

2 地点車両観測情報からの全域的交通流解析アルゴリズム

小林 弘忠[†], 石関 隆幸[†], 遠藤 雅也[†], 今井 浩[†],
西村 茂樹[‡], 下浦 弘[‡], 天目 健二[‡]

[†]東京大学大学院理学系研究科情報科学専攻
〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

[‡]住友電気工業株式会社
〒554-0024 大阪府大阪市此花区島屋 1-1-3

要旨

本研究では, ITS 実現へ向けて, 交通量情報の実時間獲得を念頭に, 旅行時間の実時間推定および車両の同定への新手法を提案する. 具体的には, 同一路線の 2 地点で収集した車長・車高の時系列データから, 各車両の対応付けを推定し, 旅行時間を求めるアルゴリズムを考える. 本研究では, 車両の対応付け問題を 2 次元の文字列アライメント問題に帰着し, 動的計画法 (Dynamic Programming; DP) を用いて解くアルゴリズムを提案し, その実用性を実験によって検証する.

An Algorithm for Traffic Flow Analysis Using Vehicle Data Sequences at Two Observation Points

Hiro tada Kobayashi[†], Takayuki Ishizeki[†], Masaya Endo[†], Hiroshi Imai[†],
Shigeki Nishimura[‡], Hiroshi Shimoura[‡], Kenji Tenmoku[‡]

[†]Department of Information Science, Faculty of Science, University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

[‡]Sumitomo Electric Industries, Ltd.,
1-1-3 Shimaya, Konohana-ku, Osaka 554-0024, Japan

Abstract

Getting the real time information of traffic is one of the important steps towards realization of ITS. For this purpose, we propose a new method for estimating travel time between designated two points and detecting the correspondences of vehicles, by utilizing the observed lengths and heights of vehicles. We formulate the problem of detecting the correspondences of vehicles as the pairwise sequence alignment problem, by ignoring changes of the order of vehicles. We examine the practicality of our formulation by several experiments.

1 はじめに

ITS 実現へ向けた交通量情報の実時間獲得のため, 旅行時間と交通量の測定および車両の同定が要請される. しかしながら, 高速道路などの旅行時間などを推定する既存のシステムでは,

一点通過速度などからの推定を行っているため, 正確な推定が難しい. 一方で, 車両番号自動識別システムなどの方法を広く用いるには, コスト面などで問題がある. そこで, 比較的实现が容易な, センサデータから得られる 2 地点各通

過車両の車長・車高等の時系列データを利用することを考える [2][5].

本研究の基本方針としては、同一路線の2地点で収集した車長・車高の時系列データから各車両の対応を推定し、これを元に旅行時間を計算することを目指す。

各車両の対応の推定問題は、追い越し等による車両順の変化を無視すれば、2次元の文字列アライメント問題として定式化することができる。そこで本研究では、2次元文字列アライメント問題に対する DP アルゴリズムを利用して、本定式化の実用性を実観測データに対する実験によって検証する。さらに、よりパラメタに依存しないアルゴリズムを提案する。

2 車両対応の推定問題における誤差要因

本研究で用いる車両の時系列データは、各車両ごとに車両番号、車頭通過時刻、車長、車高、車両画像が与えられていると仮定する。ただし、車両番号は各観測地点で計測開始から通過した車両の通過順番号とし、車頭通過時刻は各観測地点を車両の先頭が通過した時刻を時、分、秒、ミリ秒で与えるとする。また今回はビデオ映像から実データを取得した。

各車両の対応付けの際の誤差要因としては、車長や車高等の測定誤差、追い越しによる車両順の変化、IC 出入りによる車両の出現と消滅および車線変更による車両データの車線間移動などが挙げられる。

3 2次元文字列アライメントによる各車両の対応付け

車両対応の推定問題は、追い越し等による車両順の変化を無視すれば、2次元の文字列アライメント問題として定式化することができる。

3.1 2次元文字列アライメント問題

2次元の文字列アライメント問題は以下のよう
に定められる。

与えられた有限文字集合 Σ と、各要素 $s_{ij} \in \Sigma$ である2本の文字列

$$\begin{aligned} s_1 &= s_{11}s_{12}\cdots s_{1l_1} \\ s_2 &= s_{21}s_{22}\cdots s_{2l_2} \end{aligned}$$

に対し、以下の条件を充たす行列

$$A = (a_{ij})_{1 \leq i \leq 2, 1 \leq j \leq l}$$

を s_1, s_2 のアライメントと呼ぶ。

(i) $a_{ij} \in \Sigma \cup \{-, =\}$. ここで、“-” は *internal gap* を表し、“=” は *external gap* を表す。

(ii) A の各行 $a_i = a_{i1}\cdots a_{il}$ ($1 \leq i \leq 2$) から *gap* を除いた文字列は s_i に等しい。

(iii) A には *gap* のみからなる列は存在しない。

ただし、*internal gap* とは各行の内側に挿入される *gap* で、*external gap* とは各行の外側のみ出現する *gap* である。

次に、 Σ 内の2つの文字間および *gap* に対して定められたスコア関数

$$d : (\Sigma \cup \{-, =\})^2 \rightarrow \mathbb{R}$$

を用いて、 A の *pairs score* を

$$\phi(A) = \sum_{j=1}^l d(a_{1j}, a_{2j}).$$

と定める。

2次元の文字列アライメント問題とは、*pairs score* を最大化するアライメント A_{opt} を求める問題である。

2次元文字列アライメント問題は、2次元格子状有向グラフ上の最短経路問題に帰着できる。実際、 s_1, s_2 に対し、

$$\begin{aligned} V &= \{v_{i,j} = (i, j) \mid i = 0, 1, \dots, l_1, j = 0, 1, \dots, l_2\} \\ E &= \bigcup_{e \in \{0,1\}^2} \{(v, v+e) \mid v, v+e \in V, e \neq 0\}. \end{aligned}$$

で定まる有向グラフ $G = (V, E)$ を考えると、 $s = (0, 0)$ から $t = (l_1, l_2)$ への各パスが各アライメントに1対1対応する(図1)。 $v_{i-1, j-1}$ と $v_{i,j}$ を結ぶ各枝は s_{1i} と s_{2j} を対応させることを意味し、枝長 $d(s_{1i}, s_{2j})$ を与えