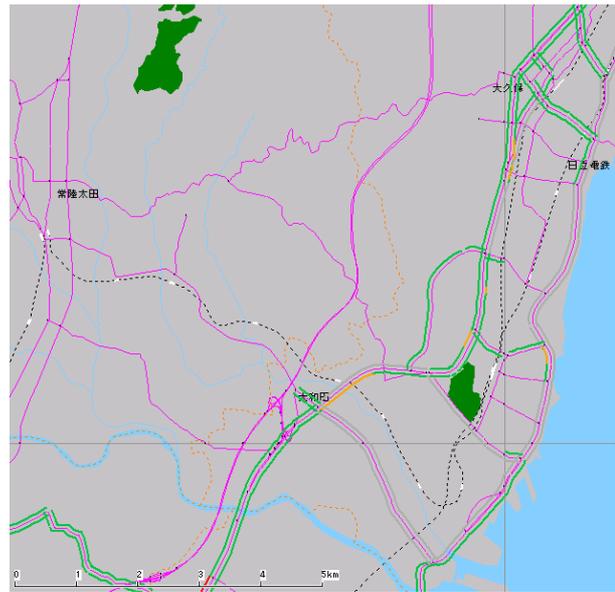


(b) 一般道路, 高速道路の平均

図 4.2.1 全 VICS リンクに対する情報提供の割合 (2004 年 1 月 5 日)



(a) 東京都心部



(b) 関東の地方工業都市

図 4.2.2 VICS 情報の提供状況

4.3 プロブカーシステムの概要

4.3.1 プロブカーシステムの構成

一般的なプロブカーシステムの概要を図 4.3.1 に示す。システムは、プロブカーと交通情報センターから構成される。プロブカーは、車両を移動型センサとしてとらえ、走行速度、位置情報など車両側で計測される情報（プローブ情報）を情報通信機能によってセンターに送信する車両であり、その機能を実現するため GPS アンテナ、通信装置と接続された車載端末を搭載している。一方、交通情報センターでは、収集したプローブ情報を旅行時間に変換・推定する。そして、この推定された旅行時間をさらに加工処理することにより、統計旅行時間などの予測旅行時間を得ることも可能であり、さらに目的地への到着時刻予測も可能である。このシステムの特長は、車両が走行しながら計測した交通状況に関するデータを携帯電話などの情報通信手段を使って収集できるため、ほとんどの道路に関する交通情報を計測・収集できることに加え、旅行時間を生成するのに推定処理が必要であった車両感知器とは異なり、正確な旅行時間を直接計測できるため情報の精度が高いことが挙げられる。

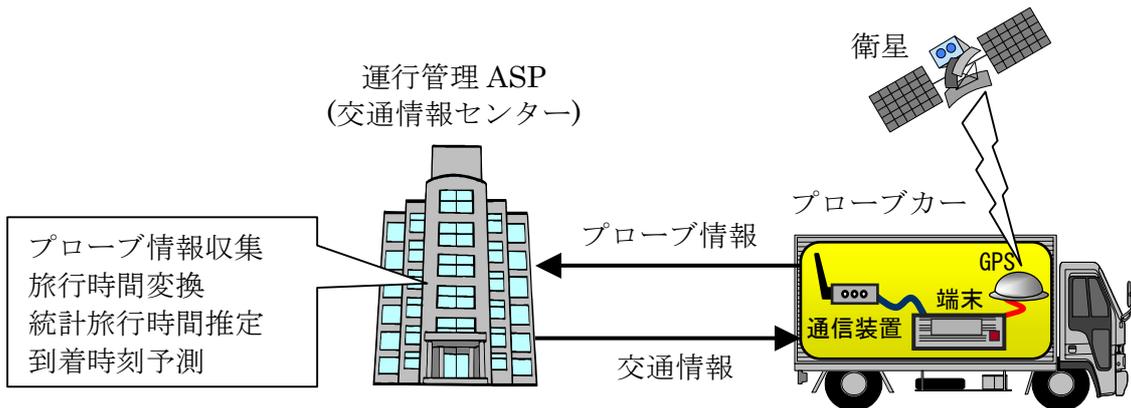


図 4.3.1 プローブカーシステムの概要

4.3.2 トラック運行管理 ASP 及び車載端末の概要

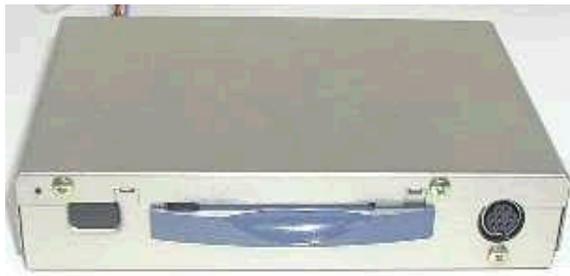
(1) トラック運行管理 ASP の概要

プローブカーシステムの一部である交通情報センターとして機能するトラック運行管理 ASP について説明する。今回の実験に利用したトラック運行管理 ASP⁶⁾は、2001 年 4 月より運用開始されており、ASP (Application Service Provider) によるサービス形態とすることにより、顧客は独自のサーバや専用回線等の設備を導入することなく、トラックの運行管理に関する各種機能を低コストで提供することを可能にしたことが最大の特長である。主なサービスとしては、車両動態管理、運行管理、及びメッセージ送信の各サービスがある。車両動態管理においては、車両の位置情報がセンターへ送信されるので、各営業所では、インターネットを介して運行管理 ASP にアクセスすることにより、地図上での車両位置を確認することができる。運行管理においては、日報出力、車両の走行時間、荷積み／荷卸し等の作業時間等の実績データを基に、運行日報を自動出力する。また、ドライバーの出退勤の管理や残業等の管理を行う労務管理機能、スピードの出し過ぎや急加速、急減速等のデータを収集する安全管理機能、冷蔵庫等の庫内温度データを管理する品質管理機能を備えている。メッセージ送信においては、緊急な配送オーダーの情報や旅行時間や渋滞などの交通情報を車両にテキストメッセージで送信する。

本研究においては、この運行管理 ASP に収集される車両の位置情報をプローブ情報として利用し、後述する旅行時間への変換手法により旅行時間を推定する。

(2) 車載端末の概要

運行管理 ASP で使われる専用の車載端末の外観と仕様をそれぞれ図 4.3.2 と表 4.3.1 に示す。この端末は、サイズがコンパクトであることと、標準仕様で一台当たり 10 万円（取り付け工事費を含む）と比較的安価で提供できることが特長である。一方、地図データを持たないため、カーナビのように計測した位置データを即座にマップマッチングすることができないといった制限がある。



(a) 前面



(b) 背面

図 4.3.2 車載端末の外観

表 4.3.1 車載端末の仕様

CPU		SH3 7709 70MHz
OS		μITRON
ブラウザ	Web 対応版	HTML3.2 対応
	Web 未対応版	なし
メモリ		DRAM:4MB, フラッシュメモリ:4MB, コンパクトフラッシュドライブ標準搭載
映像出力方式	Web 対応版	ビデオ信号出力
	Web 未対応版	なし
外部インターフェース		RS-232C×2, シリアル×1, PS/2
GPS	受信方式	マルチチャンネル (15チャンネル)
	受信周波数	1575.42MHz
	感度	-130dBm 以下
外形寸法		137.5mm (W) × 27.7mm (H) × 90mm (D)
消費電力		約 3W
電源電圧		DC10~24V (バッテリー電源より供給)
使用温度範囲	動作時	-10°C~60°C
	非動作時	-20°C~70°C
拡張オプション	車載モニタ	インターネットブラウザやメッセージの表示に利用
	操作パネル	作業入力など各種データ入力に利用
	車速センサ	車両より実際の走行データを取り込む
	温度センサ	庫内の温度情報を取り込む
	デジタルタコグラフ	国土交通省認定のデジタルタコグラフと接続が可能

4.4 長周期プローブ情報を用いた旅行時間推定

4.4.1 プローブ情報から旅行時間への変換

(1) プローブ情報

まず、運行管理 ASP（交通情報センター）によって収集されるプローブ情報について、表 4.4.1 のサンプルを参照し説明する。データサンプルからわかるように、位置情報の出力間隔は 15 分毎となっている。運行管理 ASP において、車載端末は GPS(Global Positioning System: 全地球測位システム)を搭載しているため車載機内部では 1 秒毎に位置情報等を取得しているが、この位置情報を交通情報センターに送信するのに NTTDoCoMo 社等のパケット通信を利用しており、今回の実験では通信料金を軽減するためデータ送信周期を 15 分毎としている（運行管理の目的においてはこの周期で十分である）。ただし、このデータ送信周期については、交通情報センターからの設定で自由に更新できるため、将来通信料金が低下した場合には周期を短くすることも可能である。

表 4.4.1 運行管理 ASP の車載端末によるプローブ情報の一例

SEQ	受信時間	受信情報	異常情報	データ長	伝送区分	伝送区分	緯度	経度	速度
54908	2001/5/21 5:13	002d00109113	0	16	91	GPSデータ(起動時)	1287081	5039162	0
54909	2001/5/21 5:13	002d000501	0	5	1	ACK			
54928	2001/5/21 5:28	002d00108113	0	16	81	GPSデータ(定周期)	1287087	5039151	0
54947	2001/5/21 5:43	002d00108113	0	16	81	GPSデータ(定周期)	1285912	5037919	0
54966	2001/5/21 5:58	002d00108113	0	16	81	GPSデータ(定周期)	1284862	5034058	67
54983	2001/5/21 6:13	002d00108113	0	16	81	GPSデータ(定周期)	1282276	5031810	66
55083	2001/5/21 7:03	002d00109113	0	16	91	GPSデータ(起動時)	1280993	5031675	0
55084	2001/5/21 7:03	002d000501	0	5	1	ACK			
55113	2001/5/21 7:18	002d00108113	0	16	81	GPSデータ(定周期)	1282267	5031191	0
55153	2001/5/21 7:33	002d00108113	0	16	81	GPSデータ(定周期)	1283776	5031733	0
55173	2001/5/21 7:43	002d00109113	0	16	91	GPSデータ(起動時)	1284063	5032037	0
55174	2001/5/21 7:43	002d000501	0	5	1	ACK			
55201	2001/5/21 7:58	002d00108113	0	16	81	GPSデータ(定周期)	1284069	5032035	0
55246	2001/5/21 8:13	002d000583	0	5	83	GPSデータ(車両停止状態)			
55280	2001/5/21 8:28	002d000583	0	5	83	GPSデータ(車両停止状態)			
55302	2001/5/21 8:38	002d00109113	0	16	91	GPSデータ(起動時)	1284067	5032040	0
55303	2001/5/21 8:38	002d000501	0	5	1	ACK			
55348	2001/5/21 8:53	002d00108113	0	16	81	GPSデータ(定周期)	1284058	5032061	0
55389	2001/5/21 9:09	002d00109113	0	16	91	GPSデータ(起動時)	1284058	5032062	0
55390	2001/5/21 9:09	002d000501	0	5	1	ACK			
55442	2001/5/21 9:34	002d00109113	0	16	91	GPSデータ(起動時)	1282832	5031222	0
55443	2001/5/21 9:34	002d000501	0	5	1	ACK			
55480	2001/5/21 9:49	002d00108113	0	16	81	GPSデータ(定周期)	1283167	5031323	22

(2) マップマッチング

プローブ情報の位置データ（緯度、経度）は、GPS によるデータのため誤差が生じる。GPS 衛星を管理している米国国防総省によれば、95 パーセントの誤差は水平方向で 13~36 m以下、鉛直方向で 22~77m以下と言われており⁷⁾、このままのデータでは車両がどの道路を走行したのか特定できない場合がある。そこで、誤差を含む位置データを地図データと照らし合わせて道路上の位置として推定する「マップマッチング」の技術が必要になる。マップマッチングはカーナビゲーションなどでよく用いられる技術⁸⁾であるが、1 秒単位で常に計測することができる場合は図 4.4.1 に示すように車両の軌跡ベクトルを用い、これと道路ベクトルを比較することで GPS から得られた位置を道路上の位置に修正するものである。

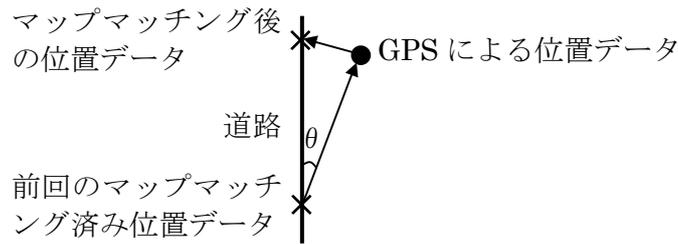


図 4.4.1 軌跡ベクトルによるマップマッチング

しかしながら、今回のように元来の目的が動態管理であることと通信コスト低減という観点から 15 分という長周期でしか位置情報を取得できない場合には従来の軌跡ベクトルの考え方を利用することはできないため、1つの GPS 位置データからマップマッチング可能な新しい手法が必要となる。この際、1点の位置データから最も近い道路にマッチングする方法が考えられるが、GPS 計測情報に元々の誤差があるため、道路がある程度密集している場合には誤ってマッチングしてしまうことが懸念される。そこで、所定の許容範囲を設定し、その範囲に入るリンクのうち上位 4 リンクを一旦候補位置として抽出しておき、後述する経路推定処理によって走行経路を特定することにした。ここでは、GPS による位置情報と地図データを比較して候補位置を抽出するまでのマップマッチング処理について図 4.4.2 のフローチャートを用いて説明する。

- [Step1] まず、収集されたプローブ情報と地図データを読み込んでメモリに格納する。
 - [Step2] そして、各位置データの緯度、経度データから対象となる 2 次メッシュコードを算出する。ここに、2 次メッシュコードとは、DRM やカーナビゲーションで使われる地図データの区切り単位（約 10km 四方）であり、6 桁の数字で表されるものである。
 - [Step3] 次に、該当 2 次メッシュコードに関する地図データ（DRM 及び VICS リンク）における補間点が位置データから所定範囲内に入っているか否かを判定する。
 - [Step4] 所定範囲内に入っていれば、すでに登録されている補間点の上位 4 位以内か否かを判定する。ここでは、補間点とプローブ情報位置との距離が短いほど上位にランクされることにしている。
 - [Step5] 上位 4 位以内であれば、該当補間点を候補位置として登録する。
 - [Step6] 該当 2 次メッシュ内における全ての補間点に関して [Step 3] ~ [Step 5] を繰り返す。
- 以上のようにして、一つのプローブ情報に含まれる位置データに関して候補位置を最大 4 点まで抽出することができる。

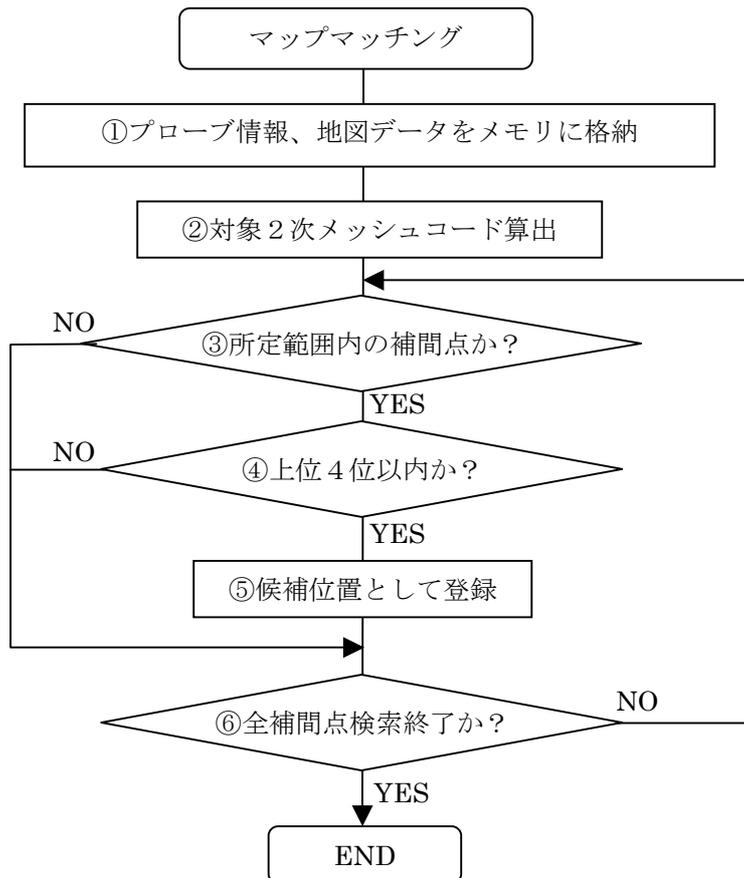


図 4.4.2 マップマッチング処理のフローチャート

(3)経路推定

マップマッチングの有無に関わらず、15分という比較的長い時間間隔で収集される位置情報が得られたとしても、それだけでは途中でどの経路を走行したかを知ることは困難である。連続して収集された位置情報から途中の走行経路を推定することによってはじめて地図上に渋滞情報をマッピングすることができ利用価値が生まれる。ここでは、この経路推定に関するアルゴリズムについて説明する。

一つのプローブ情報の位置データに対して前記マップマッチング処理によって抽出された候補位置があるが、ここでは図 4.4.3 の例に示す A→B→C と連続移動した3つのプローブカー位置に着目してその間の経路を推定する。この推定処理に関する手順等の詳細について図 4.4.4 のフローチャートを用いて説明する。

[Step1]まず、マップマッチングで出力されたプローブカーの候補位置、地図データ、及び経路探索用の参照テーブルデータを読み込んでメモリに格納する。

[Step2]次に、当該プローブカー位置 (A) が最初のデータである (すなわち移動開始時のデータである) か否かを判定する。

[Step3]移動開始時のデータの場合には、推定位置としてプローブカー位置と候補位置の距離が最短であるものを採用する (図 4.4.3 の例では A₂が該当)。

[Step4]次に、その次のプローブカー位置である B に関する4つの候補位置 (B₁~B₄)、及び

さらに次のプローブカー位置である C に関する 2 つの候補位置 (C₁, C₂) の全ての組み合わせである 8 つの通過パターン (表 4.4.2) を、A→B→C という移動に関する候補経路として挙げ、それぞれに対して途中に走行した経路を推定する (経路推定には Dijkstra 法⁹⁾¹⁰⁾を利用)。

[Step5] 8 つの通過パターンに対応するそれぞれの候補経路のうち、最短距離のもの (図 4.4.3 の例で A₂→B₂→C₂とする) を推定経路と決定し、次のプローブカー位置 B に対応する候補位置 (B₂) 及び経路 (A₂→B₂) を確定する。

[Step6] 当該プローブカー位置 (A) の次の次のプローブカー位置 (C) でデータが終了 (すなわち移動終了) しているかを判定し、終了するまで[Step 4]及び [Step 5]]を繰り返す。

[Step7][Step 5]で決定した推定経路に対応するプローブカー位置(C)に対応する候補位置 (C₂) 及び経路 (B₂→C₂) を確定する。

[Step 5]において推定経路として最短距離経路を採択しているのは、走行中に路線が頻繁に入れ替わる (例えば、A₂→B₁→C₂) ような通常では考えにくい経路では距離が伸びることが多いためであり、したがって最短距離経路は最も一般的な経路と考えられる。以上のようにして、連続するプローブカー位置データから走行経路を推定することができる。

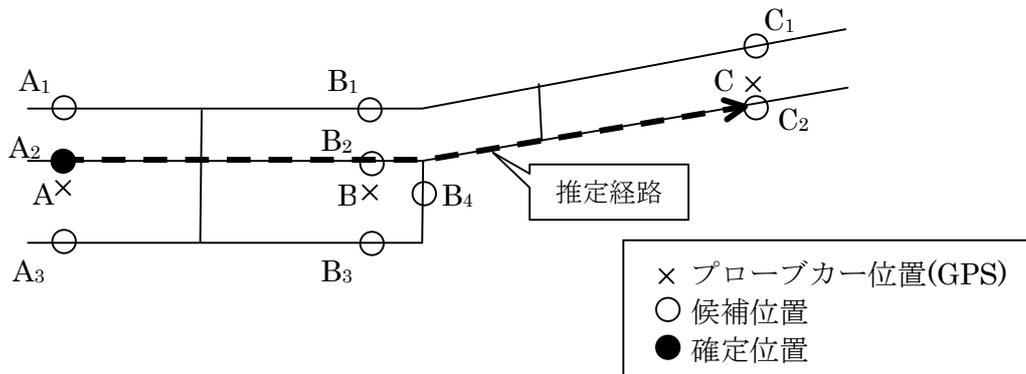


図 4.4.3 プローブカー位置と候補位置

表 4.4.2 通過パターン

パターン番号	第一通過点	第二通過点	第三通過点
1	A ₂	B ₁	C ₁
2	A ₂	B ₁	C ₂
3	A ₂	B ₂	C ₁
4	A ₂	B ₂	C ₂
5	A ₂	B ₃	C ₁
6	A ₂	B ₃	C ₂
7	A ₂	B ₄	C ₁
8	A ₂	B ₄	C ₂

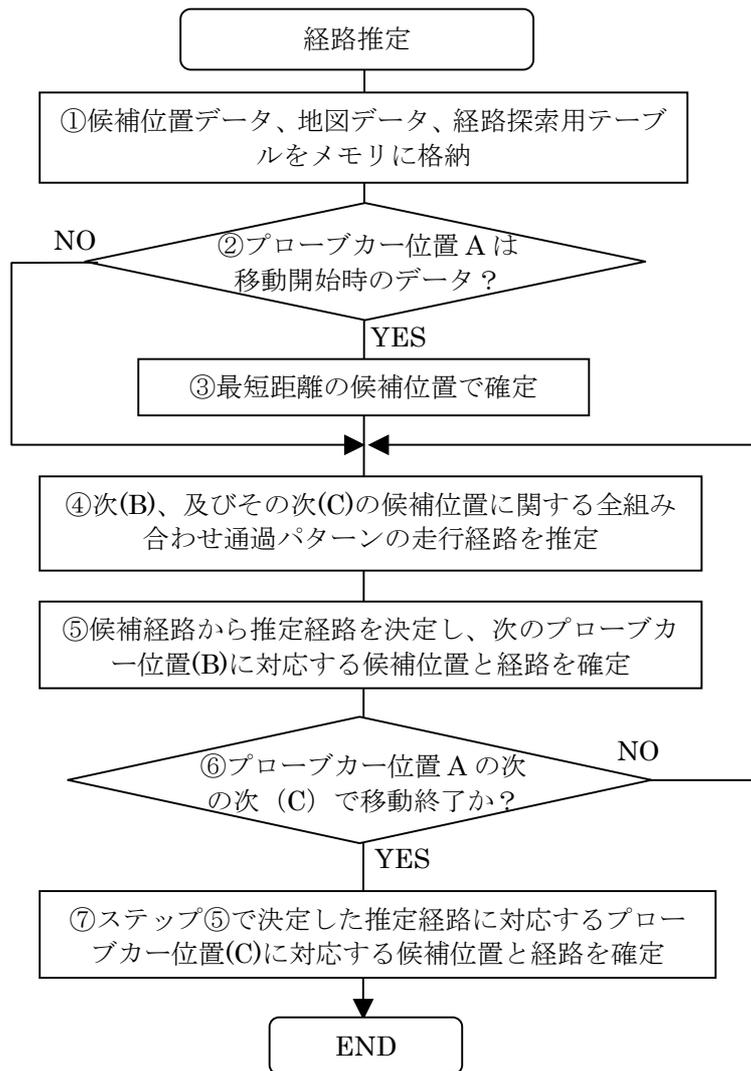


図 4.4.4 経路推定処理のフローチャート

4.4.2 プローブ情報を用いた統計旅行時間の推定

プローブ情報には、緯度、経度だけでなく GPS による時刻（タイムスタンプ）も含まれており、今回の実験で用いた運行管理 ASP の場合には特例を除いて 15 分ごとの定周期となっている。上述した経路推定で得られた推定経路から経路の距離がわかり、またその間の時間差から平均速度を算出することができる。

上記の方法で平均速度が収集できる道路区間はプローブカーの性質上任意を対象とすることができるが、ここではカーナビゲーション等で共通に使われる地図データであり今後の展開上有効であると思われる VICS リンクを集計単位とすることにした。また、プローブ情報から変換された平均速度を平日や休日といった日種単位に集計し、5 分単位に統計データベースを構築した。例えば図 4.4.5 に示すように、プローブカー位置 A から B までの推定経路の中に VICS リンク (ab) が包含されている場合において、VICS リンク ab の平均速度は前述の経路推定によって求まっている。一方、その平均速度が対応する時刻は、リンク始点（流入側ノード：a）の通過推定時刻 t_a を基準として 5 分単位に正規化する。通過推定時刻 t_a に

については、当該経路の平均速度、区間 Aa の距離、及び地点 A の通過時刻がいずれも既知であることから求めることができる。また、同一リンクの同一時間帯（5分単位）において複数のプローブカーによる平均速度が得られている場合には平均化を行う。プローブカーの特性上、VICS リンクにおいて平均速度が得られない時間帯が存在することが多いが、その場合には規制速度データに対して VICS 情報等を用いて補正したデータで補完する。そして、リンク長を平均化された速度で除することにより平均旅行時間を得る。以上のようにして、VICS リンク単位、5分単位に統計旅行時間を推定することができる。

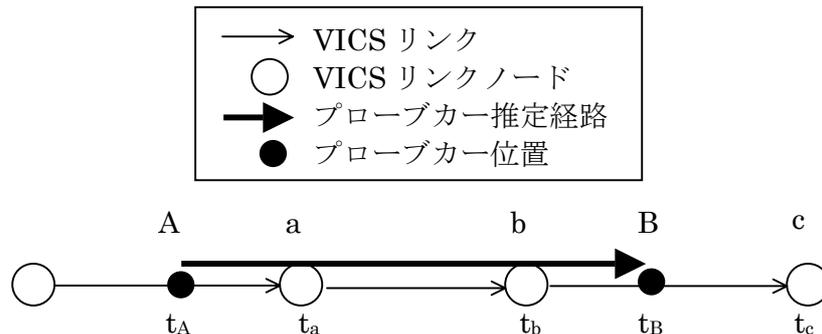


図 4.4.5 プローブカー推定経路、時刻、及び VICS リンク

4.4.3 プローブ情報ベースの統計旅行時間を用いた旅行時間予測

本システムは、予測すべき経路及び出発時刻（または到着時刻）を設定し、プローブ情報を用いて推定された統計旅行時間に基づいて到着時刻（または出発時刻）を予測するものである。

(1) 対象経路の設定

予測すべき経路を設定するのに、VICS リンクを一本一本指定していたのでは長距離経路を設定するのが現実的に困難であるため、経路設定において Dijkstra 法を用いることにより、容易に経路を指定できる方法を採用することにした。

プローブ情報に基づく統計旅行時間を用いた旅行時間予測システムの画面例を図 4.4.6 に示す。ユーザは、サブダイアログの「出発地点」というボタンを押した後に地図画面上で出発地点をマウス指定することにより地図データを検索し設定し、目的地点に関しても同様に設定する。その後に「経路検索」ボタンを押下すると Dijkstra 法によって最短経路が計算され地図上に出力される。出力経路が所望のものとは異なる場合には、サブダイアログの「経由地点」により複数の経由地点が設定できるのでこれを活用して探索することにより所望の経路を出力することができる。

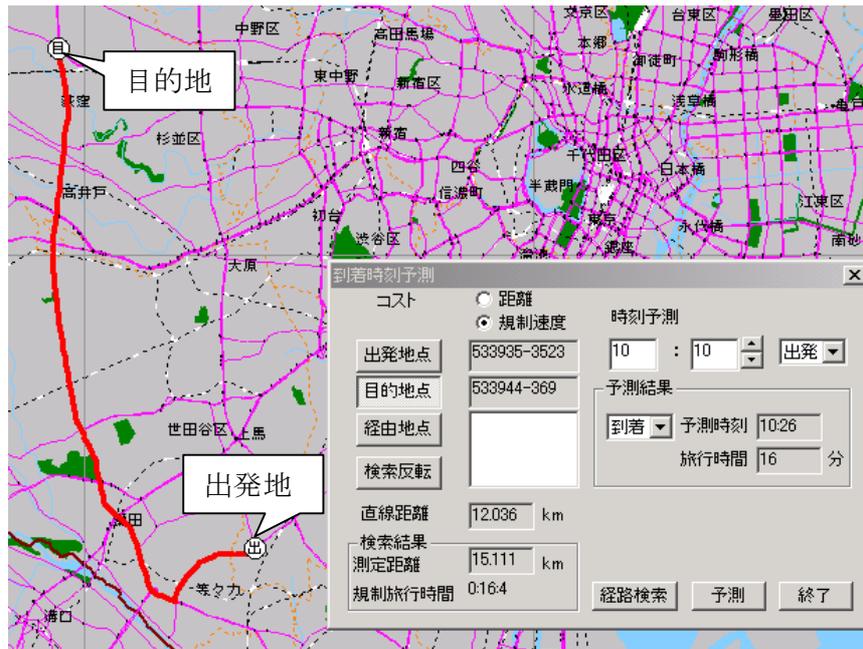


図 4.4.6 プローブ情報に基づく統計旅行時間を用いた旅行時間予測システム

(2) 出発時刻／到着時刻に対する到着時刻／出発時刻の予測

上記により設定された経路に対して図 4.4.6 のサブダイアログにおいて出発時刻を入力し、さらに「予測」ボタンを押下すると到着時刻予測処理が実行され、予測到着時刻が出力される。以下では、到着時刻予測処理に関して表 4.4.3 及び図 4.4.7 に示す例題に基づき説明する。

図 4.4.7 のように出発地から目的地までの経路が VICS リンク番号 1～3 から構成され、また各リンクに関する各時間帯の平均速度（過去のプローブ情報より作成）が表 4.4.3 の通りであった場合を考える。出発地の出発時刻が 7:01（秒単位は切捨て）であったとするとその時間帯に対応する平均速度は 45km/h であるのでリンクの距離からリンク 2 の始点である地点 a までの旅行時間及び到着時刻が求まる。次に、リンク 2 における該当時刻に対応する平均速度は 29km/h であるので同様にリンク 3 の始点である地点 b までの旅行時間及び到着時刻を求める。ただし、リンク 2 のようにリンクの途中で時間帯が切り替わる場合には、切り替わる時点(7:05:00)における到達地点を前の時間帯に対応する速度(29km/h)で求め、その先は次の時間帯に対応する速度(14km/h)で求める。以上の処理計算を目的地に到達するまで繰り返すことにより目的地の予測到着時刻（秒単位は切上げ）を求めることができる。なお、上記旅行時間の算出方式は、2.4.2 項で述べた時間追従方式に該当する。

また上記方法を応用すれば、逆に目的地への（希望）到着時刻を設定し処理計算を目的地側から出発地方向へ逆に計算していくことにより出発地の（推奨）出発時刻として算出することも可能である。

表 4.4.3 統計旅行時間（平均速度 km/h）の例

VICS リンク 番号	7:00:00－ 7:04:59	7:05:00－ 7:09:59	7:10:00－ 7:14:59	7:15:00－ 7:19:59
1	45	38	37	35
2	29	14	20	25
3	39	35	48	44

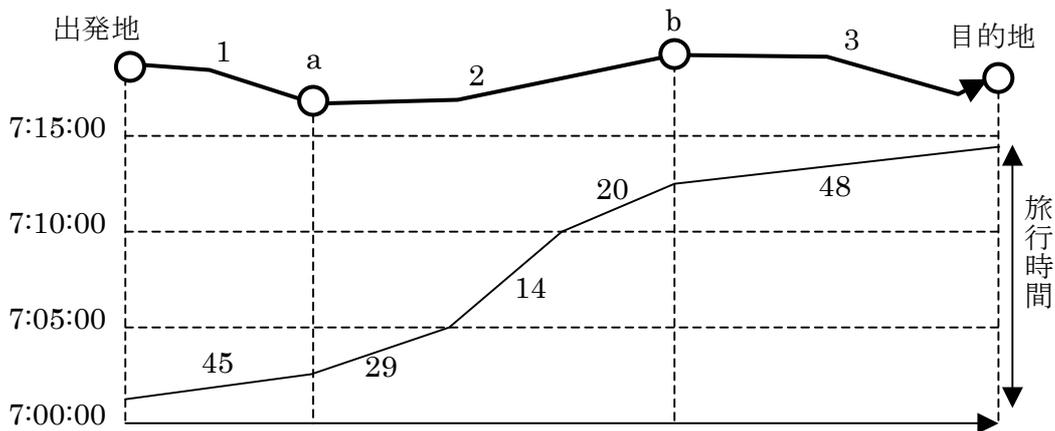


図 4.4.7 予測到着時刻の算出例

4.5 性能評価

4.5.1 評価条件及び評価方法

評価に利用したデータは、運行管理 ASP へ収集されたトラックによるプローブ情報と AVM(Automatic Vehicle Monitoring System)というタクシー配車管理システム¹¹⁾へ収集されたプローブ情報である(表 4.5.1)。データ通信手段については、前者が携帯電話回線を用いたパケット通信であるのに対し、後者は安価な業務無線を用いているため収集頻度が大きく異なっている。また、トリップ長が長いトラックに対して短いタクシーでは走行するエリアの広さ及び地域も大きく異なっており、トラックは主として首都圏を中心とする高速道路や国道などの幹線道路を広く走行するのに対し、タクシーは地方の営業拠点を中心に比較的狭い範囲ながらも細街路を含むあらゆる道路を走行するという特徴がある。

表 4.5.1 評価に利用したプローブ情報

	運行管理 ASP	AVM
車両・台数	トラック・14 台	タクシー・2 台
データ収集期間	21 日間	約 3 ヶ月間
データ収集エリア	関東一円	茨城県日立市
データ収集周期	1 回/15 分	1 回/数百 m(1~3 分)

4.5.2 評価結果

評価対象として以下に示すように分類し性能評価を行った。

- ・マップマッチング

・経路推定及び統計旅行時間推定

評価実験を行った環境（PC）は次の通りである。

CPU：AMD Athlon 1.1GHz、Memory：1GB、OS：Windows2000 Professional

開発環境：Microsoft Visual C++ 6.0 及び Visual Basic 6.0

地図データ：DRM ver.1200、VICS リンク ver.200000

利用したデータの状況、及び(1)マップマッチング、(2)経路推定及び統計旅行時間推定に関する各機能の処理時間の結果を表 4.5.2 に示す。

表 4.5.2 利用データ及び機能別処理時間結果

データの種類		運行管理 ASP	AVM
全位置データ数		5,537	34,526
位置データ分布		関東一円	茨城県日立市
処理時間	(1)マップマッチング	85 秒	10 秒
	(2)経路推定及び旅行時間出力	170 秒	45 秒

(1)マップマッチング

運行管理 ASP、AVM 双方のデータとも全位置データ数の割に処理時間はそれほど大きくないため実用上十分な処理性能であると考えられる。ここで注目すべきは、運行管理 ASP と AVM の全位置データ数と処理時間が逆転している点である。通常、検索回数は位置データ数に比例するため、位置データ数が増加すればマップマッチングの処理時間も増加するが、実際にはそうはなっていなかった。これは、検索において1つのプローブ情報の位置に対してその2次メッシュコード内の全データを検索するようになっていること、また走行データのエリアが運行管理 ASP では東京都市圏、AVM では地方都市である茨城県日立市であり、各地域のデータサイズは表 4.5.3 に示すように東京都市圏の方が日立市よりもかなり大きいことから、処理時間が逆転したものと考えられる。このことから、マップマッチングの処理時間に関しては、地方都市の方が大都市よりも有利であると考えられる。ただし、一般に大都市部では VICS の情報提供率が比較的充実しているためプローブカーの必要性は少なく地方都市にこそプローブカーの必要性が高いことから、大都市において大きな処理時間を要したとしても実質的に問題になることは少ない。

次に、マップマッチング有無の比較を図 4.5.1 に示す。マップマッチングにより道路から少し離れた GPS 位置データの多くが道路上に修正されていることがわかる。中にはマッチングしていない位置データもあるが、これは道路と所定距離(30m)以上離れているため位置不整合によりマッチング不可と判断したためである。運行管理 ASP 及び AVM の全位置データについてマップマッチングした結果を表 4.5.4 に示す。全位置データに対してマップマッチングが成功した割合は、運行管理 ASP、AVM についてそれぞれ 49%、53%であった。位置不整合のデータが多かったのは、マップマッチング対象道路が今回は交通情報提供に最もよく使われている VICS リンクとしているためと思われる。VICS リンクは全ての道路を網羅しておらず、主要幹線道路中心となっているため、本評価結果より VICS リンク以外の道路を走行した際の位置データが比較的多かったことが推定される。なお、VICS リンクよりも多くの道

路を網羅している DRM にてマップマッチングを行うと、マッチング成功の割合は運行管理 ASP、AVM についてそれぞれ 86.7%、87.4%であった。また、運行管理 ASP（東京都市圏）の方が AVM（日立市）よりも若干マップマッチング成功の割合が低いのは、都市部の高層建築物や高架等の影響により GPS 電波受信状況が悪化し、そのため測定位置精度が悪化していることが考えられる。

表 4.5.3 検索用地図データサイズの比較

2次メッシュコード	地図データ
533946（東京中心部）	911(KB)
544075（日立市中心部）	155(KB)

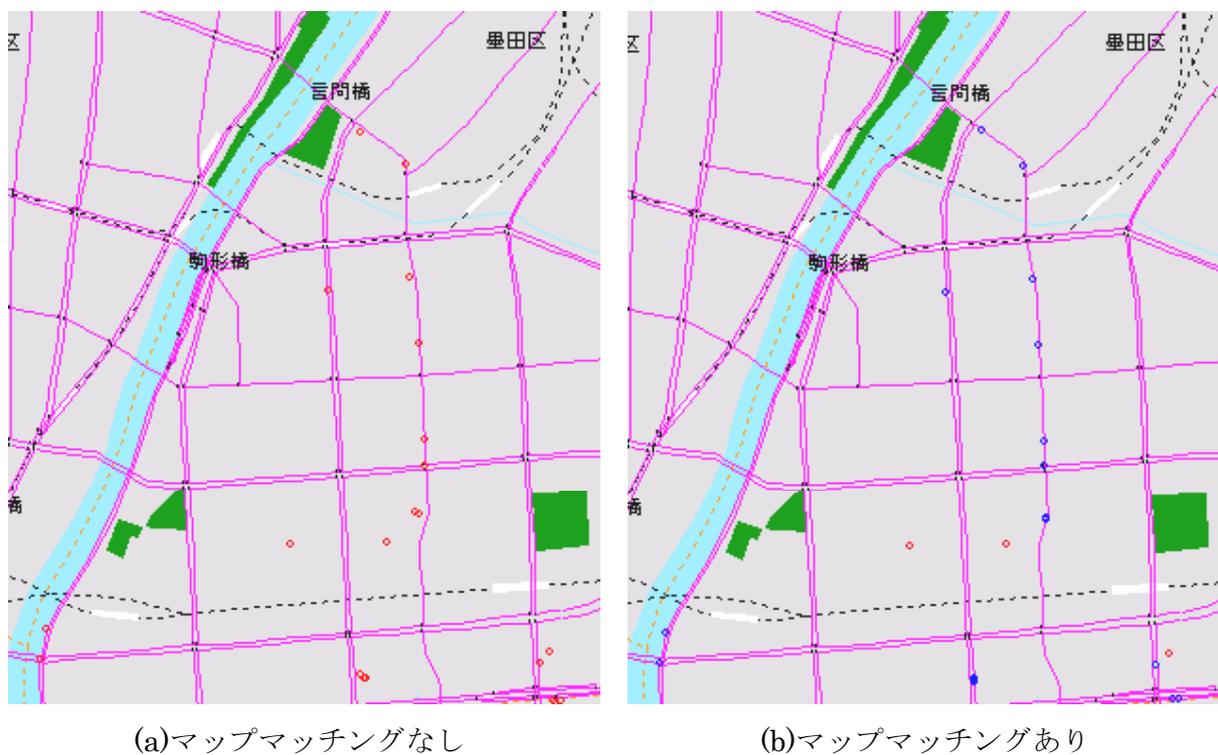


図 4.5.1 マップマッチング処理有無の比較

表 4.5.4 VICS リンク、DRM へのマップマッチング結果

	運行管理 ASP	AVM
全位置データ数	5,537	3,4526
VICS リンクへの マップマッチング成功数	2,705 (49%)	18,258 (53%)
DRM への マップマッチング成功数	4,803 (86.7%)	30,172 (87.4%)

(2)経路推定及び統計旅行時間推定

次に、VICS リンクへマップマッチングした結果を用いて経路推定を行い、これらの結果を統合して統計旅行時間として出力するまでの一連の処理について評価した。結果を表 4.5.2

及び表 4.5.5 に示す。

表 4.5.5 各処理後のプローブ情報データ数の変遷

	運行管理 ASP	AVM
全プローブ情報データ数	5,537	34,526
マップマッチング成功数	2,705 (49%)	18,258 (53%)
経路推定候補数	989 (18%)	16,485 (48%)
経路推定成功数	884 (16%)	14,457 (42%)

表 4.5.2 の処理時間については、マップマッチングの処理時間と同様に、全位置データ数とは逆に AVM の方が運行管理 ASP よりも少ない時間となっている。これは、マップマッチングと同様に地図データサイズの違いによる要素に加えて、運行管理 ASP は AVM よりも収集周期が長いことから経路長が長くなり、経路探索アルゴリズム (Dijkstra 法) の特質から探索時間が経路長のほぼ二乗に比例することが影響していると考えられる。

表 4.5.5 の結果は、プローブカーの位置データからマップマッチングや経路推定等を経て旅行時間推定に至るまでのプローブ情報データ数の変遷を示したものである。まず、プローブカーから収集した位置データの数 (全位置データ数) から VICS リンクに対してマップマッチングを行い成功した数 (マップマッチング成功数) を取り出す。次に、経路推定を行うにあたり連続する 2 点を 1 ペアとしてカウントしたものが経路推定候補数である。最後に、経路推定 (経路検索) を行い経路が見つかった数が経路推定成功数である。上記の手順にしたがいプローブカー位置を選別していくため、データ数としては、

全位置データ数 \geq マップマッチング成功数 \geq 経路推定候補数 \geq 経路推定成功数

となる。運行管理 ASP と AVM の各数値を比較すると、マップマッチングの成功割合は大差ないが、経路推定候補数として絞る段階で大きな差がついていることがわかる。これは、前者の収集周期が長い初期データ (エンジンスタートして 1 回目のプローブカー位置) の全体に占める割合が多くなっており、これだけではペアリングができないため候補から外されてしまっている影響が最も多く現れている。また、前回の位置データのタイムスタンプと今回のタイムスタンプを比較して 20 分以上の差があった場合にもデータ欠落とみなし候補から外している影響も現れている。経路推定候補に対して経路推定が成功する (経路が見つかる) 割合は 87% を超えている。ただし、経路推定が失敗した (経路が見つからなかった) 原因の一つとして、出発地と到着地の候補ノードとして反対車線が選ばれてしまいそれ以外の候補パターンがなかったことがあった。この問題は、GPS 測定位置とマップマッチングの精度に起因すると考えられるため、これらの精度向上が課題である。

図 4.5.2 に運行管理 ASP によるプローブ情報及びマップマッチングと経路推定によって推定された統計旅行時間 (統計旅行速度) の一例を示す。左の図は、連続するプローブ情報の位置を直線で結んだ様子を示しており、これでは途中の走行経路を特定することができないが、右の図では道路上にマッピングされているのがわかる。

本結果より、プローブ情報の収集頻度が高いほど利用効率においては有利になることがわかったが、本研究の主目的である統計旅行時間を推定するという観点から言えば、収集頻度

が低くても多くのプローブ情報を長期間収集すれば十分に利用できることがわかった。また、プローブ情報の利用効率をさらに向上するためには、VICSリンクを対象とするのではなく、DRMのようなより詳細な地図データを対象とするのが望ましいため、今後は適切な地図データの選定を含めた検討が必要である。

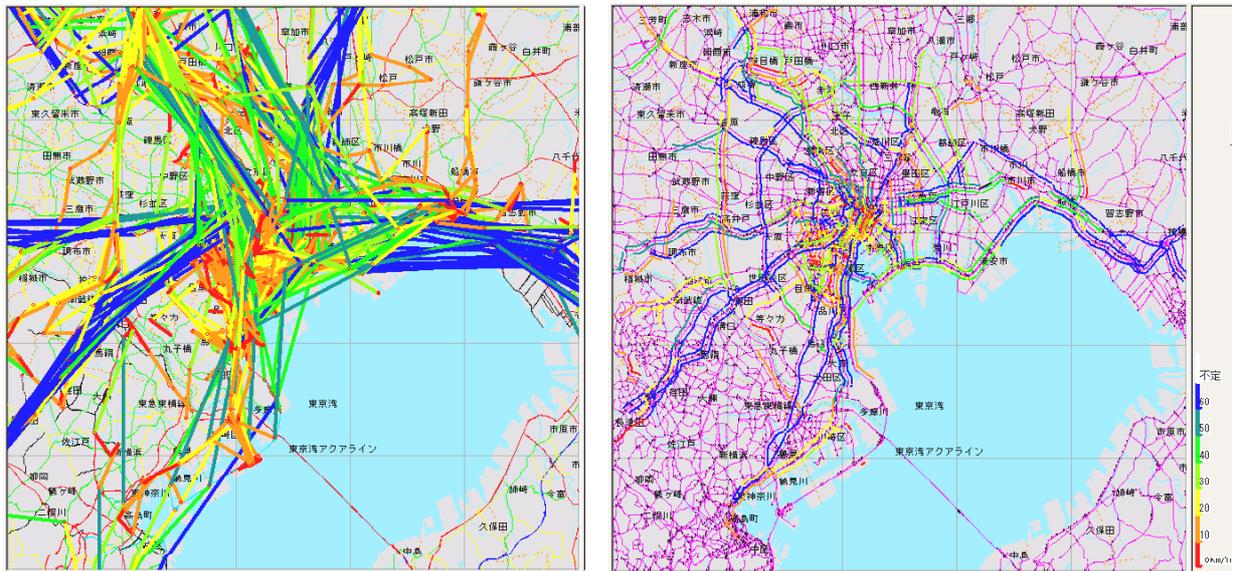


図 4.5.2 プローブ情報（左）と推定された統計旅行時間（統計旅行速度）（右）

4.6 プローブ情報の収集頻度による性能評価³⁴⁾

4.6.1 評価の目的

プローブ情報の収集頻度が高ければ推定される旅行時間の精度も高くなると考えられるが、その分通信コストも高くなる。すなわち、精度とコストの間にはトレードオフの関係があると考えられ、プローブカーシステムの運用者にとっては、プローブ情報の収集頻度が極めて重要な要素となる。

プローブカーシステムに関する事例の一つにIPCAR実証実験¹²⁾¹³⁾がある。2000年度(平成12年度)においては30秒の一定間隔でプローブ車両の走行位置と状態を記録していたが、2001年度(平成13年度)においては停止状態と走行状態の2つの状態が切り替わる走行イベントを基本の記録間隔とすることによりデータ量を約18%削減している¹⁴⁾。精度評価については、2001年度(平成13年度)の方式を対象として実施している。しかし、データ量別(データ収集頻度別)に精度がどのように変化するかといった視点での評価は報告されていない。

本節では、プローブ情報の収集頻度による推定旅行時間の精度を評価することにより、収集頻度が性能にどの程度影響するかを明らかにする。

4.6.2 利用したプローブ情報の概要

本節で利用したプローブ情報は、ある物流会社のトラック（5台）より収集されたものである¹⁵⁾。トラックはいずれも2トン車であり、大阪市及びその周辺を中心に神戸市までの範囲で、家電品の集荷・配送を行う車両である。今回の評価に利用したプローブ情報の概要を表 4.6.1 に示す。このデータは、トラックが日常の集配業務を行いながら収集されたものであ

る。

表 4.6.1 プローブ情報の概要

データ収集日	2004/11/9(火)
トラック台数	5 台
総走行距離	533 km
データ収集頻度 (オリジナル)	1 秒毎
合計データ数	89,203

4.6.3 評価対象

上記のプローブ情報 (オリジナル) を元に、人為的にデータを間引くことによりいくつかの収集頻度のプローブ情報を作成し、それぞれに対して推定旅行時間の性能評価を行った。評価対象は下記の通りである。

- (i) マップマッチングの成功率
- (ii) 推定経路の精度
- (iii) 推定旅行時間の精度

4.6.4 マップマッチングの評価

マップマッチングの評価結果を表 4.6.2 に示す。DRM リンクへのマッチングは 90%近い成功率であったが、VICS リンクへは 65%まで落ちている。これは、特に集配位置の周辺道路は幹線道路ではない非 VICS リンクであることが多く、トラックといえども非 VICS リンクを走行することが少なからずあることに起因している。なお、今回のプローブ情報の多くは大阪の都心部における走行データであるが、郊外部に比べてマッチングの成功率は若干低かった。これは、都心部における高層ビルや高架道路等の影響により GPS の位置精度が悪化したことが原因の一つと考えられる。今回のシステムにおいては、車載機の機能制約から GPS による生の位置データのみを利用したが、カーナビゲーションシステムのようにジャイロデータ、車速パルス、地図データを使った高精度ロケータ機能が活用できる車載機であれば、上記のような環境における成功率は向上すると考えられる。

表 4.6.2 マップマッチングの結果

	対 DRM リンク	対 VICS リンク
マッチング成功数	79,028 (89%)	58,052 (65%)
マッチング失敗数	10,175 (11%)	31,151 (35%)
合計データ数	89,203 (100%)	

4.6.5 推定経路の評価

評価対象は、データ収集頻度としてそれぞれ 5, 10, 20, 30, 60, 120, 300 秒になるようオリジナルのプローブ情報 (収集頻度は 1 秒毎) を人為的に間引いた評価データから推定される各経路 (以下、推定経路) である。評価方法としては、オリジナルデータから推定される走行経路を真の経路とし、真の経路、推定経路ともにある VICS リンクを“合致リンク”、

真の経路にあって推定経路にない VICS リンクを“欠落リンク”、逆に推定経路にあって真の経路にない VICS リンクを“誤推定リンク”とそれぞれ判定した。また、プローブ情報の交通情報センターへのリアルタイム送信を想定した場合の通信コストについても合わせて推定した。通信コストの推定には、トラックの1日・1台当たりの平均データ量と携帯電話サービスの典型的なパケット単価（0.2 円/パケット）を用いて計算した（基本料金を除く）。

データ収集頻度別の推定経路の評価結果を図 4.6.1 に示す。データ収集頻度が低くなると、通信コストが低下する一方で“合致リンク”が減少、すなわち経路推定の精度が悪化した。特に都心部においては、複数の路線が並行、あるいは立体交差するような高密度道路区間が多数存在するが、推定経路を詳細に観察すると、そのような道路において推定精度が悪化する傾向にあった。これは、GPS による位置精度のほか、現状の経路推定に関して改良の余地があるためと考えられる。

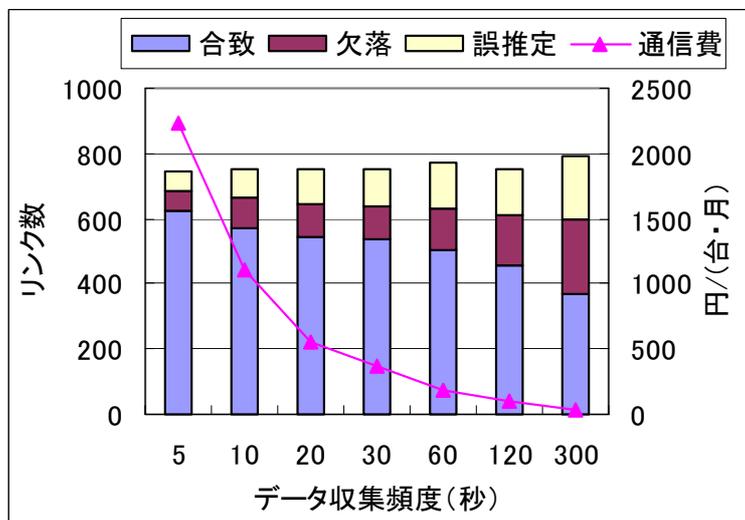


図 4.6.1 推定経路の評価結果

4.6.6 推定旅行時間の評価

評価対象は、推定経路と同様に、5～300 秒までの各収集頻度データから得られる各推定経路に関するリンク旅行時間の推定精度である。評価対象は、オリジナルデータを含む全ての収集頻度のデータからそれぞれ推定されたリンクにおいていずれからも抽出された“合致リンク”とした。今回の評価対象となったリンクの内訳を表 4.6.3 に示す。評価方法としては、オリジナルのプローブ情報から得られる推定旅行時間を真値とし、各収集頻度における推定旅行時間の誤差をそれぞれ求めた。

データ収集頻度別に推定旅行時間の精度を評価した結果を図 4.6.2 に示す。ここで、精度の評価指標としている平均絶対誤差率 \bar{e} については、リンクごとの絶対誤差率 e_i を単純に平均化した値ではなく、次式で表されるようにリンク長 L_i で加重平均した値を用いている。

$$\bar{e} = \frac{\sum_i L_i \cdot e_i}{\sum_i L_i} \quad (4.6.1)$$

なぜなら、評価対象となったリンクの長さは11m～5365mまでと様々であり、この長さで加重平均することにより実際の感覚により近くなると考えられるためである。

データ収集頻度が低くなると、通信コストが低下する一方で推定精度が悪化した。収集頻度が低いと収集した地点間の区間が長くなり、その区間全体に対して平均速度で大まかに表現することになる。そのため、リンクのような比較的短い区間の単位で評価すると、収集頻度が高いデータの方が詳細区間に対して速度を表現でき精度面で有利となる。

また、旅行時間の要求精度に関しては、サービス内容と運用コストによって異なると考えられる。精度に関する実績の一例として一般道路におけるVICSの事例を挙げると、平均絶対誤差率が10～20%程度という実績がある¹⁶⁾¹⁷⁾。したがって、これと同等の精度を実現するために必要なプローブ情報の収集頻度は、本評価結果より20～60秒の範囲と推計される。ただし、本評価結果はあくまでも“合致リンク”を対象としたものであり、実際には“誤推定リンク”が存在することを考慮すべきである。この“誤推定リンク”を削減するためには、経路推定の精度を今後向上することが必要である。また、交通情報の更新頻度、情報カバレッジに対して必要なプローブカー存在率の推計結果によれば、更新頻度14.4分、情報提供率90%に必要なプローブカー存在率は1.2%であった¹⁸⁾。このことを考慮すると、プローブカーシステム単体ではコスト面での障害が大きいと考えられる。したがって、実際のサービスシステムへの展開においてはVICSとの協調・連携が重要であると考えられる。

表 4.6.3 評価対象リンクの概要

	リンク数
都市間高速道路	8
都市内高速道路	28
一般道路	211

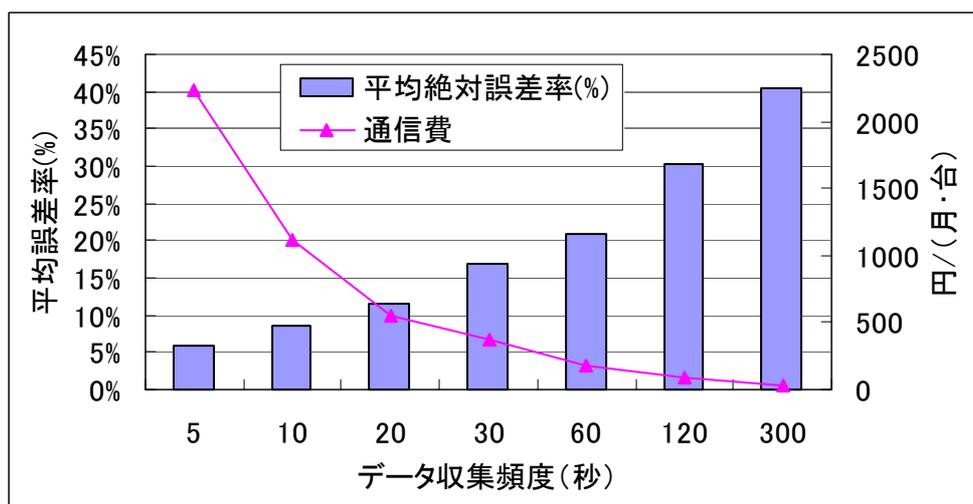


図 4.6.2 推定旅行時間の評価結果

4.7 まとめ

本章では、交通状況を把握するための新しい収集データであるプローブ情報を用いた旅行時間推定手法、特に収集頻度が低い長周期プローブ情報を用いた旅行時間推定手法について述べた。

特に、プローブカーとして有望視されている業務車両を用いた運行管理システムにおいても適用可能とすることを目的として、収集頻度の低い長周期プローブ情報を用いた場合でも、マップマッチングと走行経路の推定技術を融合することにより旅行時間を推定することを可能とするものである。トラックによる15分間隔のプローブ情報とタクシーによる1~3分間隔のプローブ情報の2種類をプローブ情報として用いても、ともに旅行時間を推定することができた。しかし、ベースとなるリンクデータをVICSリンクとすると旅行時間推定に活用できたデータはかなり少なくなってしまうことがわかり、より詳細なリンクデータベースであるDRMをベースとした方が有効に活用できることを確認した。

また、本推定手法の活用事例として、得られた推定旅行時間を統計処理することにより統計旅行時間データベースを作成し、これを用いて出発時刻に対する目的地への到着予想時刻や到着希望時刻に対する出発推奨時刻を予測する旅行時間予測システムについても述べた。

また、プローブ情報の収集頻度による推定旅行時間の精度について、実データを用いた評価を実施することにより、収集頻度と旅行時間の推定精度の関係についても述べた。実際のトラックによる1秒間隔のプローブ情報を人為的に間引くことによっていくつかの収集頻度のプローブ情報を作成し、それぞれに対して旅行時間推定の性能評価を行った。その結果、経路推定及び旅行時間推定のいずれにおいても、データ収集頻度が低くなると(すなわちデータ収集周期が長くなると)、通信コストを低下できる一方で、性能の悪化が認められた。また、旅行時間の要求精度に関する考察として、VICSと同等の精度を実現するために必要なプローブ情報の収集頻度を20~60秒の範囲と推計した。

しかしながら、プローブカーシステム単体ではコスト面での障害が大きいと考えられるため、実際のサービスシステムへの展開においてはVICSとの協調・連携が重要であると考えられる。また、タクシーやバスを含めた他の業務車両をプローブカーとして用いた場合の特性についても検討し、旅行時間の推定・予測に最も適したプローブカーについて検討することが今後の課題である。

参考文献

- 1) Fushiki, T., Yamane, K. et al.: Arrival Time Prediction System Based on Floating Car Data in the Fleet Management ASP, 9th World Congress on Intelligent Transport Systems, Chicago, USA, 2002.
- 2) Simmons, N., Gates, G. and Burr, J.: Commercial Applications Arising From a Floating Vehicle Data System in Europe, 9th World Congress on ITS Chicago, USA, CD-ROM, 2002.
- 3) 山根憲一郎ほか: プローブデータの収集頻度による交通情報推定の性能評価, 第25回交通工学研究発表会論文報告集, pp.169-172, 2005.
- 4) Yamane, K. and et al.: Study on Probe Vehicle Data Interval and the Performance, City Logistics IV, 2005.
- 5) (財)道路交通情報通信システムセンター (VICS センター) : <http://www.vics.or.jp/>
- 6) トラック運行管理 ASP"e-trasus", <http://www.e-trasus.com/>
- 7) Assistant secretary of Defense for command, control, communications, and intelligence: Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard, <http://www.navcen.uscg.gov/gps/geninfo/2001SPSPPerformanceStandardFINAL.pdf>, p.15, 2001.
- 8) (株)ニューウェーブ : "<http://www.saitama-j.or.jp/~newwave/MapMatch.html>
- 9) 土木学会編: 交通ネットワーク均衡分析 -最新の理論と解法-, pp.133-136, 1998.
- 10) Dijkstra, E.W.: A note on two problems in connection with graphs, Numerische Mathematik, Vol.1, pp.269-271, 1959.
- 11) (株)日立国際電気, <http://www.h-kokusai.com/>
- 12) (財)自動車走行電子技術協会: ITS の社会的有効性向上に係るシステム最適化研究開発報告書, 経済産業省委託 (平成12年度情報システム共通基盤整備のための連携推進事業), 2001.
- 13) (財)自動車走行電子技術協会: ITS の社会的有効性向上に係るシステムの実証 報告書, 経済産業省委託 (平成13年度情報化推進基盤整備), 2002.
- 14) 堀口良太: 走行イベント単位でのプローブデータ記録方式の効用, 土木計画学研究・講演集, Vol.26, CD-ROM, 2002.
- 15) Taniguchi, E. and Ando, N.: Probabilistic Vehicle Routing and Scheduling Based on Probe Vehicle Data, International Journal of ITS Research, Vol.2, No.1, pp.29-37, 2004.
- 16) 國時浩一ほか: 新交通管理システム -U型交通情報系システム-, 三菱電機技報, Vol.70, No.12, pp.44-50, 1996.
- 17) 山根憲一郎, 横田孝義, 伏木匠: 広域交通情報サービス向け旅行時間推定法, 電子情報通信学会論文誌(D-I), Vol.J87-D-I, No.3, pp.329-338, 2004.
- 18) Fushiki, T. et al.: Study on Density of Probe Cars Sufficient for Both Level of Area Coverage and Traffic Information Update Cycle, 11th World Congress on ITS Nagoya, Japan, CD-ROM, 2004.

第5章 VICS 情報を用いた旅行時間の予測

5.1 概説

2002年6月より施行された改正道路交通法により規制緩和が実施され、民間事業者が交通情報データを独自に収集・加工して提供できるようになった。特に、交通情報データの加工については現状のVICSでは対応されていない旅行時間予測が考えられ、カーナビなどの交通情報応用システムへの展開が期待されている。本章では、VICSの道路交通情報（VICS情報）を用いて旅行時間予測を行うための手法について述べる。

はじめに、カーナビでの動的経路探索に利用することを目的とした統計旅行時間の推定手法について述べる¹⁾。1年間蓄積したVICS情報を統計処理することによって統計旅行時間を推定し、これをカーナビの記憶領域に格納することによって、いつでもどこでも渋滞を考慮した予測型の動的経路探索を可能にするものである。その中で、予測精度の向上と情報カバレッジの拡大を実現するため、最適な統計分類方法、特異データの検出方法、及び交通情報が提供されないリンクに対する補完推定法のそれぞれについて提案し、予測旅行時間の精度評価、従来のカーナビゲーションに対する情報カバレッジ拡大の効果の評価、及び統計旅行時間を用いて得られる経路の品質評価のそれぞれについても報告する。

次に、新しい予測交通情報として、現在の渋滞が今後悪化するか緩和するかに関わる情報と定義した渋滞傾向について提案するとともに、その推定手法について述べる²⁾。この渋滞傾向は、リアルタイムな迂回行動選択への一助となるべく現在までの渋滞変動傾向がごく近い未来についても継続するものとみなして推定され、この渋滞傾向情報を従来のVICS渋滞情報に付加して提供することにより情報をより詳細化することを狙ったものである。また、実際のVICS情報を用いてその特性を評価することにより、本手法の実現の可能性について検討した結果も報告する。

5.2 カーナビ向け統計旅行時間の推定

5.2.1 VICS の課題と本研究の目的

わが国では、1996年にVICS (Vehicle Information and Communication System)³⁾⁴⁾が開始されて以来、提供エリアの拡大とVICS対応カーナビゲーションシステム(以下、カーナビ)の普及により、年々多くのユーザが詳細なリアルタイム交通情報を利用できるようになった。一方、情報提供側においても、車両センサの計測情報を有効利用することにより精度向上と情報提供エリア拡大への改良がなされており、利便性が向上している⁵⁾⁶⁾。

交通情報の代表的な利用シーンに、渋滞を避けた動的経路探索⁷⁾やトラックの動的配車配送計画⁸⁾がある。これらの基本的考え方は、各リンクの旅行時間等をリンクコストとして設定し、最小コストで目的地に到着する経路を算出するものである。また、各リンクの旅行時間を用いて目的地への到着予想時刻を提供することも可能である。しかしながら、VICS情報を用いる場合には次の課題があった。

- (a) データを受信するための装置(ビーコン送受信ユニット)を購入する必要がある
- (b) ビーコン設置位置へ到達するまで経路探索に利用することができない
- (c) 将来の交通状況を考慮した経路探索ができない

そこで、一定期間蓄積した全国のVICS情報を用いて各時間帯で統計処理することにより統計旅行時間データを生成し、それをカーナビなどの車載機や配車配送システムに格納することにより上記課題を解決することを検討した。しかし、より適切な動的経路探索を可能とするための統計旅行時間には、次の二つの課題がある。

第一の課題は、VICS情報の精度に関わるものである。VICSの情報源の車両センサは、ほとんどが超音波感知器に代表される存在型感知器である。超音波感知器にて計測される単位時間当たりの交通量 Q と占有時間 O_t 及び平均車長 L_c より次式にて地点の平均速度 v が求められる。⁹⁾

$$v = \frac{L_c \cdot Q}{O_t} \quad (5.2.1)$$

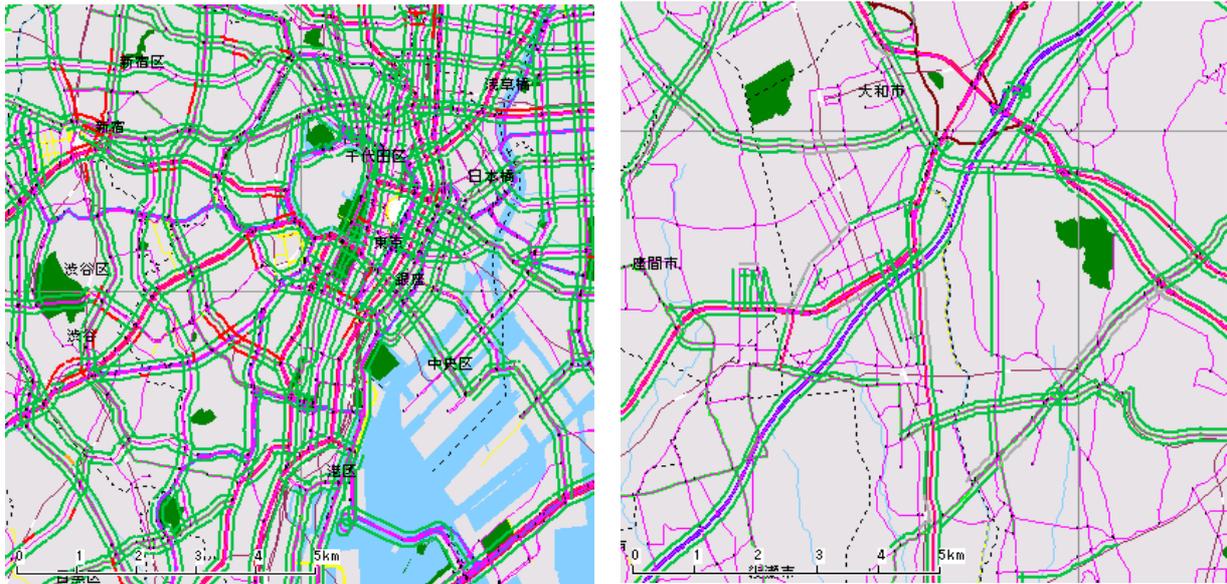
この地点平均速度をリンクに対して拡大適用することによりリンク旅行時間が推定される。しかし、この平均速度 v を推定する際の重要なパラメータである平均車長 L_c については、代表地点における代表時刻の計測値を固定的に割り当てて運用していることが多い。したがって、この平均速度 v の精度は、実際の通過車両の構成によってばらつくことがある。また、違法駐車等の影響により、実際の交通状況を表さない場合もある。また、統計旅行時間は日常的な交通状況を再現するという位置付けであるため、事故などの突発事象が発生した場合のVICS情報は、それ自体は正しい情報であっても、統計旅行時間には反映させるべきではない。この課題に対して、大場ら¹⁰⁾は旅行時間データにおいて度数ゼロの区間が連続したところより大きい旅行時間データを除去する長期停車車両データの除去方法と、大津の閾値法¹¹⁾を用いることにより分布から外れたデータを除去する方法を提案している。しかし、本統計処理で想定している過去1年など長期間蓄積したデータ集合を対象とした場合には、度数ゼロの区間が存在しにくくなることや、分布の低速/高速側の一方のみが除去対象となるなど

改良の余地があると考えられる。

第二の課題として、適切な動的経路探索を行うのに現状の提供情報量では必ずしも十分でないことが挙げられる。これは、費用対効果の観点から車両センサを整備するのに優先順位付けがなされており、情報提供対象となるのは高速道路及び一般道路の幹線道路が中心となっているためと考えられる。実際の VICS による交通情報を地図上に表示させた事例を図 5.2.1 に示す。図において、道路の両脇に表示した太線は渋滞情報を表しており、どの道路に対して渋滞情報が提供されているかが概観できる。このように、都心部に比べ郊外において情報量が低下する傾向がある。

一方、適用される経路探索アルゴリズムは、得られる経路の品質の高さと計算効率の良さから現状では Dijkstra 法¹²⁾¹³⁾をベースとした手法がほとんどである。この手法は、出発地から目的地に至る全てのリンクを対象にくまなく探索して最小コスト（カーナビでは最短時間）の経路を導出するものである。交通情報が提供されていればそれを利用するが、提供されていなければ別途調査された平均速度等の静的情報を代用して経路計算を行う。したがって、交通情報が提供されるリンクが多ければ多いほど品質のよい経路が得られることになる。上記理由により、実際には全てのリンクの交通情報が提供されることは不可能であるが、首都圏のように渋滞が多く静的情報との乖離が大きくなるような地域においては、より多くの交通情報が提供されていなければ実際の最短時間経路を提供できなくなることがあった。この課題を解決する手段としてプローブカーシステムが提案されている。しかしながら、現状では実験段階のものが多く¹⁴⁾¹⁵⁾、またすでに一部で実用化しているところもある¹⁶⁾¹⁷⁾が、VICS のように全国を恒常的かつ頻繁に更新するにはかなりのプローブカーが必要になるとの試算結果¹⁸⁾から、真に実用的なシステムになるにはなお時間を要すると考えられる。

上記課題に鑑み、本節では、過去1年間蓄積した VICS 情報をベースとして、統計処理を行うことによる精度の向上と、交通情報が提供されないリンク（以下、情報未提供リンク）の交通状況を周辺リンクの交通情報データから補完推定することによる情報量の向上の両立を図った統計旅行時間データを推定する手法を提案する。また、実車走行テストを通してこの統計旅行時間の性能を評価し、さらにこれをベースとした探索経路の品質に関する評価も行う。



(a)首都圏中心部

(b)首都圏郊外

図 5.2.1 首都圏における VICS 情報の提供状況

5.2.2 統計旅行時間の推定

(1)統計の分類

交通状況は、平日/休日によって異なることが経験的に知られているが、実際の VICS データを利用して、どのような日種分類で統計化すれば類似性がより向上するのかについて分析した。分析にあたり、首都圏の一般道路及び高速道路に関する特異日（GW、盆、年末年始）を除く 1 年分のデータを用いた。分析方法の処理の流れを図 5.2.2 に示す。

全データのクラスタリングにより分類集合を生成することも考えられるが、ここでは事故などの突発事象による変動を含むデータが偶然に同一の分類集合にまとめられることを避けるために、経験に基づいて人為的に日種（曜日、平日・休日など）に基づく複数の分類集合を作成し、各分類の類似性を相対的に評価することにした。そこで、分類集合の日付リストと VICS データを入力とし、以下の手順にしたがって処理を実施する。

- (i) ある分類集合内から、(a)ある 1 日の 1 つのリンクに関する旅行時間情報の時系列データと、(b)この 1 日の補集合である他の全日付の当該リンクに関する旅行時間情報を時刻ごとに平均して得られる時系列データを取り出し、両者の相関係数を計算する。
- (ii) (i)の処理を全ての評価対象リンクについて実施し、各リンクに関する相関係数を算出する。ここで、相関係数の計算ができないリンク（情報が提供されない、不明値が提供される、1 日を通して一定値を提供するリンク）については対象外とする。
- (iii) (ii)の処理を分類集合内の全ての日付について実施し、得られた全ての相関係数を平均化する。
- (iv) (i)から(iii)までの処理を、全ての分類集合について実施する。

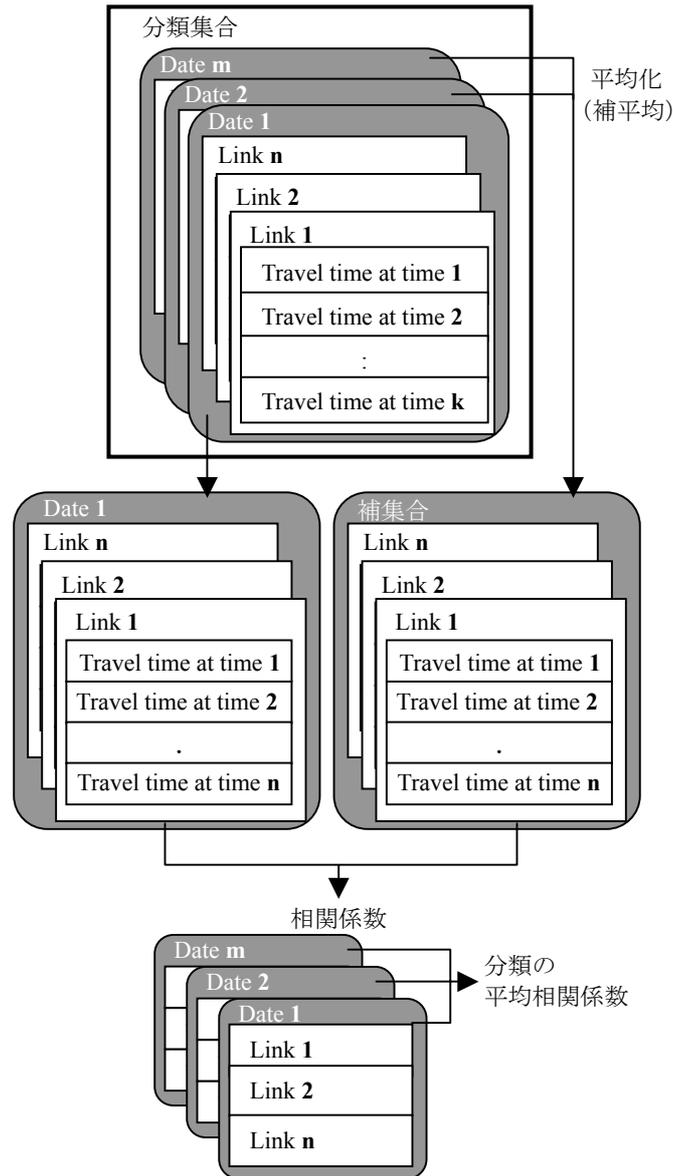


図 5.2.2 分類分析のフロー

分類の妥当性の評価は、以上により得られる分類集合ごとの平均相関係数を比較することにより実施する。なお、今回は首都圏の約 11,000 リンクに関する 1 年分のデータ (288 データ/リンク・日) を対象とするため、相関係数の計算量が膨大になる。そこでこの計算を簡略化するため、本来求めるべき「各要素間の相関係数 r_{ij} の平均値(r)」を「各要素と補集合の平均値との相関係数(\hat{r})」で代用した。 r と \hat{r} を式で表すと次のようになる。

$$r_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\sum_t (T_{i,k,t} - \bar{T}_{i,k})(T_{j,k,t} - \bar{T}_{j,k})}{\sqrt{\sum_t (T_{i,k,t} - \bar{T}_{i,k})^2} \sqrt{\sum_t (T_{j,k,t} - \bar{T}_{j,k})^2}} \quad (5.2.2)$$

$$r = \frac{2}{m(m-1)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m r_{i,j} \{i, j \mid i < j\} \quad (5.2.3)$$

$$\hat{r}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\sum_t (T_{i,k,t} - \bar{T}_{i,k})(T_{i,k,t}^C - \bar{T}_{i,k}^C)}{\sqrt{\sum_t (T_{i,k,t} - \bar{T}_{i,k})^2} \sqrt{\sum_t (T_{i,k,t}^C - \bar{T}_{i,k}^C)^2}} \quad (5.2.4)$$

$$\hat{r} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \hat{r}_i \quad (5.2.5)$$

$r_{i,j}$: 日付 i と日付 j との平均相関係数

$T_{i,k,t}$: 日付 i, リンク k, 時刻 t における旅行時間

$\bar{T}_{i,k}$: $T_{i,k,t}$ の一日当たりの平均値

\hat{r}_i : 日付 i と補集合の日付との平均相関係数

$T_{i,k,t}^C$: 日付 i, の補集合の日付におけるリンク k, 時刻 t の平均旅行時間

$\bar{T}_{i,k}^C$: $T_{i,k,t}^C$ の一日当たりの平均値

m : 対象日数

n : 対象リンク数

ここで、無作為に抽出した 10 リンクに関する 4 日分の旅行時間データを用いて得られる r と \hat{r} を比較したところ、図 5.2.3 に示すように両者には強い正の相関がみられ、各分類間の相対比較を行う上ではこの代用は有効であると言える。

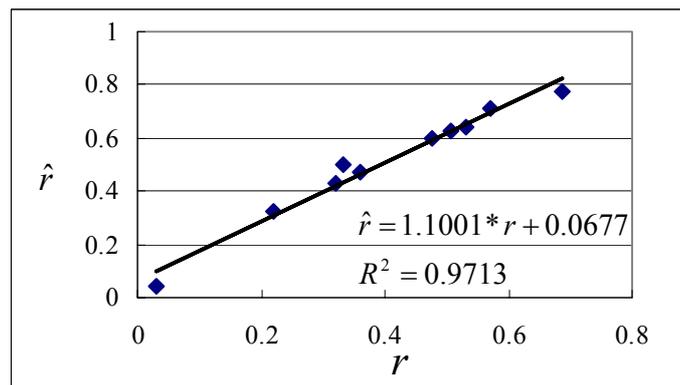


図 5.2.3 r と \hat{r} との相関関係

次に分類の類似性について評価を行う。まず最初に評価した日種分類としては、経験的に類似性が予想される表 5.2.1 に示す分類 1～3 の 3 通りを設定した。分類 1 は曜日ごとに 7 分割するものである。分類 2 は平日と休日に 2 分割するものである。分類 3 は平日/休日の連続性に着目して 6 分割するものである。ここで、これら 3 つの分類と類似性の水準を相対的

に比較するため、ランダム分類（各曜日をランダムに割り当てたもの）を設定した。以上4つの分類に関する平均相関係数を図5.2.4に示す。この結果を大まかに評価すると、分類3 > 分類2 > 分類1 > ランダム分類の順に相関が高くなっている。また、上記3つの分類のほとんどがランダム分類を上回っていることから、上記分析は有意であると考えられる。

表 5.2.1 日種による分類

分類	日種	備考
1	日曜日	
	月曜日	
	火曜日	
	水曜日	
	木曜日	
	金曜日	
	土曜日	
2	平日	月曜日～金曜日
	休日	土曜日，日曜日，祝祭日
3	平日 1	月曜日
	平日 2	火曜日～木曜日
	平日 3	金曜日（休前日）
	休日 1	土曜日，連休初日
	休日 2	連休中日
	休日 3	日曜日，連休最終日
4	平日 4	月曜日～木曜日
	平日 3	金曜日
	休日 4	土曜日，連休初日・中日
	休日 5	日曜日，連休中日・最終日

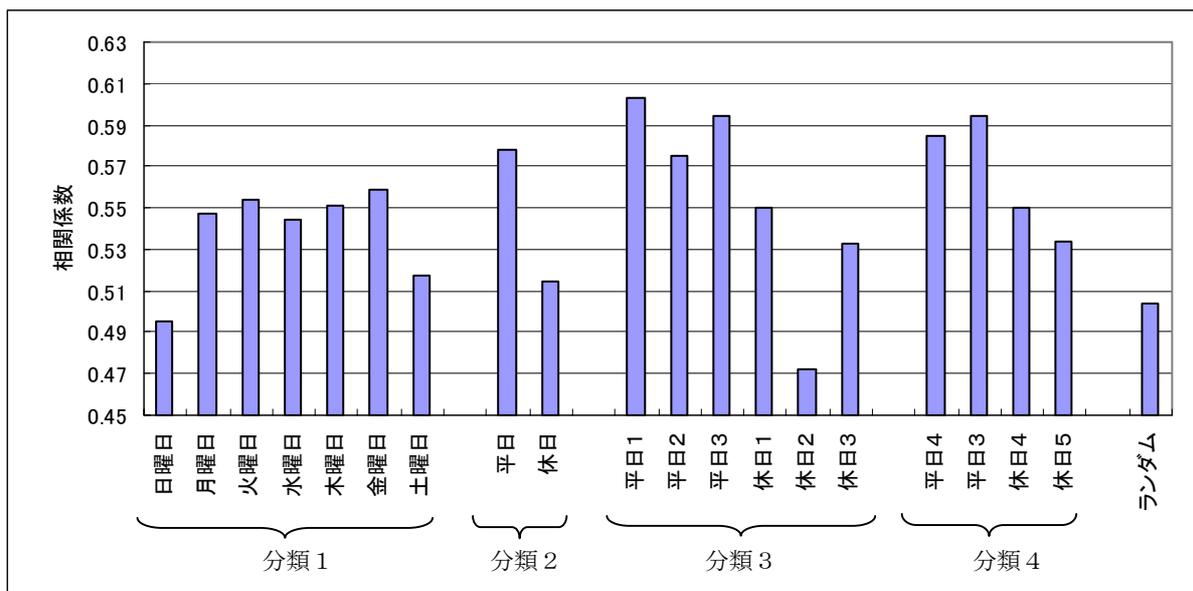


図 5.2.4 分類・日種別相関係数

分類3における休日2の相関が著しく悪化していたが、これは特異日を除くと対象日が他より極端に少ない(年間6~7日)ため十分なデータ量が得られていない影響があると考えられる。そこで、この対象日を休日1か休日3のいずれかに割り当てることを考え、休日1~休日3の代案として新たに休日4と休日5を設定することにした。また、車載機の記憶領域(DVD-ROM または HDD)に格納することを前提とした場合、地図や地点検索データの容量が年々増大している昨今においては、データの空き容量に十分な余裕がないことが想定される。その場合には統計の分割数を減らすことによってデータ量を削減する必要があり、平日についても分類数を削減することが考えられる。その場合、経験的に金曜日とその他の平日には差があると考えられることから、平日1と平日2の代わりにこれらを統合した平日4を新たに定義し、上記休日4と休日5を加えた分類4を設定した。平均相関係数の評価により、分類4は分類3とほぼ同等であることがわかった。以降では、この分類4に基づき統計処理、及び性能評価を行うことにする。

(2)統計処理による精度の安定化

精度の向上を実現するために統計処理を行うが、推定された統計旅行時間を利用するにあたり、事故などの突発事象による特異データを適切に検出・除去することにより、より日常性の高い旅行時間を推定する必要がある。そこで、本節では特異データを適切にフィルタリングする手法について述べる。

まず、1年間のVICS情報の分析から特異データとして次の3タイプを定義する。

タイプI: 超高速走行データ。車両センサの計測情報から平均速度を推定する際、または地点データをリンクデータに拡大利用する際の誤差が原因と考えられる。

タイプII: 常に渋滞となるデータ。タイプIの2つの原因に加え、違法駐車車両等感知してしまうことが原因と考えられる。

タイプIII: 突発事象等による非典型的なデータ。タイプIやタイプIIの各原因が突発的に発生する場合も考えられるが、それよりもむしろ事故やイベントによる非日常的な交通状況が発生することが主な原因と考えられる。

次に、各タイプ別の特異データ検出方法について述べる。

(a)タイプI

道路の規制速度に対して許容範囲を上回る速度になっている時に特異データとして検出する。この許容範囲としては、今回は速度分布で平均95%のデータ数を確保できる境界速度(95パーセンタイル値)から求めることとし、一般道路、高速道路別にそれぞれ30km/h、40km/hと決定した。すなわち、規制速度60km/hの一般道路においては、90km/hを上回る速度が検出されることになる。

(b)タイプII

同一リンクにおいて一日のうち許容割合(時間)以上の頻度で渋滞を示すデータを特異データとして検出する。この渋滞の許容割合については、日常の交通体験から判断して、突発事象の影響がない日常的な交通状況においては実際に発生する可能性が極めて低いと考えら

れる値(80%)を設定した。つまり、通常では一日 24 時間中 19 時間も渋滞が発生することはないとの経験に基づき設定している。実際に、このタイプのデータのほとんどは感知器による（誤検知等の）エラーによるものである。

(c)タイプ III

他の日のデータと比べて偏差が許容範囲以上に大きい時に特異データとして検出する。この偏差の許容範囲については、データが正常である範囲として、データ集合 X の平均値 \bar{X} と標準偏差 s_X を用いて次式で定義した。

$$\bar{X} - \alpha \cdot s_X \leq X \leq \bar{X} + \alpha \cdot s_X \quad (5.2.6)$$

α は設定パラメータである。今回、データ X は旅行速度とする。前述の分類 4 では 4 分割であり、かつ 1 年分の蓄積データを対象とすることからデータ母数が豊富にあることを考慮し、今回は α として 1.0 を設定した。すなわち、仮に旅行速度の分布が正規分布であるならば、データが正常と判定されるのは全体の約 68% と、正常範囲がやや狭くなるように設定した。

次に、タイプ III における具体的な特異データの除去に関する手順について述べる。

- (i) ある時刻に関するデータ集合 X の平均値 \bar{X} と標準偏差 s_X を算出する。
- (ii) 集合 X のうち、式(5.2.6)を満たさないデータ（特異データ）の数 N を算出する。
- (iii) 式(5.2.6)を満たさないデータのうち、偏差が最大のデータを除去し、残ったデータに関して平均値 \bar{X} と標準偏差 s_X を算出する。
- (iv) 除去されるデータ数が N になるか、残りのデータ全てが式(5.2.6)を満たすまで(iii)を繰り返す。

ある 1 日における無作為抽出された 19,726 のリンクを対象に、タイプ I 及びタイプ II の特異値の検出状況を表 5.2.2 に示す。検出率としては母数が大きいため小さな値となっているが、特定リンクにおいては比較的高い頻度で検出される傾向があり、これらの特異値検出がそれらのリンクにおける精度向上に寄与すると考えられる。次に、1 年間の交通情報データを用いて、日間変動の比較的大きい 40 リンクを対象に、タイプ III の特異値の検出状況を表 5.2.3 に示す。変動が比較的大きなリンクを対象としたことと、偏差の許容範囲を比較的厳しく設定したことにより、平均で 21.6% のデータが特異値と判定された。また、表 5.2.4 に示すように、タイプ III の特異値除去を行うと、特異値除去を行わない場合に比べて速度の標準偏差が小さくなり、データの安定化及び高精度化に寄与できることが考えられる。

以上の方法で検出された特異値が除去された後、5 分単位で平均化されて統計旅行時間が推定される。そのため、より日常的で再現性の高い、すなわち高精度な旅行時間を提供することができるようになると考えられる。

表 5.2.2 タイプ I 及びタイプ II による特異データ検出の全データに占める割合

	タイプI	タイプII
特異データの検出率	0.89%	0.70%

表 5.2.3 タイプ III による特異データ検出の全データに占める割合

	タイプIII
特異データの検出率	21.62%

表 5.2.4 タイプ III による特異データ検出の有無別統計旅行時間の比較

エリア	サンプル リンク数	平均標準偏差 (km/h)		タイプ III 特異 データの検出率
		特異データ検出 なし	特異データ検出 あり	
A	10	5.07	2.17	22.4%
B	10	3.18	1.39	25.0%
C	10	5.46	2.09	23.7%
D	10	9.53	2.78	15.3%

(3)情報未提供リンクの推定

旅行時間の精度を確保しつつ情報量を増加させることを目的として、次の3つの手法を検討した。

(a) 渋滞情報からの推定（推定手法1）

VICS 情報には旅行時間と渋滞情報が含まれるが、両方が提供されたり一方が提供されたりと提供状況がリンクによって異なる。実際の VICS 情報を分析すると、全ての渋滞・旅行時間リンク情報のうち、全国で旅行時間は 53%、渋滞情報は 86%を占めており、渋滞情報の方が広く提供されている。これは、VICS が扱う交通情報としては、車載機の画面等を通して視認性に優れている渋滞情報を重視して提供しているためと考えられる。しかしながら、本研究で対象としているのは経路探索に用いるための旅行時間であり、その情報量を増やすためにはこの渋滞情報を有効活用することが不可欠である。そこで、以下に述べる方法で渋滞情報から旅行時間を推定することにした。

VICS の渋滞情報は、リンクごとに渋滞の程度を3レベル（渋滞無し、混雑、渋滞）で示す渋滞度及び各渋滞度の長さ（渋滞長）で構成されている。まず、各渋滞度に対応する速度の関係を次式で定義した。

$$V_i = a_c \cdot V_r + b_c \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5.2.7)$$

$c = 1$: 渋滞無し

$c = 2$: 混雑（軽度渋滞）

$c = 3$: 渋滞（重度渋滞）

ここに V_r はリンクの規制速度である。 a_c 及び b_c は渋滞度ごとに定めるパラメータであり、これらは旅行時間と渋滞情報が同時に提供されているリンクの情報を元に最小二乗法によって同定される。規制速度の関数としたのは、表 5.2.5 に示す道路交通情報の提供に関するガイドライン¹⁹⁾における道路区分が、概して規制速度に対応すると考えたためである。なお、VICS 情報における渋滞情報には代表渋滞情報と区間渋滞情報がある。前者はリンク全体を一つの渋滞レベルで代表するものであり、後者はリンクを最大7つの区間に分割してそれぞれに対

して渋滞レベルを割り当てるものである。ここでは、情報の分解能を上げることにより精度が向上すると考えられることから後者を採用することにした。実際に両者の精度を比較したところ、後者は前者に比べて誤差が1～8%低減されることを確認した。したがって、同一リンク内に複数の渋滞区間が混在する場合にはそれぞれの渋滞レベルと区間長に応じて旅行速度が計算される。また、各渋滞レベルと速度の関係は、地域により差がみられたことから地域ごとにパラメータの同定を行った。表 5.2.6 にいくつかの地域における渋滞度から推定される速度の例を示す。これにより推定される速度を用いて推定旅行時間を算出することができるため、情報の精度を確保しつつ旅行時間の情報量を増加させることができる。

表 5.2.5 道路区分別渋滞情報の規準

道路区分	混雑と表現すべき道路	渋滞と表現すべき道路
都市間の自動車専用道路	60km/h以下	40km/h以下
都市内の自動車専用道路	40km/h以下	20km/h以下
上記以外の道路	20km/h以下	10km/h以下

表 5.2.6 渋滞度から推定される旅行速度の例（規制速度：60km/h）

エリア	渋滞レベル		
	渋滞無し	混雑	渋滞
都心部 一般道路 A	28.3 km/h	11.2 km/h	6.3 km/h
郊外部 一般道路 B	37.4 km/h	15.4 km/h	7.6 km/h
都市内 高速道路 C	74.7 km/h	28.4 km/h	15.1 km/h

(b) 同一路線・同一進行方向の道路情報からの推定（推定手法2）

国道や高速道路といった主要幹線道路においても、車両センサが未設置であるなどの理由により、部分的に交通情報が提供されないリンクが実際に少なからず存在する。このような情報未提供リンクについては、同一の路線・進行方向である近隣のリンクと交通状況が類似すると考え、この条件を満たすリンクに交通情報が提供されていれば、図 5.2.5 に示すように、それらを用いて情報未提供リンクの速度、旅行時間を推定する。

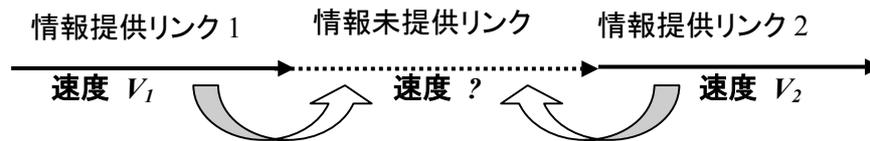


図 5.2.5 推定手法2 の概念

推定の手順について説明する。まず、補完元となるリンク i の統計旅行時間から求まる旅行速度 V_i の規制速度 V_{r_i} に対する割合（速度比率） $R_i(=V_i/V_{r_i})$ について、全補完元リンクに関して平均化することにより推定対象リンク j の速度比率 R_j を求める。次に、この速度比率と規制速度 V_{r_j} の積により対象リンクの推定速度 V_j が得られ、その推定速度とリンク長より推定旅行時間 T_j が得られる。速度比率の考え方を導入したのは、リンクによって規制速度が異なる場合があり、それに対応するためである。

ただし、情報未提供リンクと交通情報が提供されている近隣のリンクとの間に交通状況が大きく変化するボトルネックが存在する場合には補完推定に利用しない。なお、推定する統計旅行時間は全国を対象とするため全てのボトルネックを把握することは困難であり、今回は主要幹線道同士の交差点をボトルネックとみなすことにした。また、情報未提供リンクから設定距離(2km)以上離れたリンクの交通情報についても類似性が低いと考えられるため補完推定に利用しない。

(c) 同一エリア・同一道路種別の道路情報からの推定（推定手法3）

本手法は、推定手法1及び推定手法2の対象とはならない情報未提供リンクを対象とする。例えば、地方道1号は交通情報が提供されているが地方道2号は提供されていないというような状況が実際に少なからずある。このような情報未提供リンクについては、同一エリア（メッシュ）における同一道路種別（都市間高速道路，都市内高速道路，国道，地方道など）であるリンクと交通状況が類似すると考え、この条件を満たすリンクに交通情報が提供されていれば、図 5.2.6 に示すように、それらを用いて情報未提供リンクの速度、旅行時間が推定される。この手法は、推定手法2に比べて距離が比較的離れた補完推定になるため交通状況の類似性は劣ると考えられるものの、従来のカーナビで用いられる静的な平均速度に比べると優位であると考えられる。なぜなら、情報提供されている幹線道路が渋滞していれば、情報提供がされないような非幹線道路であっても位置的に近隣であれば、その渋滞を避けようとする車両によって同様に渋滞する傾向があり、そしてその類似性は道路種別ごとに相関があると

いう分析及び経験に基づくからである。推定にあたっては、推定手法 2 と同様に速度比率を用いて旅行時間が推定される。

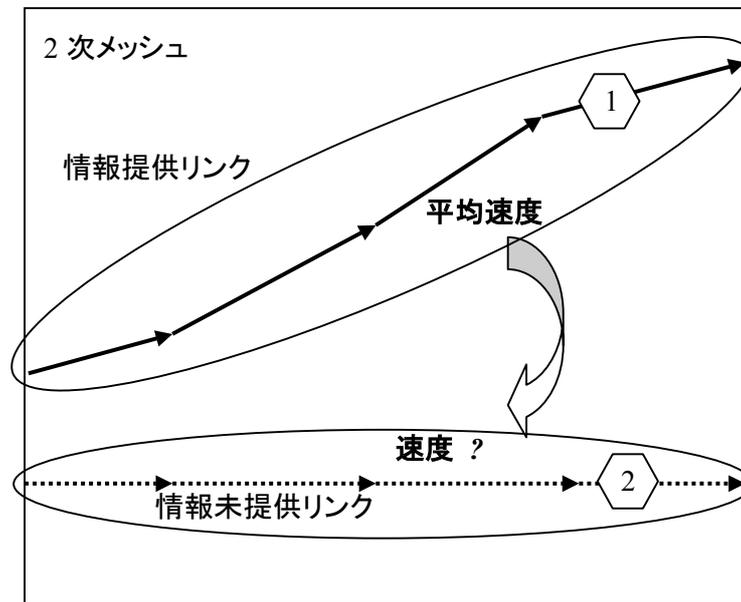


図 5.2.6 推定手法 3 の概念

5.2.3 統計旅行時間の性能評価

(1) 統計処理された旅行時間の性能評価

特異データをフィルタリングした後に統計処理された統計旅行時間の精度について評価した。統計旅行時間の統計分類は、上記で説明した分類 4 を用いた。評価にあたっては、2003 年 10 月 11 日（土）～2003 年 11 月 7 日（金）において、首都圏、阪神圏、中京圏、静岡、栃木の各主要幹線道路にて実車走行テストを行い、実測した旅行時間（真値）と推定された旅行時間及び VICS で提供された旅行時間をそれぞれ比較した。また、評価対象とした交通条件については、あらゆる交通状況を総合的に評価する観点から、渋滞無しから渋滞までの全ての交通状況が混在したものとなっている。

結果を図 5.2.7 に示す。精度について、リアルタイムに提供される VICS の旅行時間がわずかによかったがほぼ同等の水準と考えられ、統計旅行時間はリアルタイム情報ではないにもかかわらず実用上問題ない性能を持っていると言える。しかし、両者について誤差率の標準偏差を比較したところ、VICS 旅行時間に対して統計旅行時間が 2.5% 大きかったことから、統計旅行時間の誤差は比較的ばらつきがあることが認められる。これは、統計旅行時間がリアルタイム情報ではないために、突発事象発生時など日常とは異なる交通状況になった場合の誤差が大きくなるのが原因と考えられる。その反面、日常的な交通状況であれば VICS 旅行時間をむしろ上回るが、これは VICS 旅行時間に含まれるばらつき（ノイズ成分）が統計処理によって取り除かれた効果であると考えられる。

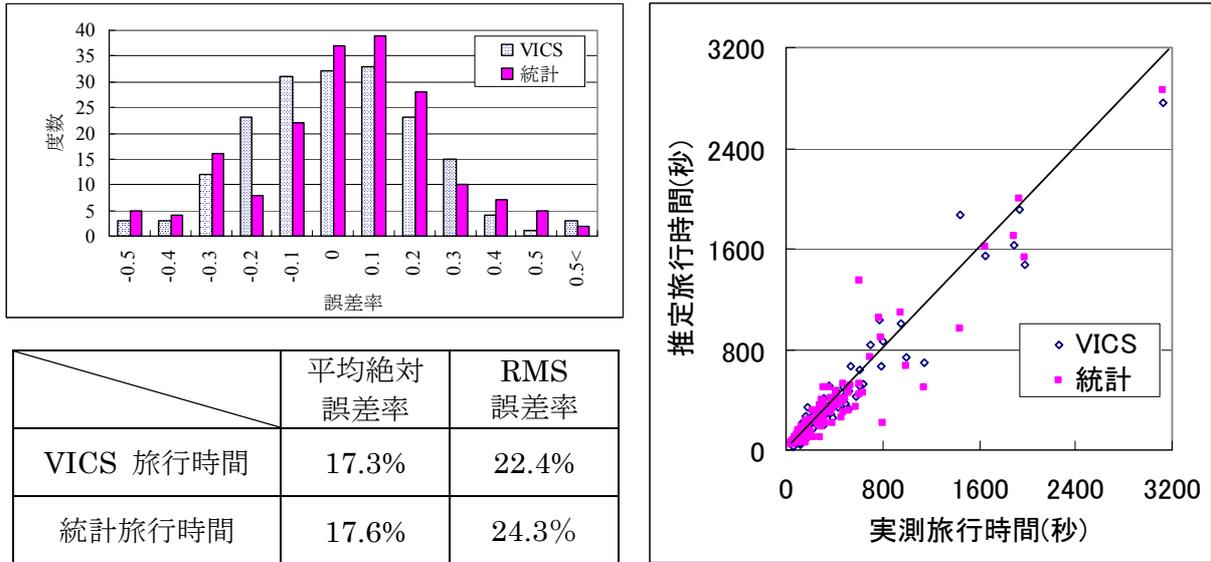


図 5.2.7 統計旅行時間（特異データ除去後）と VICS による旅行時間精度の比較

(2)各推定手法の性能評価

次に、情報未提供リンク推定手法である推定手法 1～3 の性能及び効果について評価する。

(a) 補完推定手法による旅行時間情報量の評価

わが国の 4 大都市圏（東京，大阪，名古屋，福岡の各 10km 圏）について推定された統計旅行時間情報において旅行時間推定手法別リンクの内訳を図 5.2.8 に示す。ここで、示している割合は、対象エリアにおいて定義されている全ての VICS リンク数に対する各手法によって推定された旅行時間が提供されるリンクの数としている。図からわかるように、都市によって内訳に大きく差がある。例えば、名古屋都市圏においては、VICS より旅行時間が提供されたのは 23%であったが、渋滞情報のみ提供されたリンクが 37%あったため、推定手法 1 の寄与するところが大きかった。また、詳細に分析すると、各都市圏の特に郊外においては補完推定手法（推定手法 2 及び推定手法 3）により情報量を大きく増加させる傾向があった。これらの都市圏を総括すると、従来のカーナビが経路計算に利用できたのは VICS の旅行時間が提供されたリンクの全リンクに占める割合である 48.9%であったが、これら 3 つの推定手法による情報量増加分を含めると 99.5%とほぼ全てのリンクについて交通情報が得られることになり、それらが経路探索に利用できるよう大幅に改善することができた。以上により、情報量の増加についてはこれらの推定手法が有効であることが確認できた。

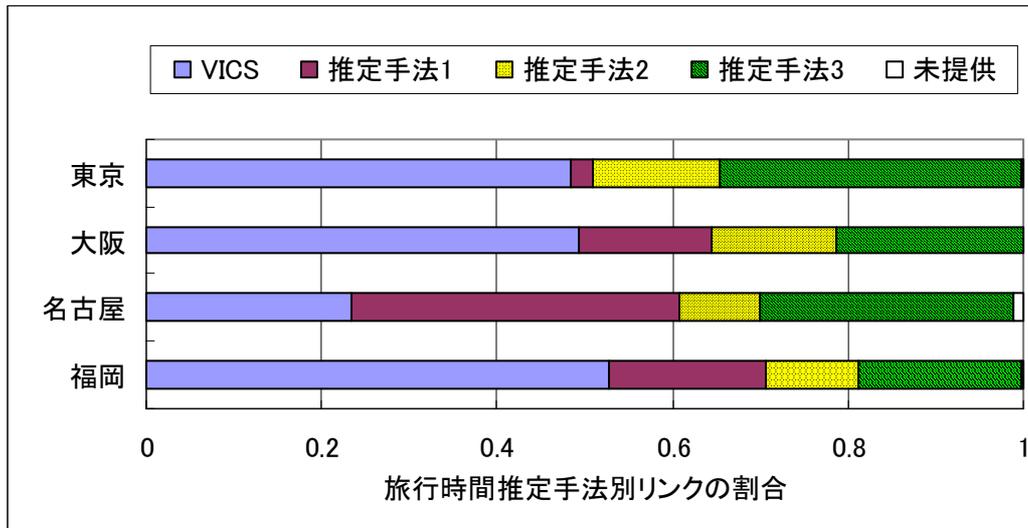


図 5.2.8 地域別・旅行時間推定手法別リンクの内訳

(b) 推定手法による旅行時間精度の評価

これらの推定手法により推定された旅行時間の精度について評価する。評価方法としては、2003年6～9月にかけて茨城県北部地区の主要幹線道路を対象として実車走行テストを行い、実測した旅行時間を真値とした。各推定手法による推定旅行時間との比較対象としては、従来のカーナビで使われていた静的旅行速度によるものとした。推定手法別の評価結果を図 5.2.9～図 5.2.11 に示す。結果からわかるように、いずれの推定法も従来のカーナビに比べて精度が改善されている。また、従来手法と各推定手法で得られた旅行時間について誤差率の標準偏差を比較したところ、従来手法に対して推定推定手法の方が 3～12%小さかった。このことから、本推定手法による旅行時間は従来手法に比べて精度を安定して提供できると言える。以上より、本推定手法は、情報の量だけでなく情報の質（精度）の点においても有効であることを確認した。

	平均絶対誤差率	RMS誤差率
従来 of 旅行時間	25.5%	29.3%
統計旅行時間 (推定手法 1)	18.9%	22.4%

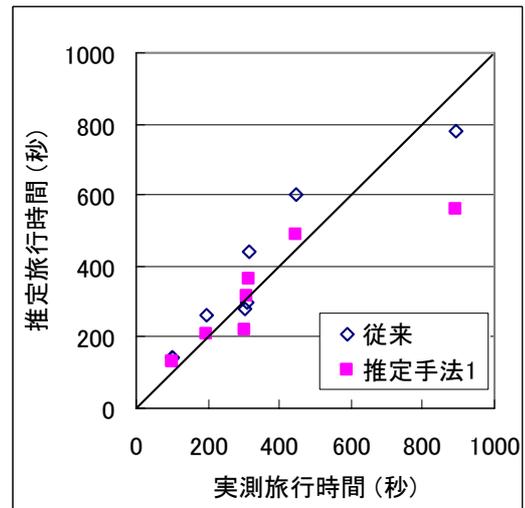


図 5.2.9 推定手法 1 と従来のカーナビゲーションシステムによる旅行時間精度の比較

	平均絶対誤差率	RMS誤差率
従来 of 旅行時間	29.0%	35.6%
統計旅行時間 (推定手法 2)	16.9%	20.0%

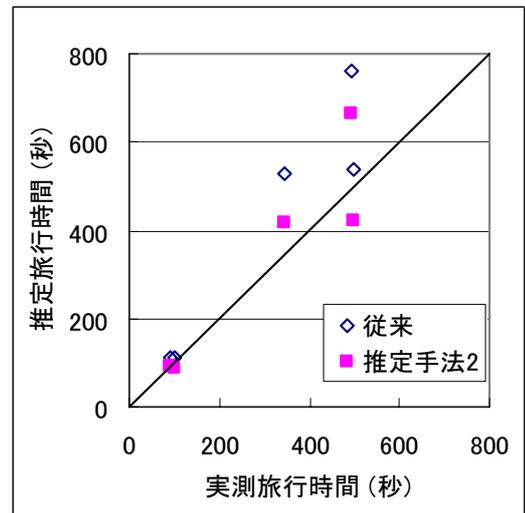


図 5.2.10 推定手法 2 と従来のカーナビゲーションシステムによる旅行時間精度の比較

	平均絶対誤差率	RMS誤差率
従来 of 旅行時間	43.5%	48.8%
統計旅行時間 (推定手法 3)	20.4%	23.2%

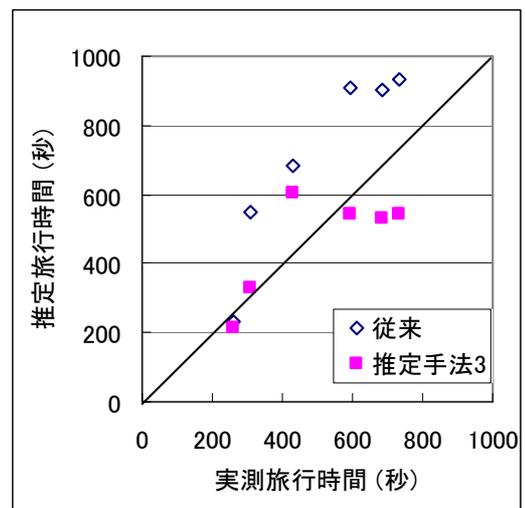


図 5.2.11 推定手法 3 と従来のカーナビゲーションシステムによる旅行時間精度の比較

(3)探索経路の質的評価

次に、リアルタイム VICS 情報、静的平均速度、統計旅行時間をそれぞれ適用して得られる最短時間経路をそれぞれ VICS 利用経路、静的経路、統計利用経路と呼ぶことにし、それぞれの旅行時間を比較することにより経路の質的評価を行う。なお、経路は出発時点における計算結果であり、走行途中での経路再計算は行わない。経路探索において、探索条件は一般道路優先とし、旅行時間が得られていないリンクについては静的な平均速度データを割り当てることにした。また、各経路の旅行時間の算出には、VICS の旅行時間情報を用いて時間の経過に伴って参照時刻を変更しながら計算する方式（時間追従方式）とした。

今回の対象区間として、出発地を東京都の JR 立川駅、目的地を JR 東京駅とした（最短距離の経路で約 36.0km の距離）。使用した VICS 情報は 2003 年 9 月 18 日（木）7 時から 16 時の 1 時間ごとに出発地を出発した場合のデータである。上記 3 つの交通情報を用いて得られる各経路の概要を表 5.2.7 に示す。表よりわかるように、VICS 利用経路は、統計利用経路に比べて交通状況の変化に応じて経路が大きく変わる傾向にあり、静的経路は最短距離の経路に近くなっている。

次に、各経路の旅行時間を評価した結果について説明する。図 5.2.12 は、出発時刻別の各経路の旅行時間を比較したものである。図 5.2.13 は、統計利用経路の旅行時間に対する他の各経路の旅行時間の差を出発時刻別に表したものである。図 5.2.13 において、グラフの縦軸が正の場合には、統計利用経路が他の経路よりも旅行時間が短かったことを意味し、負の場合には逆を意味している。この評価結果を表 5.2.8 にまとめる。これらの結果より、統計利用経路は、VICS 経路に対して平均で 339 秒早く到着でき、静的経路に対して平均で 411 秒早く到着できることがわかった。

以上の結果から、統計利用経路は、過去の履歴情報を用いているにもかかわらず従来のカーナビで提供されている VICS 利用経路や静的経路よりも高品質と言える。よって、統計利用経路は、実用上ほぼ問題がない水準であり、追加コストや待ち時間を必要とすることなくいつでもどこでも利用可能である点にも利点がある。したがって、カーナビにおける最短ルート探索だけでなく、トラックの配車配送計画など物流の効率化に対しても寄与できると考えられる。

表 5.2.7 各経路の概要

	利用する交通情報	経路長の平均	経路長の標準偏差
VICS 利用経路	リアルタイム VICS 情報	37.8km	1.37km
静的経路	静的平均速度	36.1km	0.00km
統計利用経路	統計旅行時間	37.3km	1.24km

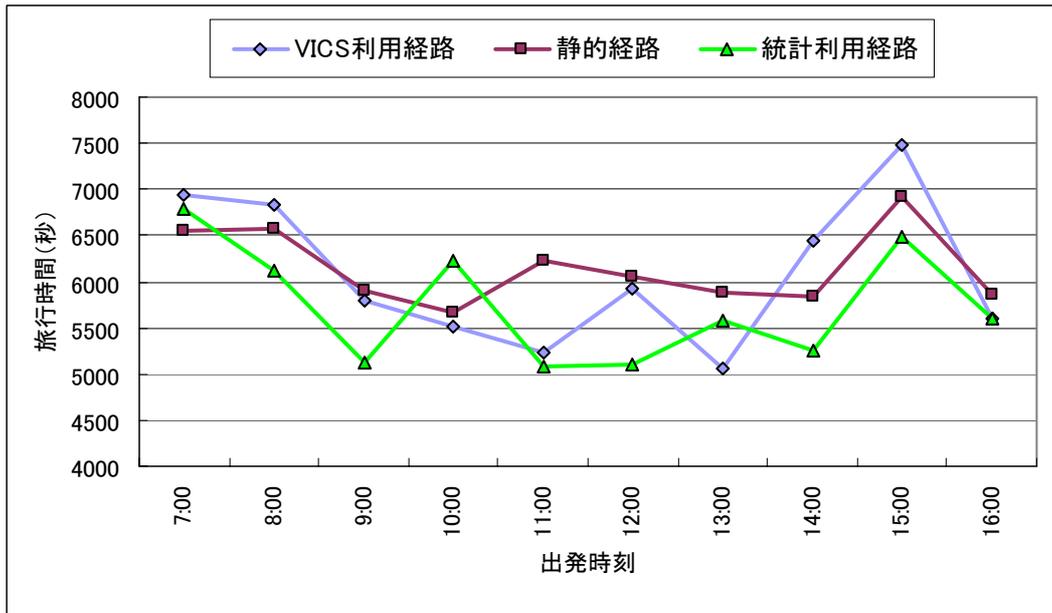


図 5.2.12 各経路の旅行時間の比較

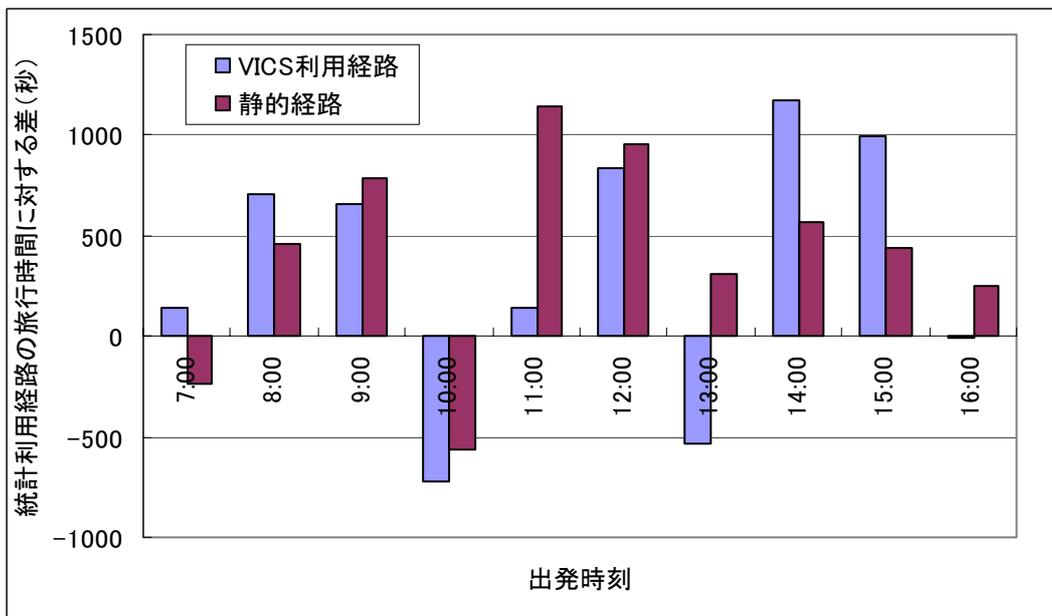


図 5.2.13 統計利用経路の旅行時間に対する他の経路の旅行時間差

表 5.2.8 各経路の旅行時間評価結果

	旅行時間の平均	旅行時間の標準偏差	統計利用経路より早着した回数 (全 10 回中)
VICS 利用経路	6077 秒	803 秒	3 回
静的経路	6149 秒	408 秒	2 回
統計利用経路	5738 秒	627 秒	—

次に、これらの結果について考察する。

まず、統計利用経路の品質が VICS 利用経路に対して優れていることの理由について考察する。5.2.3 項で評価したように、比較的短距離（または短時間で到着できる経路）を対象とした場合には VICS 旅行時間と統計旅行時間に性能の差はあまりない。しかし、今回のように 5000 秒以上もの旅行時間を要する長い経路を対象とした場合には、5.2.3 節の結果は必ずしも当てはまらない。なぜなら、走行中の時間経過に伴って交通状況が変化するため、リアルタイム VICS 旅行時間では精度が悪化すると考えられるが、一方の統計旅行時間は過去の情報から時刻を加味した予測旅行時間であり、精度は時間経過に依存しないと考えられるためである。それに加えて、統計旅行時間には情報未提供リンクの推定手法の効果もあり、総合的に統計利用経路の品質が高まっていると考えられる。

次に、統計利用経路の品質が静的経路に対して優れていることの理由について考察する。静的経路は、静的な平均速度データを用いていることから、主に経路長の短くなるような幹線道路が算出される。実際、今回の対象区間における静的経路においては国道 20 号が多くを占めていた。しかし、今回対象としたような東京郊外から都心部にかけての幹線道路では日中は渋滞が激しく、実際の交通状況は静的な平均速度とは大きく乖離していることが多く、このため静的経路の品質には問題が生じるやすくなると考えられる。

以上より、統計利用経路は渋滞予測型の経路であり、短距離から長距離までの様々なシーンにおいてその品質は優れていると考えられる。しかし、交通事故などの突発事象には対応できないため、その場合には VICS リアルタイム情報の活用も重要になってくる。

5.3 カーナビ向け渋滞傾向の推定

5.3.1 背景

2002年6月に施行された改正道路交通法により、VICSの交通情報データを編集・加工したり、独自に交通情報を収集して提供することが可能となった。交通情報データの加工の中で最も注目される技術の一つに、未来の交通状況を予測する、いわゆる渋滞予測（旅行時間予測）がある。最近では、この技術が携帯電話やカーナビゲーションシステム向けのサービスとして実用化されてきており¹⁶⁾、ユーザによる実際の使い勝手や精度検証等の本格的な評価が待たれる。また、研究事例としても多数の報告がなされている²⁰⁾²¹⁾²²⁾²³⁾。上記は、いずれも経路探索や到着時刻予想などへの応用が期待されている。

一方、ユーザにとって、上記のような数時間先や数日先の詳細な旅行時間等まで必要としなくとも、リアルタイムな経路選択行動のための判断材料としてプラスアルファの情報がほしい場面がある。例えば、進行方向前方ですぐ近くの渋滞している道路を避けるべきか進むべきかの判断が必要になるような場面である。本節では、このような場面でユーザに提供する交通情報の一つとして、近くの渋滞状況がこれから悪化するのか緩和するのかに関する渋滞の傾向に関する情報（以下、渋滞傾向情報）を取り上げ、VICS情報を用いた推定手法及び実際のデータを用いた評価結果について述べる。

5.3.2 渋滞傾向の推定

(1) 渋滞傾向情報の位置付け

できるだけ多くの道路に適用するため、現時点でもっとも情報提供エリアが広いVICS情報を前提とした手法を検討する。上記研究事例のように、過去の蓄積データのパターンなどを用いて現在から数時間先、あるいは数日から数ヶ月先に関する詳細な予測情報を高度予測情報とするならば、渋滞傾向情報は、現在までの渋滞の変動傾向を検出し、その傾向が直近の未来においても継続するものとして情報提供する、いわば簡易予測情報として位置付けられる。現状のVICSによる渋滞情報は、渋滞度として“渋滞無し”“混雑”“渋滞”の3レベルで表現されているが、この渋滞傾向はこれに付加されることによって、同じ渋滞であっても避けるべき渋滞なのか避けなくてもよい渋滞なのかの区別ができるようになることを狙ったものである。その結果として、現状のVICSによる渋滞情報をより詳細化することになり、ユーザにとって経路選択行動を行う上での判断の手助けになると考えられる。

(2) 推定手法の検討

上記で述べたように、渋滞傾向情報を現在までの渋滞変動傾向と定義する。その定式化にあたっては様々な構成が考えられるため、まず考えられる候補を挙げ、次に実際のVICSデータを用いて各候補の特性を分析・評価することによって改良していくアプローチをとることにした。手法の目指すべきところは、出力される渋滞傾向を旅行時間データと時系列で比較しておおまかにその傾向を捉える妥当性があることに加え、出力の安定性、時間追従性（時間遅れの少なさ）を確保することである。

まず、渋滞傾向判定方法の基本概念として、式(5.3.1)で示される旅行時間変化率 $R(t)$ に応じ

て、渋滞傾向 $T_r(t)$ を表 5.3.1 に示す 3 種類で判別することにした。ここで、 $T(t)$ は時刻 t における旅行時間を表す。また、 ε_1 、 ε_2 はそれぞれ負、正の判定閾値である。

$$R(t) = \frac{T(t) - T(t - \Delta t)}{T(t)} \quad (5.3.1)$$

表 5.3.1 渋滞傾向の判定条件

条件式	渋滞傾向 $T_r(t)$
$R(t) < \varepsilon_1$	渋滞緩和(-1)
$\varepsilon_1 \leq R(t) < \varepsilon_2$	変化無し(0)
$\varepsilon_2 \leq R(t)$	渋滞悪化(1)

(a) 現在と 1 周期前のデータによる手法 (手法 1)

旅行時間の変化状況を捉える手法における最も単純なものとして、現在と 1 周期前 (VICS の情報更新周期: $\Delta t = 5$ 分) とを比較することが考えられる。これはごく短期の渋滞傾向を捉えるものという位置付けになる。本手法を神奈川県国道 246 号の 1 区間に適用した結果を図 5.3.1 に示す。今回用いたデータは 2003 年 4 月 16 日 (水) の旅行時間情報であり、判定閾値として $\varepsilon_1 = -0.07$ 、 $\varepsilon_2 = 0.07$ とした。なお、図の渋滞傾向に関する数値の意味は、-1, 0, 1 それぞれに対して渋滞緩和, 変化無し, 渋滞悪化である。

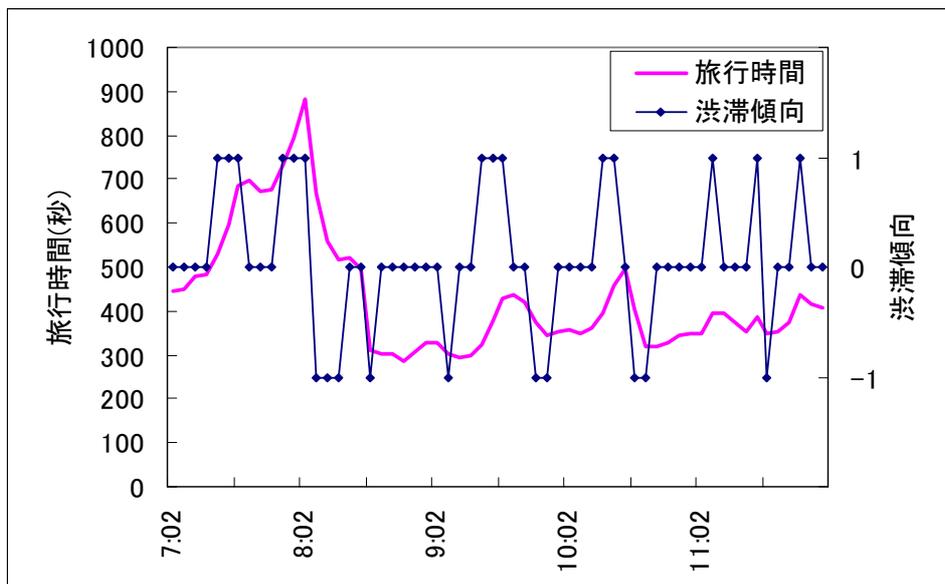


図 5.3.1 手法 1 による渋滞傾向推定結果

(b) 過去複数周期のデータによる手法 (手法 2)

旅行時間の変化が時間経過とともにリニアに推移するような状況においては手法 1 で問題ないが、実際の VICS のリンク旅行時間データは微小な増減変動が起こることも少なくないため、感度が敏感になりすぎる傾向があった。そこで、もう少し長い期間で傾向を捉える方がより妥当な結果を得ることができると考え、現在までの過去複数周期のデータを利用することを検討した。この手法の代表的なものとしては、移動平均、指数平滑、メディアンフィ

ルターを用いたものなどが考えられるが、ここでは扱うデータ量を削減できることから指数平滑による手法を検討することにした。指数平滑による旅行時間 $T'(t)$ は式(5.3.2)によって表される。 α は 0 から 1 までの係数パラメータであり、大きいほど現在の旅行時間の重みが指数的に増加することになる。

$$T'(t) = \alpha \cdot T(t) + (1 - \alpha) \cdot T'(t-1) \quad (5.3.2)$$

この平滑旅行時間を式(5.3.1)に適用したものを手法 2 とし、上記道路区間に適用した結果を図 5.3.2 に示す。今回、係数パラメータ $\alpha = 0.5$ 、判定閾値 $\varepsilon_1 = -0.05$ 、 $\varepsilon_2 = 0.05$ とした（感度を悪化させないため手法 1 における判定閾値よりも絶対値が小さくなるように設定した）。本手法により、旅行時間の変動がスムーズになり、手法 1 よりも渋滞傾向において妥当性、安定性を増している。一方、渋滞の立ち上がりや立ち下りの際に 5 分程度の時間遅れが発生していることもあった。渋滞傾向をさらに長い期間で捉えることによりさらに安定化を図る場合には α の値を小さくすればよいが、一方で時間遅れがさらに大きくなることになる。このあたりはトレードオフの関係にあり、リンク旅行時間の変動特性等に応じてパラメータを調整することによって最適化を図ることが課題である。

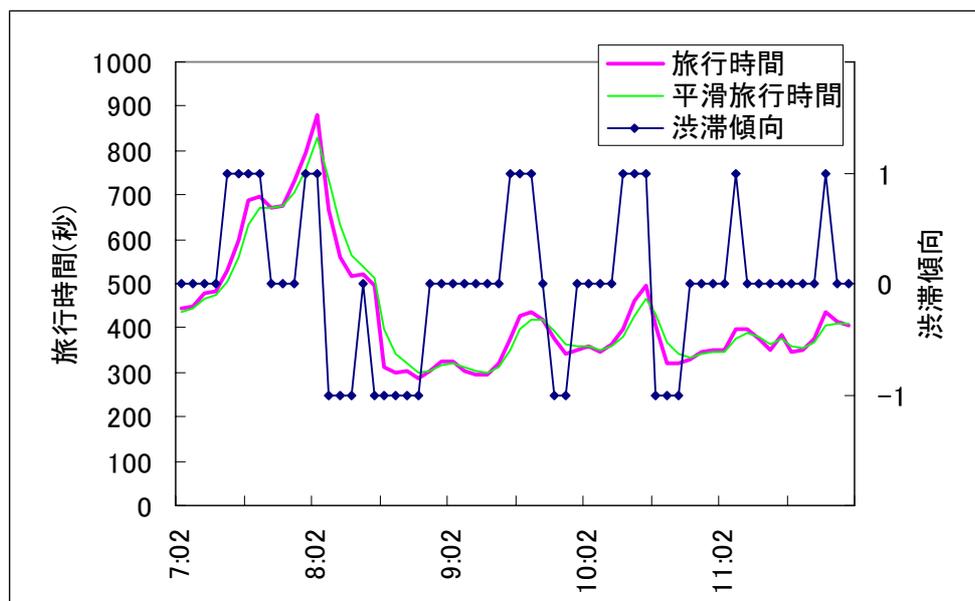


図 5.3.2 手法 2 による渋滞傾向推定結果

(c) ヒステリシスモデルを導入した手法（手法 3）

手法 2 の平滑化によって渋滞傾向の妥当性、安定性を増したが、それでもなお微小変動するなど安定性にやや欠けることがあり、また時間追従性とのトレードオフの関係もあって限界がある。そこで、妥当性を確保しつつ時間追従性と安定性の両立を図るため、上記手法 2 の渋滞傾向判定においてヒステリシスモデルを導入する手法を検討した。具体的には、渋滞傾向を判定する際に、前回の渋滞傾向に応じて旅行時間変化率に関する境界値にヒステリシス特性を持たせた（図 5.3.3）。図において、 $\varepsilon_3 \sim \varepsilon_8$ は次式を満たすパラメータである。なお、初期時の渋滞傾向 T_r は 0（変化無し）とする。

$$\varepsilon_3 \leq \varepsilon_4 \leq \varepsilon_5 \quad (5.3.3)$$

$$\varepsilon_6 \leq \varepsilon_7 \leq \varepsilon_8 \quad (5.3.4)$$

表5.3.2のパラメータに基づき、手法3を上記道路区間に適用した結果を図5.3.4に示す。本手法により、渋滞傾向の判定に関して手法2よりも妥当性，特に安定性を増している。安定性については、例えば7～9時での効果が特に顕著に表れており、表5.3.3に示すように7時から12時までの5時間全体において渋滞傾向が変化した回数を各手法別に比べても安定性が向上していることがわかる。また妥当性についてもおおよその傾向を捉えている点で良好である。一方、手法2の弱点であった時間追従性については、指数平滑のための係数パラメータ α を手法2の時(0.5)よりも若干大きめにしたため最新のデータをより重視していることになりほとんど問題は現れておらず、総合的に最も良好な結果を得ることができた。

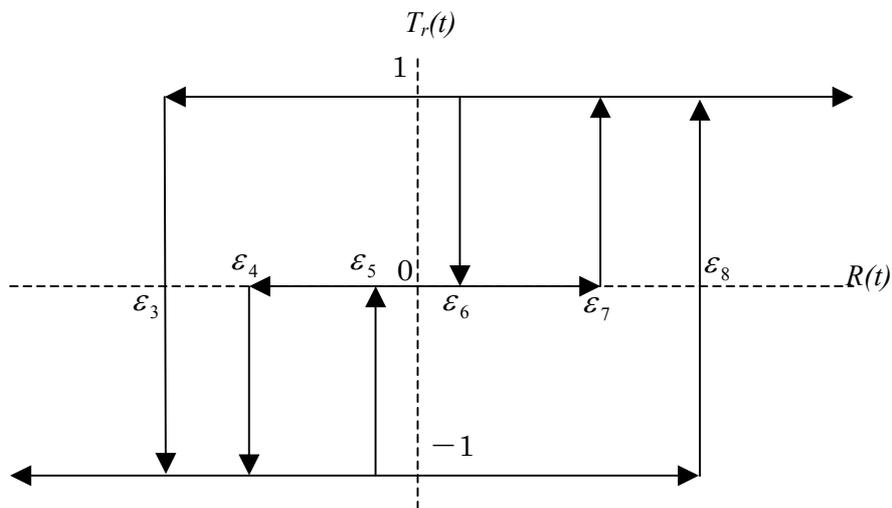


図 5.3.3 渋滞傾向のヒステリシス特性モデル

表 5.3.2 手法3のパラメータの一例

α	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6	ε_7	ε_8
0.58	-0.08	-0.07	-0.001	0.001	0.07	0.08

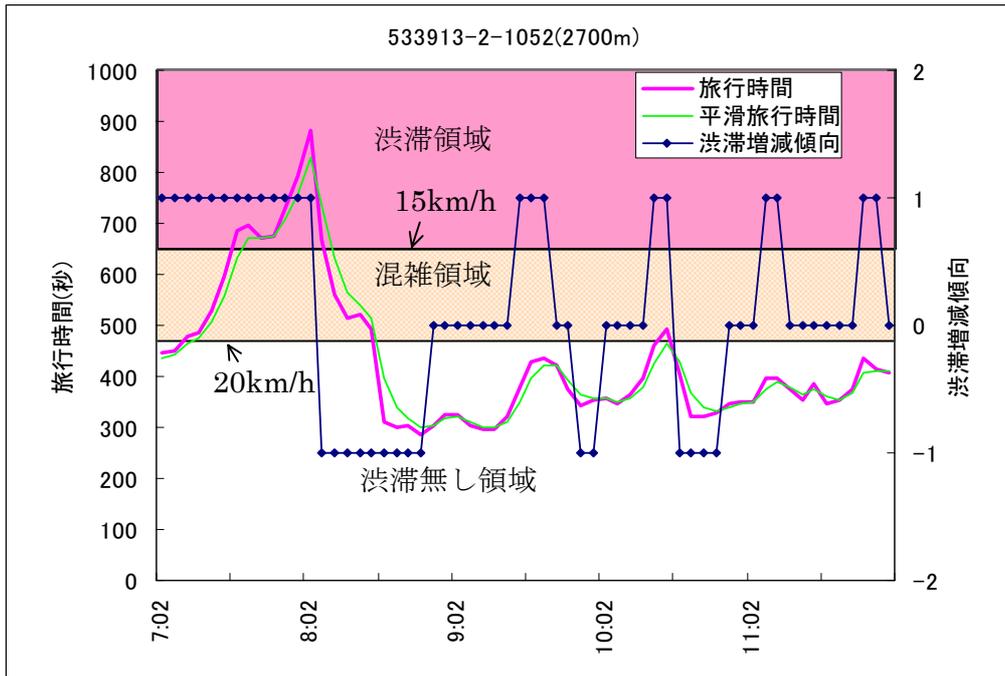


図 5.3.4 手法 3 による渋滞傾向推定結果

表 5.3.3 各手法の渋滞傾向変化回数 (7-12時)

手法	渋滞傾向の変化回数
手法 1	24
手法 2	16
手法 3	13

(3) 渋滞傾向情報の利用法の検討

旅行時間とリンク長より速度を求め、その速度から渋滞度を推定することが考えられる。ここでは、渋滞判定閾値として渋滞と混雑の境界値を 15km/h、混雑と渋滞無しの境界値を 20km/h として旅行時間に換算した各領域を前記図 5.3.4 のグラフ上に表示している (通例的には前者の境界値として 10km/h が設定されることが多いが、対象リンクが長距離であるためここでは上記のように設定した)。例えば、7:02 においては従来の VICS では“渋滞無し”という判断になるが、渋滞傾向情報を付加することにより“悪化傾向にある渋滞無し”というように従来に比べ詳細に表現することができるようになる。また、8:07 においては“緩和傾向にある渋滞”と表現することができ、この情報をユーザに提供すれば、「これから渋滞が解消するかもしれないのでこのまま経路を変更せずに進もう」という判断の手助けとなりうる。渋滞傾向情報のカーナビへの表示例として、従来の渋滞情報に付加して表示したものを図 5.3.5 に示す。また、渋滞傾向情報に基づき、動的経路探索用のリンクコストを変更することも考えられる。

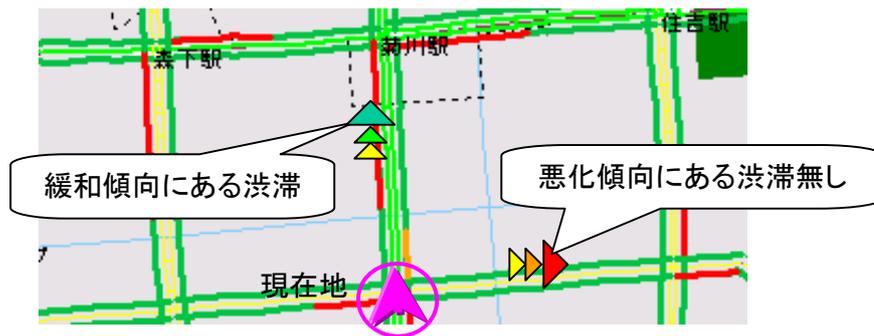


図 5.3.5 渋滞傾向情報のカーナビへの表示例

5.3.3 渋滞傾向情報の評価

以上により、手法3による渋滞傾向情報の大まかな妥当性を確認することができた。一方、この渋滞傾向情報を簡易予測情報として位置付けていることから、“予測情報”としての性能について評価する。評価方法としては、表 5.3.4 にしたがって、現在時刻 t における渋滞傾向 $T_i(t)$ と、真値としての次の時刻 $(t+1)$ における旅行時間の変化率 $R(t+1)$ とを比較することにより合否判定を行うことにした。

予測情報としての合否判定結果を図 5.3.6 に示す。5 時間分 (60 データ) のうち 49 データ (82%) において「合」という結果であった。「否」になったデータの多くは旅行時間の極大・極小点で見られたが、このような極大・極小点での的中率を向上させるには、3.4 節や 3.5 節で述べた予測旅行時間、あるいは 5.2 節で述べた統計旅行時間などの予測情報を利用することなどが考えられる。また、7~9 時のように渋滞が著しく変化する朝ピークの時間帯においては、92%のデータにおいて「合」という良好な結果が得られた。ピークの時間帯には、ユーザはこれらの渋滞情報をより参考にしたいと考えられ、その評価が良好であったことは実用性において有効であると考えられる。

表5.3.4 渋滞傾向情報の合否判定基準

渋滞傾向の予測値	現在~5 分後の変化率 R	判定
渋滞緩和(-1)	$0.05 < R$	否
渋滞悪化(1)	$R < -0.05$	否
変化無し(0)	$0.1 < R $	否
上記以外		合

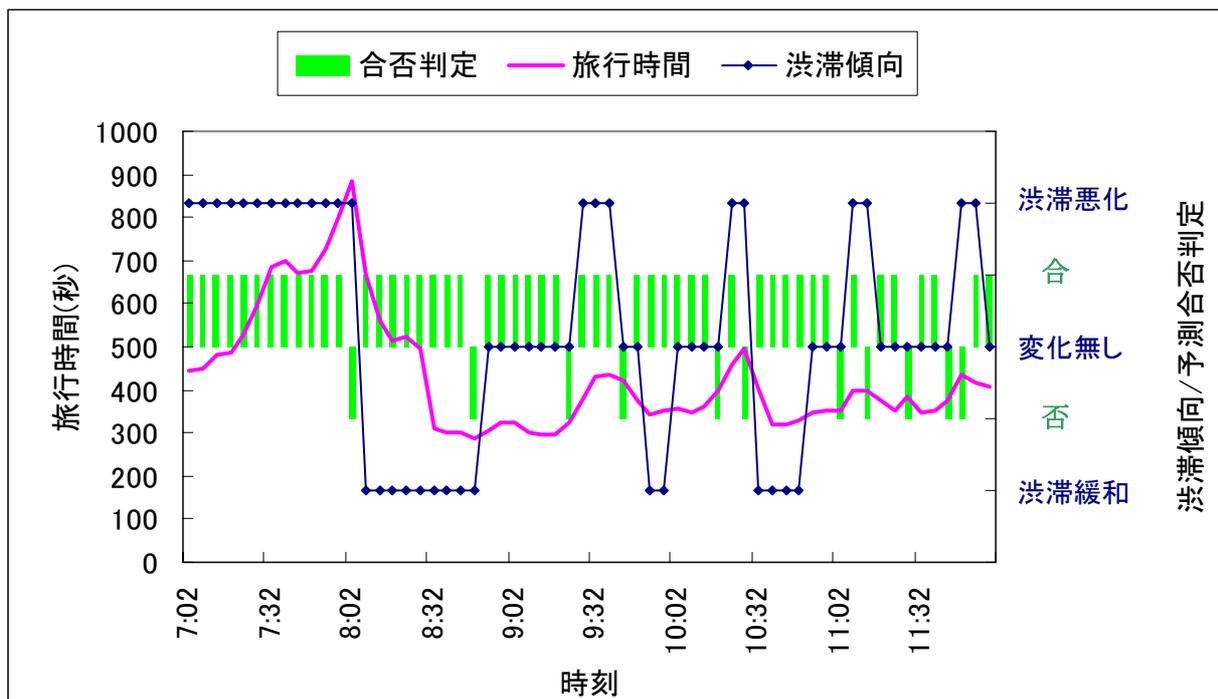


図 5.3.6 予測情報としての合否判定結果

一方、JHの渋滞予測による精度（的中件数）はおおむね6～7割であった²³⁾ことから、対象とする道路区間と予測先の時間が異なるものの、本研究の手法はそれと同等以上の性能と言える。

しかし、市街地における交差点が密集したようなリンクにおいては、信号機の影響等により上記のような旅行時間の極大・極小点が多数見られる可能性がある。その場合、予測情報としては正解率が悪化するおそれがあるが、そのようなリンクは一日中そういった不安定な傾向であるため事前に不安定さを抽出することができ、そのように抽出されたリンクは実際の運用においては渋滞傾向情報の対象外にすべきと考える。

5.4 まとめ

本章では、2002年6月より施行された改正道路交通法によって可能となった VICS 情報を用いた旅行時間予測に関する手法として、カーナビでの動的経路探索に利用することを目的とした統計旅行時間の推定手法と、今後の渋滞が悪化するか緩和するかに関わる情報と定義した渋滞傾向を推定する手法について述べた。

統計旅行時間の推定手法は、最適な統計分類方法、特異データの検出方法、及び交通情報が提供されないリンクに対する補完推定法のそれぞれによって、精度を向上させるものである。この推定手法によって得られた統計旅行時間をカーナビの記憶領域に格納することによって、いつでもどこでも渋滞を考慮した予測型の動的経路探索が可能になる。実際の道路における実車走行テストによって特異データの検出後の推定精度を評価した結果、統計旅行時間はリアルタイムに提供される VICS の旅行時間とほぼ同等の水準であったことから、リアルタイム情報ではないにもかかわらず実用上問題ない性能を持っていることを確認した。また、補完推定法の性能を評価した結果、旅行時間の情報カバレッジにおいては VICS の 48.9%に対して本手法は 99.5%と大幅に改善できたことを確認し、また推定精度を評価した結果、従来のカーナビで推定されたものに比べて精度が改善されたことを確認した。したがって、統計旅行時間の推定手法は、情報の量だけでなく情報の質（精度）の点においても有効であると言える。

また、統計旅行時間の推定手法によって得られる統計旅行時間を用いた経路の品質についても評価した。その結果、従来のカーナビにおいて提供される VICS 情報を利用した経路及び静的な平均速度を利用した経路に比べて、ほとんどの場合において目的地に早着けることがわかり、統計旅行時間の推定手法が経路の品質向上にも寄与できることを確認した。

渋滞傾向の推定手法は、リアルタイムな迂回行動選択への一助となるべく現在までの渋滞変動傾向がごく近い未来についても継続するものとみなして算出するものであり、この渋滞傾向情報を従来の VICS 渋滞情報に付加して提供することにより交通情報をより詳細化することを狙ったものである。実際の道路において推定された渋滞傾向を評価した結果、平滑化とヒステリシスモデルを導入することで、全体の 82%、朝ピーク時には 92%のデータにおいて予測結果が合致する結果となり、渋滞傾向の妥当性を確保しつつ時間追従性と安定性の両立を図れることを確認した。

上記推定手法は、いずれもカーナビにおける動的経路探索だけでなく物流車両の配車配送計画など交通情報を応用した様々なアプリケーションに用いることができる。

しかし、渋滞傾向の推定手法は基本的に直近の変化率を利用するものであるため、旅行時間の極大や極小点においては不正解となってしまう点に課題がある。今後は、リアルタイム VICS 情報の代わりに予測情報を本手法に適用することで対応することが考えられる。

参考文献

- 1) Yamane, K. et al.: Estimation of Statistical Traffic Data for Navigation Systems, International Journal of ITS Research, Vol.2, No.1, pp.1-9, 2004.
- 2) 山根憲一郎：VICS データを利用した渋滞傾向情報に関する検討，土木計画学研究・講演集，Vol. 29，CD-ROM，2004.
- 3) (財)道路交通情報通信システムセンター (VICS センター)，<http://www.vics.or.jp/>
- 4) (財)道路交通情報通信システムセンター (VICS センター)：VICS の挑戦，(財)道路交通情報通信システムセンター (VICS センター)，1996.
- 5) Yokota, T. et al.: Evaluation of Advanced Mobile Information Systems (AMIS) for Winter Olympic Games in Nagano, JAPAN 1998, In: Proceedings (CD-ROM) of the 5th World Congress on ITS, Seoul, Korea, 1998.
- 6) Yamane, K., Kakuta, M. and Fushiki, T.: Development of VICS with Adaptive Parameter Tuning for Providing Traffic Information, In: Proceedings (CD-ROM) of the 7th World Congress on ITS, Turin, Italy, 2000.
- 7) Nakamura, K., Yamanaka, K., Suzuki, K.: Development of HONDA Navigation System using VICS Information, In: Proceedings (CD-ROM) of the 4th World Congress on ITS, Berlin, Germany, 1997.
- 8) 谷口栄一，嶋本寛：リアルタイム所要時間情報を活用したトラックの動的配車配送計画に関する研究，土木計画学研究・講演集，Vol.26，CD-ROM，2002.
- 9) 山根憲一郎，横田孝義，伏木匠：広域交通情報サービス向け旅行時間推定法，電子情報通信学会論文誌,D-I，Vol.J87-D，pp.329-338，2004.
- 10) 大場義和，上野秀樹，桑原雅夫：磁気式通行券データを利用した高速道路旅行時間演算方法に関する研究，生産研究，Vol.51，No.2，pp9-12，東京大学生産技術研究所，1999.
- 11) 大津展之:判別および最小 2 乗規準に基づく自動しきい値選定法，電子情報通信学会論文誌,D-II，Vol.J63-D，pp.349-356，1980.
- 12) 土木学会編，交通ネットワーク均衡分析－最新の理論と解法－，pp. 133-136，1998.
- 13) Dijkstra, E.W.: A note on two problems in connection with graphs, Numerische Mathematik, Vol.1, pp.269-271, 1959.
- 14) Fushiki, T. et al.: Arrival Time Prediction System Based on Floating Car Data in the Fleet Management ASP, In: Proceedings (CD-ROM) of the 9th World Congress on ITS, Chicago, USA, 2002.
- 15) Wada, K. and Fujii, H.: Research, Development and Field Testing of the Probe Car Information System (II), In: Proceedings (CD-ROM) of the 9th World Congress on ITS, Chicago, USA, 2002.
- 16) 柘植正邦，養父利秀，カーナビゲーションの可能性を広げる新情報提供システム，自動車技術，Vol. 58，No. 2，pp. 44-48，2004.
- 17) Simmons, N., Gates, G., Burr, J.: Commercial Applications Arising From a Floating Vehicle Data System in Europe, In: Proceedings (CD-ROM) of the 9th World Congress on ITS, Chicago, USA, 2002.

- 18) Fushiki, T., et al.: Study on Density of Probe Cars Sufficient for Both Level of Area Coverage and Traffic Information Update Cycle, In: Proceedings (CD-ROM) of the 11th World Congress on ITS, Nagoya, Japan, 2004.
- 19) 警察庁交通局交通規制課, 国土交通省道路局 ITS 推進室: 道路交通情報の提供の在り方に関する基本的考え方, 交通工学, Vol.37, No.3, pp.43-47, 2002.
- 20) 割田博ほか: 統計的手法による所要時間情報提供に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol. 27, CD-ROM, 2003.
- 21) 舟橋賢二ほか: VICS 蓄積データを用いた旅行時間短期予測手法に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol. 27, CD-ROM, 2003.
- 22) 熊谷正俊ほか: 特徴空間射影を用いた交通情報予測手法, 信学技法, Vol. 103, No. 294, 2003.
- 23) 杉山勝広: 高速道路の渋滞予測, 交通工学, Vol. 32 増刊号, pp. 21-26, 1997.

第6章 広域交通流シミュレータを用いた旅行時間の予測

6.1 概説

警察庁は、大規模な災害や事故などが広域に発生した場合において、各都道府県警察の情報を一元管理し迅速な交通対策を実施することを目的として広域交通管制システム¹²⁾を導入し、2001年5月より運用を開始した。その中のサブシステムの一つに交通情報分析システムがあり、統計化された交通情報をもとに総合的な分析や交通にかかわる事象および設定の変化による影響度の分析・予測を実施するものである。

本章では、この交通情報分析システムの中核アプリケーションである広域交通流シミュレータを対象とする。まず、交通情報分析システムの概要を述べるとともにシミュレータの目的と位置付けを明確にし、次に、オンラインで得られる交通管制データを利用したマクロな交通状況の再現について述べる。そして、大規模な災害や事故などの突発事象が発生した場合を想定した交通規制の実施に伴う渋滞の影響予測について述べる。また、実際に災害等が発生した時には迅速な処理が必要であると考えられること、及び渋滞の予測精度が重要となることから、性能評価として処理速度の性能と旅行時間の予測精度について述べる。そして、シミュレーションパラメータの旅行時間予測へ及ぼす特性を把握するために実施するパラメータの感度分析についても述べる。

6.2 広域交通流シミュレータの目的と位置付け

6.2.1 広域交通流シミュレータの目的

広域交通流シミュレータによるシミュレーション機能は、大規模な災害や事故などの際に複数の都道府県を跨るような広域エリアを扱い、日常の交通状況データを基に広域な交通規制を実施した場合の交通流への影響を予測・評価し、迅速かつ適切な迂回路立案支援をすることを目的とするものであり、本研究ではこれらの機能を実現するアルゴリズムを開発することを目的としている。また、特別なコンピュータや複雑な操作を必要とすることなく大規模な災害や事故時の渋滞予測、迂回路選定等の交通対策を迅速に行うことを目的としている。そのため、交通規制条件を設定できる機能、交通規制の交通に及ぼす影響を予測・評価できる機能、及び迂回路を自動探索できる機能を備えていることに加えて、複数の都道府県に跨った広域ネットワークに対しても計算時間が少ない高速シミュレーションモデルが必要である。

6.2.2 広域交通流シミュレータの位置付け

主要なネットワーク対応シミュレーションモデルとの比較を表 6.2.1 に示す。本シミュレータは広域ネットワークを対象とする必要がある。したがって、計算量や調整パラメータの多い離散型（一般にマイクロモデルが多い）は適さない。SOUND や SIPA は比較的計算量を少なくしたマクロモデルを含むため首都高速道路程度のネットワーク規模（一般道路を含まず）には向くが、それでも高性能のワークステーションクラスのコンピュータを必要とする上にネットワークデータの作成作業とパラメータ推定に相当の工数を要するため、上記の目的で

利用するのは現実的ではない。一方、流体型（マクロモデル）の SATURN においては、車線構成や信号パラメータ等の詳細な道路ネットワークモデルが必要（このようなネットワークモデルは現状ほとんど見られないためユーザが作成する必要あり）なこと、広域ネットワークを対象とするには大型計算機相当のコンピュータを必要とすること、現況再現のためのパラメータ調整に相当な経験が必要であることなどから、広域ネットワークに対して容易に対応できない。

以上のように、従来のシミュレーションモデルでは上記の目的には対応できないため、本シミュレーションモデルの開発に至った。

一般のシミュレーションモデルでは交通流を流体または離散モデルとして表現し、交通現象の再現性については実際の交通データに合うように各種パラメータを調整するが、本モデルでは、オンラインで得られる交通管制データをベースとするため特別なモデルを使って交通現象を再現する必要はない。したがって、流体、離散のいずれにも該当せず、交通管制データに基づき K-V（交通密度-速度）関係式など一般に知られる式を利用して計算する数学的モデルに該当する。また、入力データが異なること、それに伴いモデルタイプも異なること、交通管制データが計測されている主要道においてはパラメータ調整の必要がない点など従来モデルとは大きく異なる（図 6.2.1）。しかしながら、交通規制時の渋滞流発生モデルについては交通流を流体モデルで表現しており、したがって本シミュレータは数学型と流体型のハイブリッドモデルということになる。

表 6.2.1 シミュレーションモデルの比較

モデル名	経路選択 行動モデル	タイプ	広域 対応	開発主体	発表年
AVENUE ³⁾⁴⁾	あり	流体 + 離散	困難	東京大、熊谷組ほか	1993
BOX モデル ⁵⁾	あり	流体	やや難	京都大	1991
DEBNetS ⁶⁾	あり	離散	やや難	京都大、オムロン	1998
DYTAM-I ⁷⁾	あり	離散	困難	科警研	1978
Paramics ⁸⁾	あり	離散	困難	Edinburgh 大	1993
SATURN ⁹⁾¹⁰⁾	あり	流体	やや難	Leeds 大(英)	1976
SOUND ¹¹⁾	あり	離散	やや難	東京大	1995
TRAF-NETSIM ¹²⁾	なし	離散	困難	FHWA(米)	1971
AHS 交通シミュ レータ ¹³⁾	なし	離散	困難	東芝、マツダ、日立ほか	1997
Sakura ¹⁴⁾	あり	離散	困難	京都大、ニュージェック	2002
SIPA ¹⁵⁾	あり	離散	やや難	国土交通省、日立、東京大	2001
TRAFFICSS ¹⁶⁾¹⁷⁾	なし	離散	困難	日立	2000
本モデル	あり	数学 + 流体	容易	日立	—

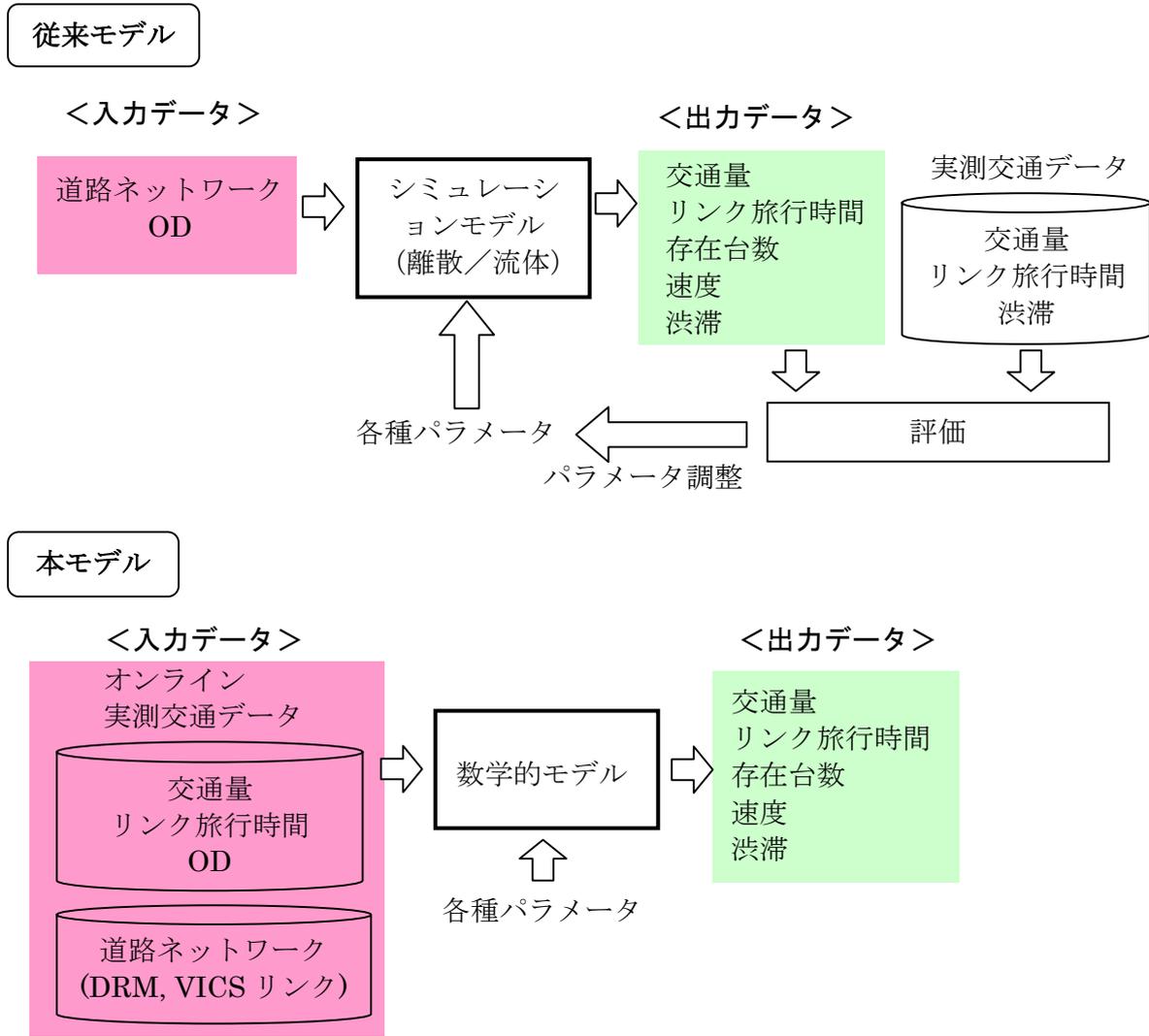


図 6.2.1 交通現象再現に関する従来モデルと本モデルとの比較

6.3 交通管制データを用いた交通状況の再現

広域交通管制システムのサブシステムの一つである交通情報DB収集装置に対して対象エリア（都道府県単位）及び対象日時（あるいは曜日など）を指定すると、単位時間で統計処理された次のデータを手に入る。

- ・ リンク交通量
- ・ リンク旅行時間
- ・ OD 交通量

上記データによって、そのリンクの交通状態の概況を再現することは可能であるが、シミュレーション対象エリアに含まれる全てのリンクに対して交通情報が入手できるわけではない。そこで、情報が入手できないリンクに対して交通状況を再現する必要があるが、ここでは道路種別単位にパラメータ調整を行うことにより設定する方法について述べる。

具体的には表 6.3.1 に示すパラメータを設定することにより調整する。各パラメータは、ユーザが予め設定する市街地、市街地外のリンクそれぞれに対して設定できるものである。

以下、パラメータの各項目について説明する。

表 6.3.1 パラメータ設定項目

交通容量	
時間変動パターン	交通量
	速度
交通規制	規制率

(1)交通容量

ここで設定される交通容量は、道路の基本的な交通処理能力をあらわす基本交通容量 C_B (単位は $\text{pcu/H}\cdot\text{車線}$) として定義し、道路種別毎に設定可能である。しかし、実際には道路環境によって変化するため、次式で表される可能交通容量 C_L ($\text{pcu/H}\cdot\text{車線}$) として内部計算される¹⁸⁾。

$$C_L = C_B \cdot \gamma_L \cdot \gamma_C \cdot \gamma_I \cdots \quad (6.3.1)$$

ここに、 γ_L , γ_C , γ_I はそれぞれ車線幅員, 側方余裕, 沿道状況 (市街化の程度) に関わる補正係数であり、他にも勾配, 大型車, 道路線形等に関わる補正係数もあり、いずれも 1.0 以下の数値である。しかしながら、実際に全ての道路に関するこれらの係数を算出するのは困難であるので、ここでは地図データ (DRM) にデータが含まれている車線幅員に関わる補正係数 γ_L とユーザが設定した市街地に対して沿道状況に関わる補正係数 γ_I として文献¹⁹⁾を参考に設定し、他の補正係数についてはデータの入手性等の問題から扱わない。交通量を算出するシミュレーションでは、この可能交通容量 C_L に車線数及び後述の時間変動パターンで設定される補正率を掛けてリンク交通量 (台/H) として計算する。

(2)時間変動パターン

一車線当たりの交通量 Q 及び旅行速度 V を、それぞれ可能交通容量 C_L と規制速度 V_r から次式にて計算する際に使用されるものであり、パラメータ a_q, b_q, a_v, b_v で表される。

$$Q(t) = a_q(t) \cdot C_L + b_q(t) \quad (6.3.2)$$

$$V(t) = a_v(t) \cdot V_r + b_v(t) \quad (6.3.3)$$

各パラメータは時間帯ごとに設定され、実際には同一メッシュの同一路種別ごとに、入手できた交通情報をもとに最小二乗法によって求められるものである。ある場所において求められた典型的なパラメータに基づく時間変動パターンの例を図 6.3.1 に示す。

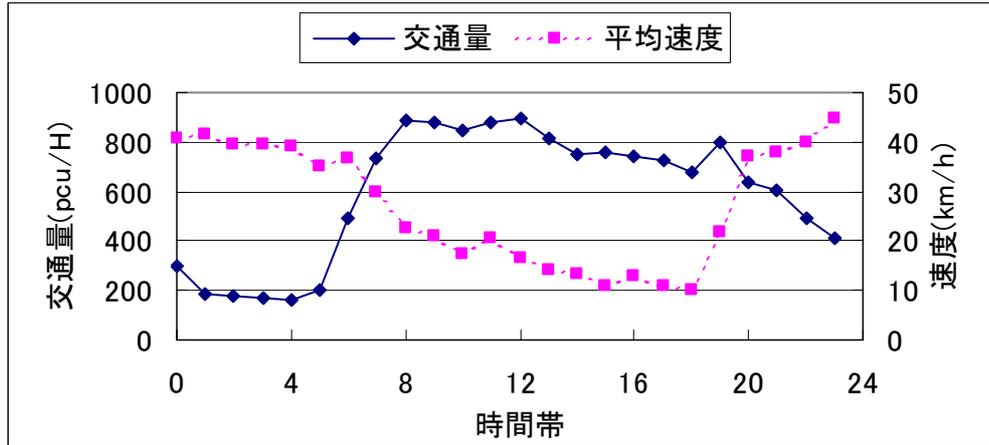


図 6.3.1 時間変動パターンの例

(3) 規制率

規制率は、設定した規制領域内のリンクの各車線に対して規制を実施する割合を意味し、0～1の値をとる。例えば、規制率 0.8 の場合には、交通容量の 80% が規制をかけられたことになり、したがって交通容量は元の可能交通容量 C_L の 20% になることを意味する。

規制をかけると通常時よりも交通容量が減るために、その規制地点をボトルネックとして渋滞が発生しやすくなる。この規制実施時の渋滞発生モデルについては次節で説明する。

6.4 交通規制実施時の旅行時間予測

シミュレーション対象の全リンクに関する旅行時間（旅行速度）及び渋滞を、ユーザが設定したパラメータと交通統計データより算出する。規制をかけた場合のシミュレーションとしては、規制領域・規制リンクの交通がその周囲に染み出して渋滞が広がる現象を計算により再現する。次に、詳細な処理内容について説明する。

6.4.1 初期値の設定

まず、全ての評価対象リンクにおける旅行速度に関して、式(6.3.3)を用いて旅行速度初期値 $VD_i(t)$ を求める。 i はリンク番号、 t は時間帯である。次に、リンク長 L_i を使って、次式により旅行時間初期値 $TD_i(t)$ を求める。

$$TD_i(t) = \frac{L_i}{VD_i(t)} \quad (6.4.1)$$

さらに、予め設定された渋滞判定しきい値 I (都市間高速道路, 都市内高速道路の時は 40km/h、一般道路, その他の時は 20km/h) と旅行速度初期値 $VD_i(t)$ とを比較することにより、渋滞度初期値 $DD_i(t)$ 及び渋滞長初期値 $JD_i(t)$ を求める。

$$VD_i(t) < I \text{ の時、} DD_i(t) = 1 \text{ (渋滞), } JD_i(t) = L_i \quad (6.4.2)$$

$$\text{上記以外の時、} DD_i(t) = 0 \text{ (平常), } JD_i(t) = 0 \quad (6.4.3)$$

6.4.2 統計交通データの利用

統計リンク旅行時間を読み込み、評価対象リンクに対応付け、データが得られたリンクについてのみ、リンク旅行時間を統計旅行時間に置き換える。そして、リンク旅行時間が置き換えられたリンクについてのみ、リンク長 L_i を使って旅行速度 $V_i(t)$ を求め、その旅行速度 $V_i(t)$ と渋滞判定しきい値 I から渋滞度 $D_i(t)$ 及び渋滞長 $J_i(t)$ を初期値と同様の方法で求め、求めた値で置き換える。

後述する「規制入力」による入力がない場合は、上記処理によって交通状況の再現を行ったことになる。規制入力がある場合は、続いて以下の処理を実行する。

6.4.3 交通規制時の処理

(1) 存在台数の算出

全評価対象リンク（規制対象リンクを含む）について、すでに求まっている交通量 $Q_i(t)$ 、速度 $V_i(t)$ 、及びリンク長 L_i から、次式により存在台数 $E_i(t)$ を求める。

$$E_i(t) = \frac{Q_i \cdot L_i}{V_i(t)} \quad (6.4.4)$$

ここに、交通量 $Q_i(t)$ は車線数分を考慮した値である。ただし、交通密度 $K_i(t) = Q_i(t)/V_i(t)$ が予め定める飽和交通密度 k_j を超えた場合には次式で求める。

$$E_i(t) = k_j \cdot L_i \cdot m_i \quad (6.4.5)$$

ここに、 m_i は車線数である。

(2) OD 情報に関する処理

区間旅行時間を算出することと、迂回交通量計算に利用することを目的として OD 情報を利用する。この OD 情報は、光ビーコン対応車載機からのアップリンクを集計して得られた OD 交通量及び OD 区間の定義情報から構成される。区間旅行時間の算出対象として、OD 区間に関する定義情報（始点リンク、終点リンク、経由リンク）を利用する。OD の経路については、上記の定義情報に基づき最短経路探索（リンクコストは規制速度を用いたリンク旅行時間とする）による出力とした。また、規制時のシミュレーションにおいては OD 交通量データを次のように利用する。

規制エリアを通行予定の OD 経路に関しては、図 6.4.1 に示すような迂回路計算を行い元の通行予定経路上の交通（存在台数）から OD 交通量に相当する分を減算し、迂回経路上の交通に対して加算する。具体的な処理の手順を図 6.4.2 のフローチャートに示す。

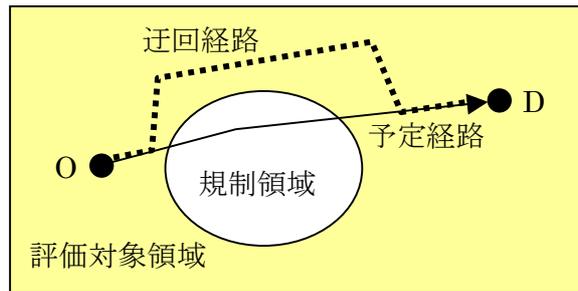


図 6.4.1 迂回行動予測のイメージ

[Step1] OD 区間定義情報をもとに、リンクコストを規制情報として最短経路を算出する。

[Step2] Step1 で求めた経路を構成するリンクのうち、始点または終点リンクの一方でも、ユーザが設定した規制対象リンクに該当していれば、この OD 交通量に関して影響はないとみなし処理を終了するが、そうでなければ次のステップへ進む。

[Step3] Step1 で求めた経路を構成する始点・終点リンク以外のリンクのうち、ユーザが設定した規制対象リンクに該当するものが含まれていれば次のステップへ進むが、そうでなければ OD 交通量に関して影響はないとみなし処理を終了する。

[Step4] 規制対象リンクのコストを最大値に設定して、Step1 と同様の経路計算を行うことにより迂回路を算出する。

[Step5] Step1 で求めた元の走行予定経路上の存在台数から OD 交通量に相当する存在台数分を減算し、迂回経路上の交通に対して加算する。

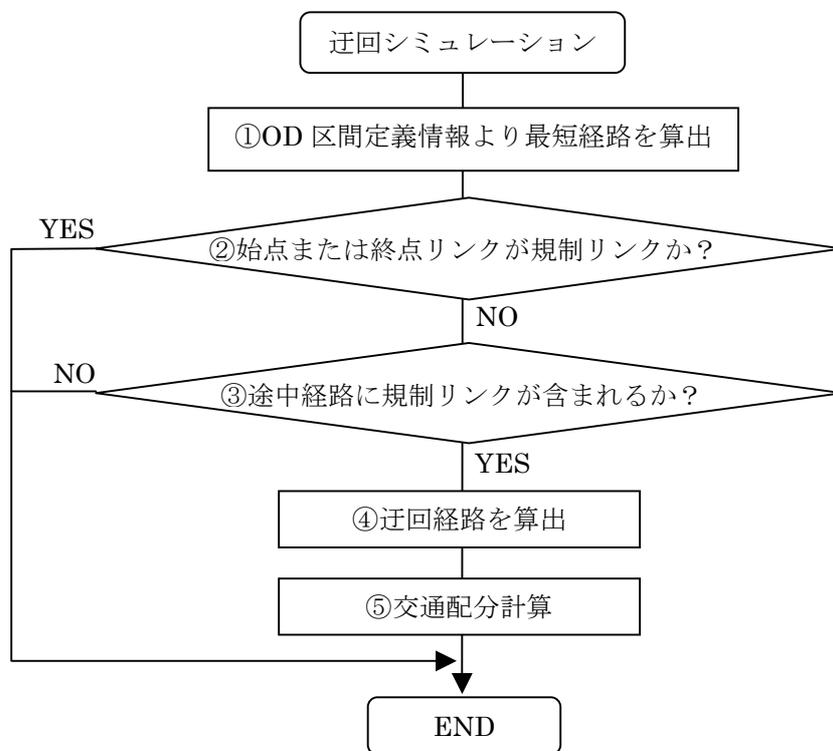


図 6.4.2 OD 交通量を用いた迂回行動予測処理のフローチャート

(3) 規制領域からの流出処理

交通規制により、本来ならその領域に流入する交通量（交通需要）が流入できなくなり、その周辺に流出する状況を計算する。ユーザに設定された「規制率（表 6.3.1）」と規制領域内交通量 $QR(t)$ をもとに、存在台数に関して規制領域からの流出計算を行う。処理の内容について図 6.4.3 を用いて説明する。

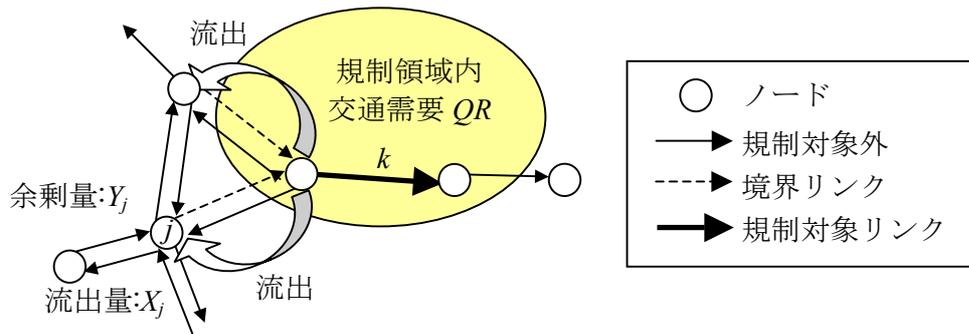


図 6.4.3 交通流出の概念図

まず、規制領域への単位時間当たりの交通需要（以下、単に交通需要と記す）を求める。この交通需要は、規制対象リンクに流入する全ての規制対象ではないリンク j （以下、境界リンクと記す）の交通量 $Q_j(t)$ の総和に相当するとみなす。ここで、規制対象リンクが例えば 1 本であった場合においては、その規制領域への交通需要はその規制対象リンク k の交通量 $Q_k(t)$ とした方がよいと考えられるが、本シミュレーションにおいては複数の規制対象リンクを扱うために、上記のように境界リンクの交通量で近似する。

そして、この規制領域への交通需要が流出する先のリンクは規制対象リンク k の上流側に流入する境界リンクとし、交通需要をその全ての境界リンクに配分する。交通需要の配分比は各境界リンクの交通量 $Q_j(t)$ の比に等しいとする。実際の計算においては、規制率 c を考慮するため、次式にて境界リンク j に流出する交通量（流出交通量） $X_j(t)$ を求める。

$$X_j(t) = \sum_j Q_j(t) \cdot c \cdot \frac{Q_j(t)}{\sum_j Q_j(t)} = c \cdot Q_j(t) \quad (6.4.6)$$

一方、境界リンク j の存在台数最大値 $E \max_j$ を次式で定義する。

$$E \max_j = k_j \cdot L_j \cdot m_j \quad (6.4.7)$$

ここに、 k_j は飽和交通密度、 L_j はリンク j の長さ、 m_j はリンク j の車線数である。そこで、境界リンク j への流出交通量 $X_j(t)$ 、及び存在台数 $E_j(t)$ と存在台数最大値 $E \max_j$ の関係が、

$$E_j(t) + X_j(t) - Z_j > E \max_j \quad (6.4.8)$$

であれば、境界リンク j だけでは捌ききれず、次式で表す余剰交通量 $Y_j(t)$ が生成される。

$$Y_j(t) = E_j(t) + X_j(t) - Z_j - E \max_j \quad (6.4.9)$$

ただし、 Z_j は後述の最低速度 V_0 で走行する場合に捌かれる交通量(台/H)である。余剰交通量 $Y_j(t)$ が発生した場合には、その境界リンク j の上流側に流入しかつ規制対象外のリンクに対してその余剰交通量を流出させる。流出させる余剰交通量の配分比は、同様に対象流出先の交通量の比に等しいとする。ただし、予め交差点右左折率が計測されている場合にはその値を元に配分して流出させる。

シミュレーション時間 t において、以上の処理を余剰交通量 $Y_j(t)$ がゼロになるまで繰り返し、渋滞が延伸する様子を再現する。

また、規制対象リンク i の存在台数 $E_i'(t)$ は、

$$E_i' = (1 - c) \cdot E_i(t) \quad (6.4.10)$$

で修正される。ここに、 $E_i(t)$ は規制前の規制対象リンク i の存在台数である。

(4) 交通規制時の各交通指標の算出

まず、存在台数 $E_i(t)$ とリンク長 L_i から、次式によって交通密度 $K_i(t)$ を求める。

$$K_i(t) = \frac{E_i(t)}{L_i} \quad (6.4.11)$$

ただし、 $K_i(t) > k_j$ の時は、 $K_i(t) = k_j$ とする。

次に、図 6.4.4 に示す K-V の関係式 (Greenshields¹⁹⁾ を修正) を用いて、旅行速度 $V_i(t)$ を求める。ここに、 V_f は最高速度であるが、ここでは交通管制データを用いるため規制速度としている。また、 V_0 は予め定める最低速度、 k_j は飽和交通密度である。

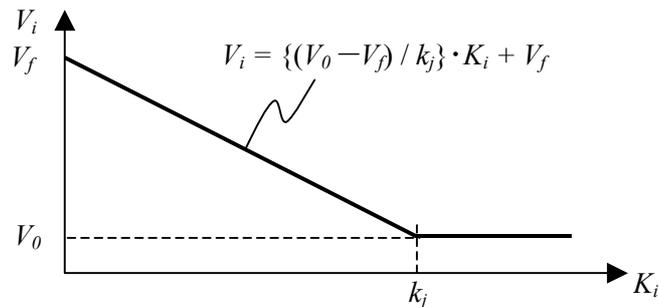


図 6.4.4 K-V の関係 (Greenshields の修正)

上記のようにして求めた旅行速度 $V_i(t)$ に基づき、6.4.1(1)に記載した初期値の設定と同様の方法により、旅行時間 $T_i(t)$ 、渋滞度 $D_i(t)$ 、及び渋滞長 $J_i(t)$ を算出する。また、次式に基づき交通量 $Q_i(t)$ も求める。

$$Q_i(t) = K_i(t) \cdot V_i(t) \quad (6.4.12)$$

(5) 次の時刻への捌け残りの処理

境界リンク j 、時刻 t における捌け残り台数 $\Delta E_j(t)$ を、次式のように流出交通量 $X_j(t)$ から最

低速度 V_0 で走行する場合に捌かれる交通量 Z_j を減算したものとする。

$$\Delta E_j(t) = X_j(t) - Z_j \quad (6.4.13)$$

この $\Delta E_j(t)$ のうち、次の時刻 $(t+1)$ まで残る捌け残り台数 $\Delta E_j(t+1)$ は、規制率 c を用いて次式で表される。

$$\Delta E_j(t+1) = c \cdot \Delta E_j(t) \quad (6.4.14)$$

そして、次式に表すように、時刻 $(t+1)$ においてこの $\Delta E_j(t+1)$ を式(6.4.4)の存在台数 $E_j(t+1)$ に加えることによって、修正された存在台数 $E_j'(t+1)$ を得る。

$$E_j'(t+1) = E_j(t+1) + \Delta E_j(t+1) \quad (6.4.15)$$

この $E_j'(t+1)$ が境界リンク j の存在台数最大値 E_{\max_j} を超えた場合には、次式で表される差分 $Y_{ej}(t+1)$ を次の上流側リンクへ流出させる。

$$Y_{ej}(t+1) = E_j'(t+1) - E_{\max_j} \quad (6.4.16)$$

そして、この $Y_{ej}(t+1)$ がゼロになるまで上流リンクへの流出を繰り返す。

なお、規制リンクからの流出交通量は規制時間帯においてのみ発生し、時刻捌け残りの処理は規制開始時以降全ての捌け残り台数 ΔE_j がゼロとなるまで実施する。

(6) 規制終了後の処理

本研究のモデルにおいては、交通規制時における渋滞の延伸現象を表現できるが、規制終了後における交通流の回復現象を的確には表現できない。なぜなら、規制終了後すぐに規制率がゼロになると式(6.4.6)の流出交通量 X_j がゼロになるため、わずかな時間経過後に捌け残り台数 ΔE_j がなくなり、通常通りの交通状況（統計的な交通状況）に戻る。しかし、実際には規制が解除されても急に渋滞が解消することはなく、ある程度の時間経過後に規制の影響がなくなる。そこで、本モデルを用いて交通流の回復現象を再現するため、図 6.4.5 に示すように、規制終了後の規制率を規制終了直後の c から規制影響時間 T_c 経過後にゼロになるように変化させることによって交通容量を擬似的に変化させる。この T_c は、ユーザが設定するパラメータである。

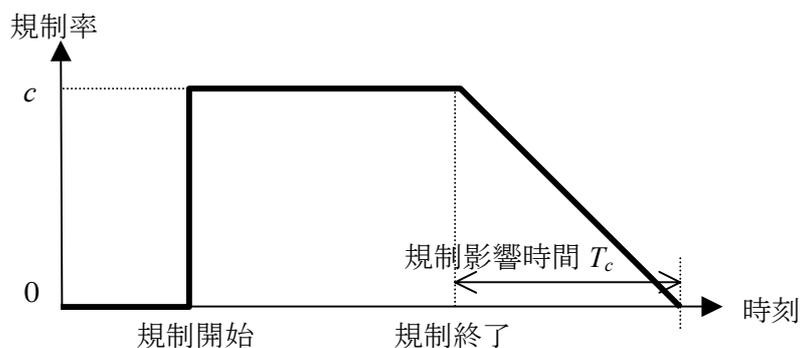


図 6.4.5 規制率の変化

以上のような流体モデルにより、交通規制を実施した場合の交通状況を迅速に予測することができるようになる。

6.5 性能評価

6.5.1 広域シミュレーションの事例

警察庁広域交通対策室における実際の利用を想定していくつかのエリアを対象に実行し、シミュレーションの処理時間や規制時の渋滞予測及び迂回路探索などの性能評価を行った。シミュレーションを実行した PC の性能及び環境等は次の通りである。

CPU: Intel Pentium III 700MHz

Memory: PC100 SDRAM 384MB

HDD: UltraATA100(7,200rpm) 40GB

OS: Microsoft Windows2000 Professional

実行環境: Microsoft Visual C++ 6.0 デバッグモード

タイムインターバル: 1 時間ごと

次の2つの想定事例についてシミュレーションした結果を示す。

(1) 静岡・愛知県における東海大地震の想定

表 6.5.1 静岡・愛知県における評価結果

評価領域(東西×南北)	90km×60km
対象リンク数	4832
1日分の処理時間	47 秒



図 6.5.1 静岡・愛知県における評価結果 (左：渋滞表示, 右：浜松→岡崎の迂回路)

(2) 神奈川県川崎市における避難訓練の想定

表 6.5.2 神奈川県川崎市における評価結果

評価領域(東西×南北)	10km×10km
対象リンク数	979
1日分の処理時間	28秒

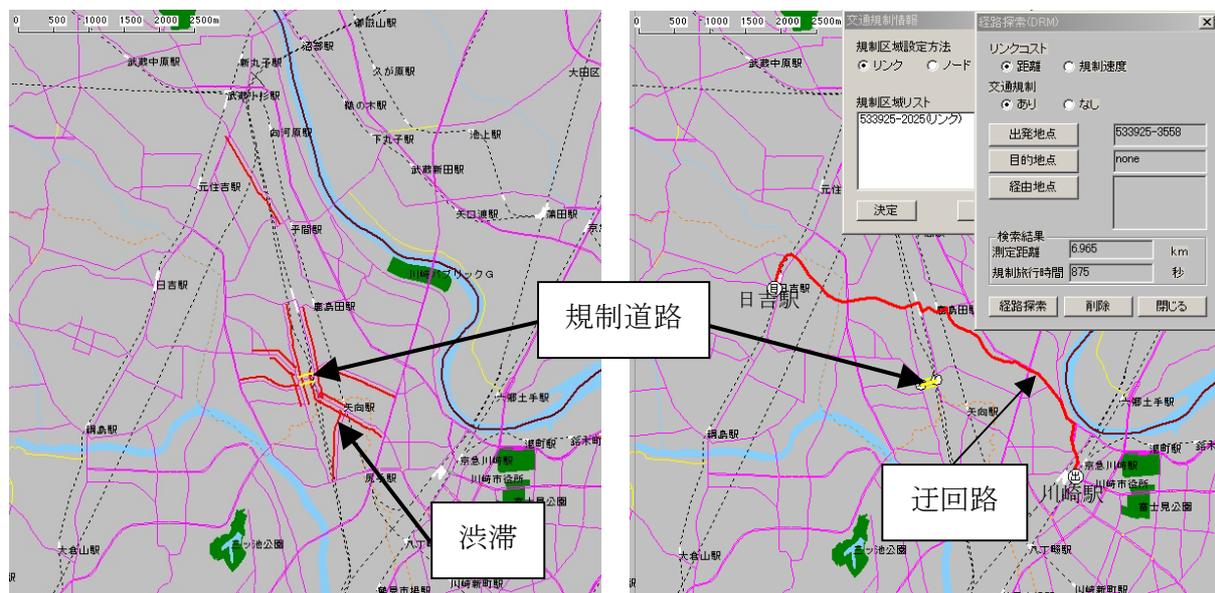


図 6.5.2 神奈川県川崎市における評価結果 (左：渋滞表示, 右：川崎駅→日吉駅の迂回路)

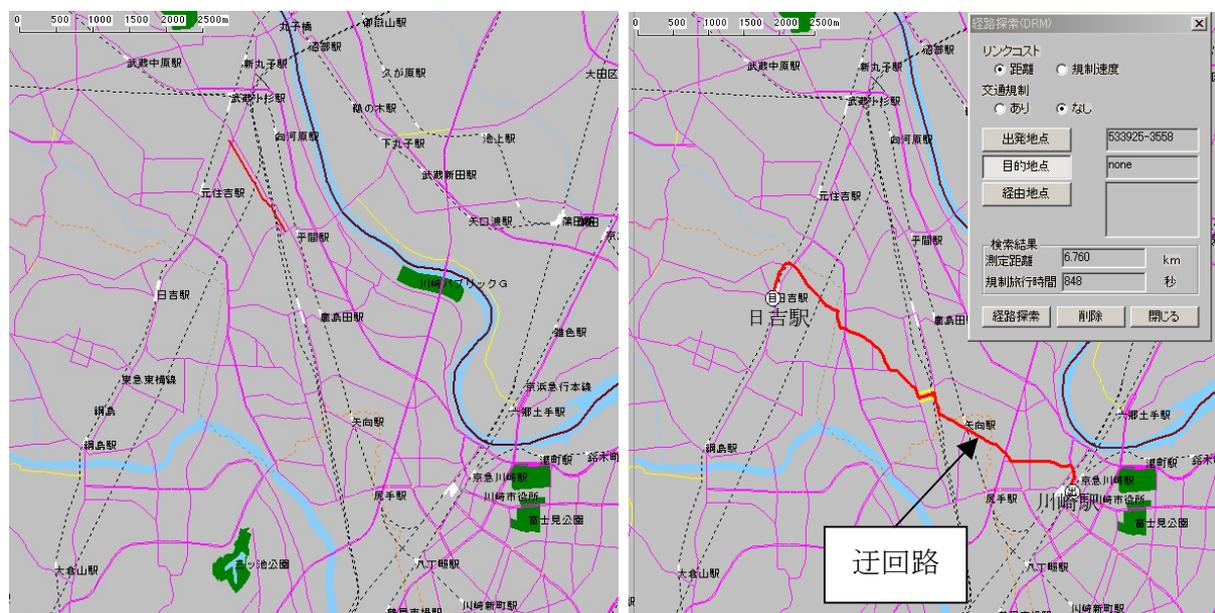


図 6.5.3 交通規制を実施しない場合の評価結果 (左：渋滞表示, 右：川崎駅→日吉駅の経路)

上記事例は比較的狭いエリア（神奈川県川崎市の事例）と広いエリア（静岡県・愛知県の実例）を対象としているが、いずれも処理時間は1分以内と高速処理ができています。なお、処理時間の約8割は結果を画像出力するのに要しており、処理計算自体はごくわずかな処理時

間で終了している。従来の交通流シミュレータであれば、実データを使わずに車両個々あるいは車群の細かい挙動を表現することによって交通状況を再現しているため、特に広域エリアを対象とした場合には数時間以上を要するとともに通常のパソコンでは扱うことが困難なほどの情報量を必要とし、またシミュレーション条件の設定項目が多岐にわたり相当の工数を要するなど、広域交通シミュレータに求められた「特別なコンピュータや複雑な操作を必要とすることなく大規模な災害や事故が発生した時の渋滞予測、迂回路選定等の交通対策を迅速に行う」という要求に対応することはできないが、本交通流シミュレータでは対応可能となった。

6.5.2 交通規制実施時における予測旅行時間の評価

次に、実際の道路での事故発生に伴う交通規制実施時を対象として、本シミュレータによる交通状況予測の再現性を評価した。対象区間は、阪神高速道路3号神戸線下り（深江入口(21.4KP)→柳原出口(33.8KP)）の約12.4kmの区間である。この対象区間の内部で発生した交通事故に伴う交通規制を対象とする。なお、本シミュレーションにおいては、交通量と事故データとして阪神高速道路公団のデータウェアハウス²⁰⁾のデータ、リンク旅行時間のデータとしてVICS情報をそれぞれ用いた。

(1)モデルケースでの交通状況予測

ある事故規制をモデルケースとして交通状況予測の再現性を検討する。対象日時は、2005年2月25日（金）の8:00AM～9:50AMである。事故の発生及び当事故に伴う交通規制の概況を表6.5.3に示す。

表 6.5.3 事故及び交通規制の概況（モデルケース）

事故発生日時	2005年2月25日（金）8:20AM
発生場所	3号神戸線下り 27.9KP（摩耶入口付近）
事故形態	走行車両への追突
交通規制	1車線通行制限
事故処理開始～終了時刻	8:40AM～9:10AM

シミュレーションで設定した主なパラメータを表6.5.4に示し、シミュレーションの結果より求められた対象区間の旅行時間予測結果を図6.5.4及び表6.5.5に示す。この結果より、事故に伴う交通規制の影響を良好に再現できていることがわかる。ただし、この結果については、表6.5.3に示した事故規制の情報を参照しながらできるだけ真値に合うようにパラメータを調整したことによる。また、規制影響時間 T_c を含めた交通規制のシミュレーション対象である8:35AM～9:40AM以外の時間帯における再現性については、統計旅行時間に依存しており、8:30AM以前は再現性が良好であるが9:40AM以降はやや悪くなっている。

表 6.5.4 シミュレーションのパラメータ (モデルケース)

交通容量	2000 (台/H・車線)
タイムインターバル	5 (分)
規制率 c	0.6
規制開始～終了時刻	8:35AM～9:10AM
規制影響時間 T_c	30 (分)

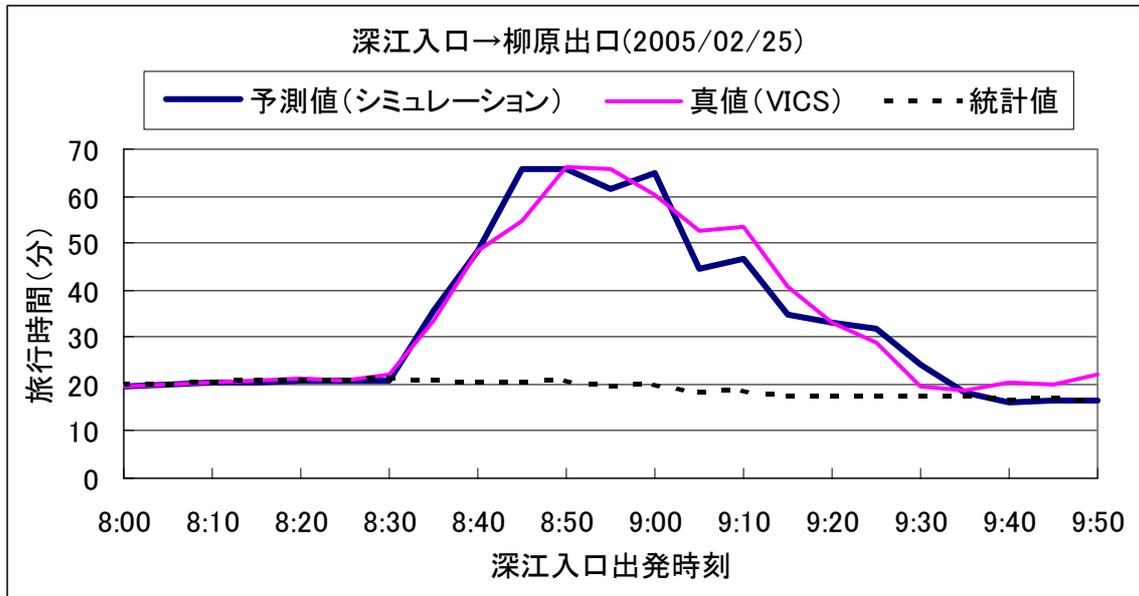


図 6.5.4 シミュレーションによる旅行時間予測結果 (モデルケース)

表 6.5.5 シミュレーションによる旅行時間予測の評価 (モデルケース)

データ数	23
平均絶対誤差率	8.3%
RMS 誤差率	11.7%

(2)別ケースでの交通状況予測

次に、別の事故規制のケース (表 6.5.6) において、上記モデルケースで決定した表 6.5.4 のパラメータのうち、規制開始～終了時刻以外を適用してシミュレーションを実行した。パラメータを表 6.5.7 に示す。対象区間の旅行時間予測結果を図 6.5.5 及び表 6.5.8 に示す。結果をみればわかるように、予測誤差はモデルケースよりやや悪いが比較的傾向を捉えており、統計値に比べて良好と言える。ピーク付近においてやや誤差があるが、これは規制率 c がもう少し小さければ再現性がよくなると考えられる。また、モデルケースに比べて予測旅行時間のピーク値が半分近くになっているのは、交通規制の実施時間帯がモデルケースとは異なり交通需要がモデルケースに比べて少ないためと考えられる。

表 6.5.6 事故及び交通規制の概況（別ケース）

事故発生日時	2005年3月16日（水）10:05AM
発生場所	3号神戸線下り 23.8KP（魚崎入口付近）
事故形態	多重追突
交通規制	1車線通行制限
事故処理開始～終了時刻	10:13AM～11:05AM

表 6.5.7 シミュレーションのパラメータ（別ケース）

交通容量	2000（台/H・車線）
タイムインターバル	5（分）
規制率 c	0.6
規制開始～終了時刻	10:15AM～11:05AM
規制影響時間 T_c	30（分）

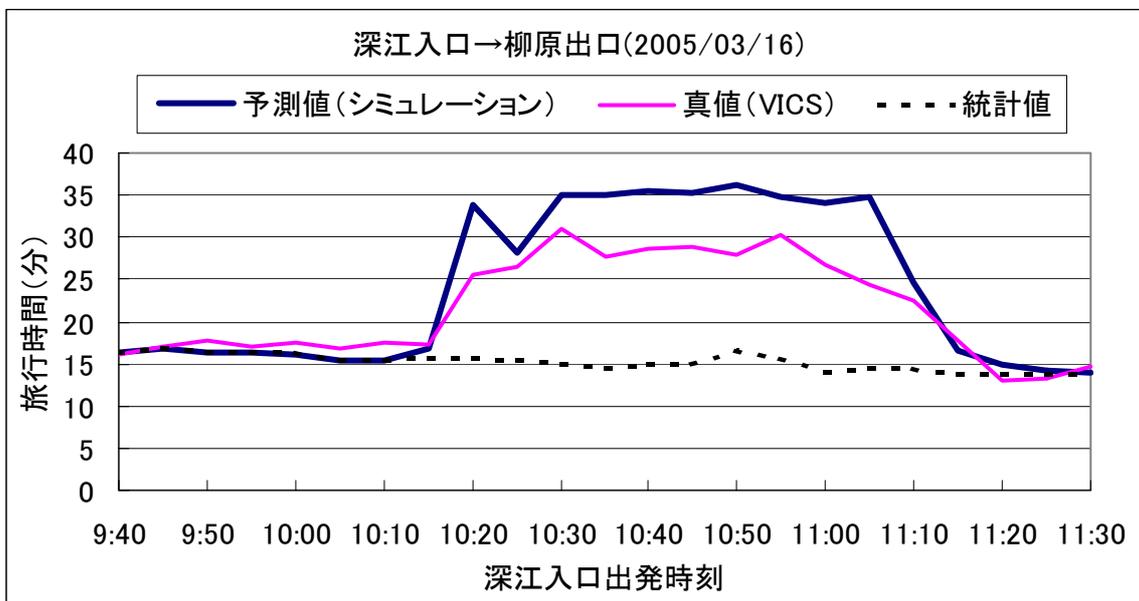


図 6.5.5 シミュレーションによる旅行時間予測結果（別ケース）

表 6.5.8 シミュレーションによる旅行時間予測の評価（別ケース）

データ数	23
平均絶対誤差率	14.1%
RMS 誤差率	18.0%

6.5.3 パラメータの感度分析

次に、パラメータが交通状況予測へ及ぼす特性を把握するため、上記モデルケースを対象にいくつかのパラメータを変更することにより、旅行時間予測がどのように変化するかを見る。変化させるパラメータは規制率 c 、規制影響時間 T_c 、及び規制時間とする。

(1) 規制率 c の感度分析

モデルケースにおいて、表 6.5.4 のパラメータをベースとして、規制の強さを表す規制率 c のみを変化させた場合の旅行時間予測結果を図 6.5.6 に示す。この結果より、規制率 c は渋滞立ち上がりの傾き、ピーク値、渋滞継続時間、渋滞解消の傾きなどに影響し、規制の強さが大きくなれば（すなわち c が大きくなれば）発生する渋滞がより激しくかつ長時間にわたり継続することがわかる。なお、 $c=0.6$ と $c=0.9$ でピーク値が同等なのは、ボトルネック地点から出発地点（深江入口）までの渋滞流がいずれの場合においても飽和状態に達しているためと考えられる。

(2) 規制影響時間 T_c の感度分析

モデルケースにおいて、表 6.5.4 のパラメータをベースに規制影響時間 T_c のみを変化させた場合の旅行時間予測結果を図 6.5.7 に示す。この結果より、規制影響時間 T_c は渋滞立ち上がりの傾き、ピーク値、渋滞継続時間にはほとんど影響がなく、渋滞解消の傾きに影響し、規制影響時間が大きくなれば渋滞解消まで長時間を要することがわかる。

(3) 規制時間の感度分析

モデルケースにおいて、表 6.5.4 のパラメータをベースに規制時間のみを変化させた場合の旅行時間予測結果を図 6.5.8 に示す。規制時間は、規制開始時刻を 8:35AM で固定した上で規制終了時刻を変化させることにより、20 分間、35 分間（モデルケース）、50 分間にそれぞれ変化させた。この結果より、規制時間が長いほど総渋滞時間が長くなることがわかる。したがって、交通規制はできるだけ短時間で終了させることが重要である。なお、50 分間規制において 9:15AM 前後に一時的に渋滞が緩和されたのは、統計で示される交通需要がこの時間帯で減っているためと考えられる。

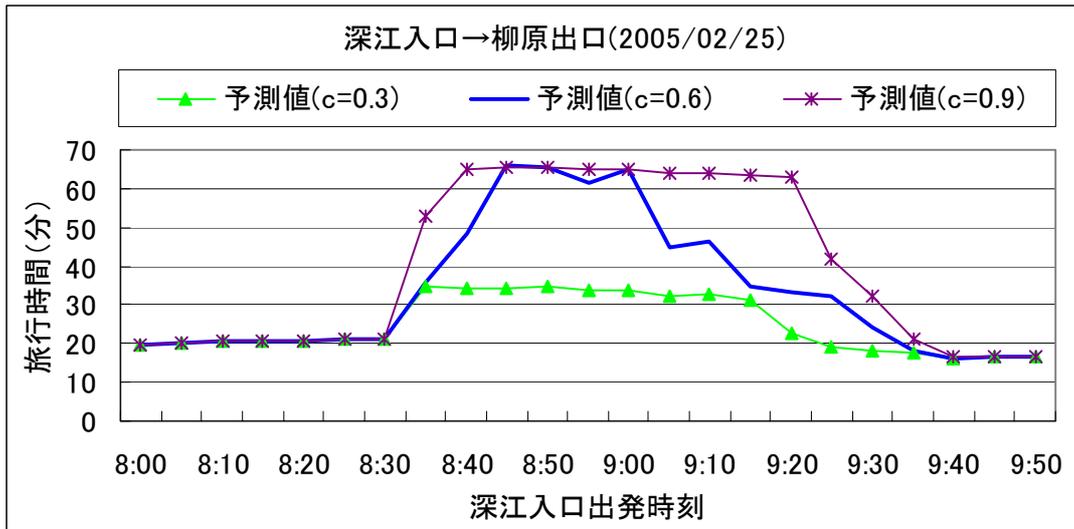


図 6.5.6 規制率 c を変化させた場合の旅行時間予測結果 (モデルケース)

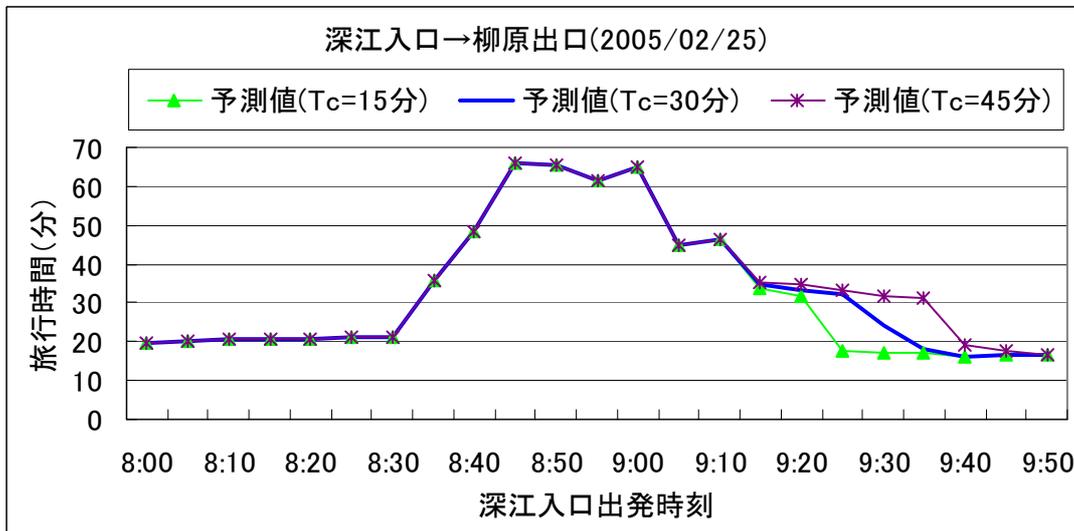


図 6.5.7 規制影響時間 T_c を変化させた場合の旅行時間予測結果 (モデルケース)

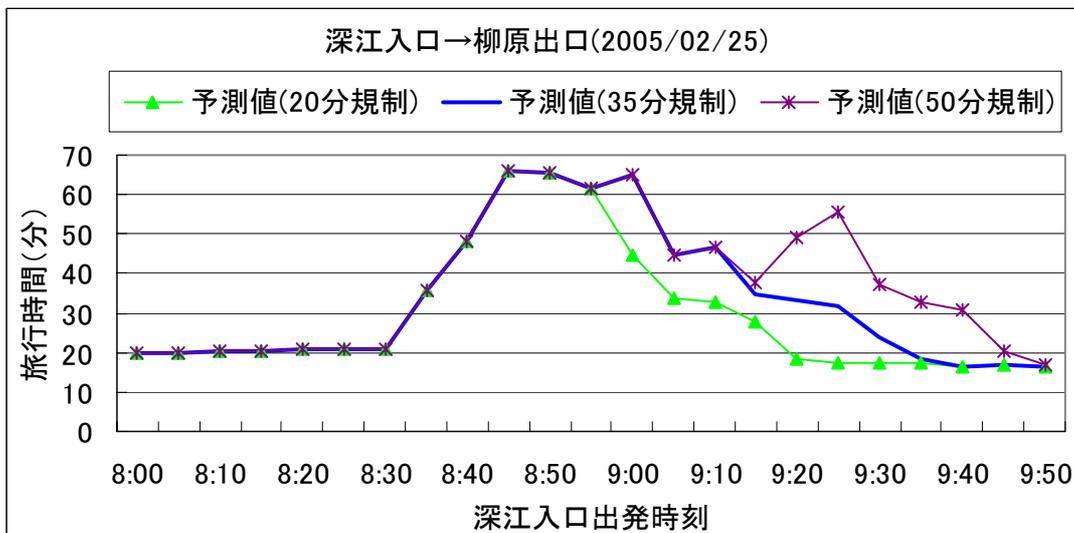


図 6.5.8 規制時間を変化させた場合の旅行時間予測結果 (モデルケース)

6.6 まとめ

本章では、大規模な災害や事故などが広域に発生した場合における迅速な交通対策の支援ツールを整備することを目的とした広域交通流シミュレータについて述べた。はじめに、既存のシミュレータと比較することにより本シミュレータの目的と位置付けを明確にした。次に、オンラインで得られる交通管制データを利用したマクロな交通状況の再現について述べた。そして、災害や事故が発生した時に交通規制を実施すると交通流がボトルネックから上流に向かって渋滞が延伸していく様子を表現する流体モデルについて述べた。

また、本シミュレータの性能評価として、実際の道路ネットワークデータを用いた速度性能と旅行時間の予測精度についても述べた。速度性能については、市レベルの狭域エリアから都道府県を跨った広域エリアまでのいずれにおいても1分以内に高速処理できたことから、大規模な災害や事故が発生した時における迅速な交通対策の実施を支援するツールとして有効であることを確認した。予測精度については、阪神高速道路3号神戸線下り（深江入口(21.4KP)→柳原出口(33.8KP)）を対象に、ある事故規制をモデルケースとして交通流を再現するようにパラメータを調整した上で、別の事故規制に適用して旅行時間予測を実施した。渋滞のピーク付近にやや誤差が見られたが比較的傾向を捉えており、統計値に比べても予測精度は良好であることを確認した。

また、本シミュレータにおいて主要なパラメータである規制率、規制影響時間、及び規制時間がそれぞれ旅行時間予測へ及ぼす特性を把握するために実施したパラメータの感度分析についても述べた。規制率は渋滞立ち上がりの傾き、ピーク値、渋滞継続時間、渋滞解消の傾きなどの多くの要素に影響し、規制影響時間は渋滞の解消の傾きにのみ影響し、規制時間は総渋滞時間に影響することをそれぞれ確認した。

本シミュレータは、災害や事故が発生した時の交通規制施策の立案支援だけでなく、高速バスや空港リムジンバスなどにおいて、事故発生時における迂回行動検討の支援ツールとしても利用可能と考えられる。

今回の対象路線は阪神高速道路3号神戸線下りの一区間(単路部)に限定して評価したが、今後はネットワークに適用していくため、経路選択行動モデルを組み入れることによって実用性をさらに向上させることが課題である。また、交通規制終了後における交通流回復現象の再現のため、より高精度なモデルを検討することも課題である。

参考文献

- 1) 警察庁交通局交通規制課：広域交通管制システムの概要，UTMS No. 11，(社)新交通管理システム協会，pp.3-7，2001-8.
- 2) 川里隆ほか：広域交通管制システム，Matsushita Technical Journal，Vol.47，No.5，pp.55-59，2001.
- 3) Horiguchi, R. et al.: A Network Simulation Model for Impact Studies of Traffic Management ‘AVENUE-ver.2’, In: Proceedings (CD-ROM) of the 3rd World Congress on ITS, Orlando, USA, 1996.
- 4) 堀口良太ほか：都市街路網の交通流シミュレータ -AVENUE- の開発，第13回交通工学研究発表会論文集，pp.33-36，1993.
- 5) 飯田恭敬ほか：渋滞の延伸を考慮した動的交通流シミュレーション，土木計画学研究講演集，No.14(1)，pp.301-308，1991.
- 6) 藤井聡ほか：Event-Based Approach に基づく簡便なマイクロ交通流シミュレーションの開発：生活行動と動的交通流を考慮した実用的な交通政策評価手法の構築を目指して，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集第4部，pp.694-695，1998.
- 7) 木戸伴雄，池之上慶一郎，斉藤威：街路網における経路探索・交通配分モデル(DYTAM-1)，科学警察研究所報告交通編 19巻1号，1978.
- 8) Cameron, G. et al.: PARAMICS - Moving Vehicles on the Connection Machine, IEEE Conference, 1994.
- 9) Hall, M.D. et al.: SATURN -A Simulation-Assignment Model for the Evaluation of Traffic Management Schemes, Traffic Engineering and Control 21, pp.168-176, 1980.
- 10) (社)交通工学研究会 編：交通信号の手引，pp.125-127，1994.
- 11) 吉井稔雄，桑原雅夫，森田綽之：都市内高速道路における過飽和ネットワークシミュレーションモデルの開発，交通工学，Vol.30，No.1，1995.
- 12) Rathi, A.K. et al.: “Urban Network Simulation: TRAF-NETSIM Program, Transportation Engineering”, Vol.116, No.6, pp.734-743, 1992.
- 13) Mizutani, H. et al.: “Evaluation for AHS Architecture - Development of Traffic Simulator -“, Proceedings of the 4th World Congress on ITS (CD-ROM), Berlin, 1997.
- 14) (株)ニュージェック：KUNJ-Sakura，<http://www.newjec.co.jp/>
- 15) Yokochi, K. et al.: “Development of Traffic Simulator SIPA(Smart Infrastructure Performance Analyzer)”, Proceedings of the 8th World Congress on ITS (CD-ROM), Sydney, 2001.
- 16) (株)日立製作所日立研究所：交通流シミュレーションシステム TRAFFICSS，<http://trafficss.hrl.hitachi.co.jp/>
- 17) 永井徹ほか：対話型3次元交通流マイクロシミュレータの開発，第17回交通工学研究発表会論文報告集，pp.57-60，1997.
- 18) 飯田恭敬 編著：交通工学，国民科学社，1992.
- 19) 日本道路協会 編：道路の交通容量，1984.
- 20) 田名部淳，大窪剛文，松尾武：交通管制データウェアハウスの構築と今後の展開，土木

計画学研究・講演集, Vol. 27, CD-ROM, 2003.

第7章 結論

7.1 本研究の成果

本研究では、近年深刻化している交通渋滞を交通情報提供によって緩和・解消することを目的としている。その上で、まず、提供される交通情報が真に利用価値の高いものであるためには、次の2つの条件を同時に満たすことが重要であることを提示した。

- (1) 提供情報が正しいこと（精度）
- (2) 広いエリアの情報提供がなされること（情報カバレッジ）

そして、本研究では、交通情報のうち最も詳細でかつ応用範囲の広い旅行時間を対象に、提供される交通情報の精度の向上と情報カバレッジの拡大を可能にし、かつ実用性の高い旅行時間推定・予測手法を検討・開発し、またその性能評価を行うことによって既存の技術に対する有効性を確認した。

以下に、各章の概要を示す。

第1章では、本研究の背景として交通情報提供システムに関わる現状と課題についてまとめ、課題を考慮した上で本研究の目的及び本論文の構成について述べた。

第2章では、交通情報提供システムに関わる既存の研究・技術についてまとめた。はじめに、わが国で最も代表的な交通情報提供システムである VICS の概要とそれを構成する各サブシステムについてまとめた。次に、交通情報提供システムを支える代表的な車両センサの機能や特性についてまとめた。次に、VICS を支える基本技術として車両センサの計測情報を用いた既存の旅行時間推定・予測の研究についていくつかの代表事例を報告した。また、新しい交通情報収集システムであるプローブカーに関する既存の研究や、VICS 情報を用いて近未来の旅行時間を予測する旅行時間予測に関する既存の研究についても報告した。また、交通流シミュレーションに関する既存の研究事例について報告した。以上を踏まえた上で現状の課題を整理し、本研究の意義を明らかにした。

第3章では、VICS に代表されるインフラサイドの交通情報提供システムを対象として、各種車両センサの計測情報を効率的に利用することにより、提供情報の精度の向上及び情報カバレッジの拡大を目指す旅行時間推定及び予測について検討した。まず、交通の現況情報を提供するための技術として位置付けられる車両センサの計測情報を効率的に利用した旅行時間推定に関する手法として、長距離区間及び短距離区間を計測する区間内部の旅行時間を推定するのに適したそれぞれの手法について述べた。前者は感知器の影響範囲を実測値によって適切に決定し、後者は AVI, 超音波感知器, 光ビーコンによる各計測情報の精度特性等を考慮し、これらを動的・排他的に切り替えるハイブリッド方式を採用し、かつ各計測情報を利用したそれぞれの推定手法についても高精度化を図った。次に、提供情報のさらなる高精度化をめざした次世代の交通情報提供システムに向けた技術として位置付けられる車両センサの計測情報を高度利用することにより近未来の旅行時間を予測する旅行時間予測に関する二つの手法について述べた。一つは道路区間において交通状況が時間遅れを伴って伝播する現象を利用して近未来の旅行時間を予測する手法で、もう一つは当日の計測旅行時間の過去に蓄積した旅行時間に対する相対順位に着目し、当日の交通状況と類似した過去の交通状況

を抽出して未来の旅行時間を予測する手法である。それぞれの手法に関して、実際のフィールドデータを用いて精度評価を行い、既存技術に対する有効性・実用性を確認した。また、これらの旅行時間推定・予測手法の適用範囲についてもまとめた。

第4章では、交通状況に関するデータの新しい収集システムであるプローブカーによる計測情報（プローブ情報）を加工することにより旅行時間を推定する手法について検討した。ここでは、プライバシーの問題が少なく収集効率性が高いことから実現性の面で有望と期待される業務車両を対象としたトラック運行管理 ASP によって収集されたプローブ情報を用いた推定手法を提案した。トラック運行管理 ASP におけるプローブ情報は、位置を中心とする動態管理という主要目的とコスト低減の観点から、位置情報をセンターに収集する頻度は数分に1回程度の長周期情報になり、その特性を考慮して運行管理 ASP（交通情報センター）によるマップマッチングと途中経路の推定技術を融合する方式とした。また、推定された旅行時間を統計処理することにより統計旅行時間データベースを作成し、これを用いて出発時刻に対する目的地への到着予想時刻や到着希望時刻に対する出発推奨時刻を予測する旅行時間予測システムについても述べた。また、リアルタイムに交通情報を提供する場合、精度とプローブ情報収集コストの間にはトレードオフの関係があると考えられる。そこで、実際のプローブ情報を用いてプローブ情報の収集頻度による推定旅行時間の精度を評価することにより、収集頻度が性能にどの程度影響するかについて述べるとともに、VICS と同等の性能を維持するのに必要なプローブ情報の収集頻度についても推計した。

第5章では、2002年6月より施行された改正道路交通法によって可能となった民間事業者による交通情報データの加工として、二つの交通状況予測手法に関する検討をおこなった。はじめに、カーナビゲーションにおいて渋滞予測型の経路探索に利用することを目的とした統計旅行時間の推定手法について述べた。この手法においては、予測精度の向上と情報カバレッジの拡大を実現するため、最適な統計分類方法、特異データの検出方法、及び交通情報が提供されないリンクに対する補完推定法のそれぞれについて検討した。そして、実車走行テストを通じた予測旅行時間の精度評価、従来のカーナビゲーションに対する情報カバレッジ拡大の効果、及び統計旅行時間を用いて得られる経路の品質のそれぞれについて評価することにより本手法の有効性を確認した。次に、新しい交通情報として、今後の渋滞が悪化するか緩和するかに関わる情報と定義した渋滞傾向情報について述べ、その推定手法について検討した。この渋滞傾向情報は、リアルタイムな迂回行動選択への一助となることを想定して考案され、この情報を従来の VICS による渋滞情報に付加して提供することにより情報をより詳細化することを狙ったものである。また、実際の VICS 情報を用いて、予測情報としての性能を評価することにより、本手法の実現の可能性について検討した結果についても報告した。

第6章では、大規模な災害や事故などが広域に発生した場合における迅速な交通対策の支援ツールを整備することを目的とした交通流シミュレータについて述べた。まず、既存のシミュレータと比較することにより本シミュレータの目的と位置付けを明確にした。そして、オンラインで得られる交通管制データを利用したマクロな交通状況の再現について述べ、さらに、災害や事故が発生した時に交通規制を実施すると交通流がボトルネックから上流に向

かって渋滞が延伸していく様子を表現する流体モデルについても述べた。また、本シミュレータの性能評価として、実際の道路ネットワークデータを用いた速度性能と旅行時間の予測精度について述べ、またパラメータの感度分析を実施することによりシミュレーションパラメータの交通状況予測へ及ぼす特性を明らかにした。

7.2 今後の課題

本研究における今後の課題としては、以下の点が挙げられる。

- (1) 感知器の影響範囲を事前学習する旅行時間推定は、過去データを学習することによって得られる感知器の影響範囲を固定的に利用することになっているが、渋滞状況や時間帯等によって影響範囲を可変とすることによりさらに精度を向上できる可能性があり、この動的な影響範囲の学習方法の検討が今後の課題である。
- (2) 個々の感知器の重みを事前学習する旅行時間推定は、現在の交通状況を表す推定情報を対象としているため、例えば 10km を超えるような長距離においては、交通状況が大きく変化すると誤差が悪化することが懸念される。そのような状況においては予測手法が適していると考えられるが、推定手法と予測手法のそれぞれが適している境界条件を見つけることができれば、これらをその条件に応じて動的に使い分けることによって、より精度の高い旅行時間情報を提供することができると考えられる。この境界条件を見出すことが今後の課題である。
- (3) 車両センサによる計測情報の伝播現象を利用した旅行時間予測は、従来の手法とは異なり統計情報をベースとしないため、交通事故や工事などの突発事象発生時の影響を抑えられると考えられるが、実際に突発事象が発生した場合の評価を今後実施していきたいと考える。また、この予測手法は、交通状況の伝播遅れを利用したものであるため、この遅れ時間を超える未来の旅行時間を予測することができないという限界がある。今後は、より未来の旅行時間を予測する手法についても検討していきたいと考える。
- (4) 蓄積旅行時間の順位マッチングを用いた旅行時間予測は、相対順位を用いるため特に日種ごとにデータの管理を行う必要がなく、したがって実際の情報提供システムに組み込む場合にシステム管理を容易としながら高精度に予測できる点に特長があり、多くの場合において予測精度が良好であるものの、土日、祝日など交通パターンが定まりがたい日の特定の時間帯では、この予測手法では精度が不安定になることも見られた。こういった状況下においても安定した予測手法を検討することが今後の課題である。
- (5) プロブ情報は旅行時間推定・予測に有用な情報であるが、プローブカーシステム単体ではコスト面での障害が大きいと考えられるため、実際のサービスシステムへの展開においては VICS との協調・連携が重要であると考えられる。また、タクシーやバスを含めた他の業務車両をプローブカーとして用いた場合の特性についても検討し、旅行時間の推定・予測に最も適したプローブカーについて検討することが今後の課題である。
- (6) カーナビ向け統計旅行時間においては、推定の元となっているデータが過去の交通情報データであるため、事故やイベントなどの突発事象には対応できない。したがって、過去の交通情報とリアルタイムの交通情報を融合させた手法の検討により対応することが今後

の課題である。

- (7) 渋滞傾向の推定手法は、基本的に直近の変化率を利用するものであるため、旅行時間の極大や極小点においては不正解となってしまう点に課題がある。今後は、リアルタイムの VICS 情報の代わりに予測旅行時間を本手法に適用することで対応することが考えられる。
- (8) 広域交通流シミュレータを用いた旅行時間の推定・予測では、今後はネットワークに適用していくため、経路選択行動モデルも組み入れることによって実用性をさらに向上させることが考えられる。また、交通規制終了後における交通流回復現象を精度よく再現できるモデルの検討も課題である。

謝 辞

本論文を結ぶにあたり、本研究を遂行する上でご指導とご援助をいただいた方々に感謝の意を表します。

京都大学大学院工学研究科谷口栄一教授には、本研究の遂行ならびに本論文をまとめるにあたり、終始暖かいご指導とご鞭撻をいただきました。ここに、謹んで感謝の意を表します。

京都大学大学院工学研究科北村隆一教授、小林潔司教授、吉井稔雄助教授には、本論文をまとめるにあたり、有益なるご指導をいただきました。心より感謝の意を表します。

岐阜大学工学部秋山孝正教授、京都大学大学院工学研究科川崎雅史助教授、宇野伸宏助教授、大阪市立大学大学院工学研究科内田敬助教授には、筆者の京都大学工学部在学中より研究活動のあらゆる面で暖かいご指導とご鞭撻をいただきました。心より感謝いたします。

京都大学大学院工学研究科山田忠史助教授、相浦宣徳助手には、筆者の京都大学大学院工学研究科博士後期課程における暖かいご指導と、本論文をまとめるにあたり終始有益なるご助言とをいただきました。厚く御礼申し上げます。

警察庁、長野県、大分県、北海道の各警察本部警察職員の方々には、交通情報提供における精度と情報カバレッジの重要性についてご助言をいただき、またシステム開発にあたりご協力をいただきました。ここに深く感謝いたします。

(株) 日立製作所研究開発本部川上潤三氏、同社中央研究所福永泰氏、同社日立研究所小豆畑茂氏、同社オートモーティブシステムグループ川端敦氏、(株) 日立ビルシステム谷藤真也氏、Hitachi Europe Ltd. 桂晃洋氏、(株) ザナヴィ・インフォマティクス山足公也氏には、本研究を行う機会を与えていただきました。(株) 日立製作所日立研究所横田孝義氏、高橋和範氏、武長寛氏、谷越浩一郎氏、同社情報制御システム事業部小林芳樹氏、同社中央研究所上脇正氏には、筆者の日立研究所入社当事より研究開発のあらゆる面で暖かいご指導とご助言をいただきました。同社社会システム事業部福岡昇平氏、同社トータルソリューション事業部古川聡一氏、同社情報制御システム事業部佐野豊氏、安孫子税氏、(株) 日立エンジニアリング萩本幸男氏、園田信幸氏、高村冬樹氏には、VICS システム及び広域交通流シミュレータの製品開発をともに担当させていただきました。(株) 日立製作所 CIS 事業部平部正和氏、(株) ザナヴィ・インフォマティクス住沢紹男氏、遠藤芳則氏、天谷真一氏には、カーナビ向け統計旅行時間の研究開発の機会を与えていただき、カーナビの製品開発をともに担当させていただきました。そして、筆者の同僚である日立研究所北村忠明氏、奥出真理子氏、井上健士氏、永井徹氏、堀田都氏、待井君吉氏、伏木匠氏、熊谷正俊氏、藤原淳輔氏、君田和也氏とは、日頃の研究、実験、製品開発、顧客への提案、論文発表等あらゆる面において苦楽をともにし、時には暖かい励ましやご協力をいただきました。これら(株) 日立製作所ならびに関連グループ会社の方々に深く感謝の意を表します。

ここに記しきれない多くの方々の学恩、ご支援を得てはじめて本研究の遂行が可能であったことを銘記し、深く感謝いたします。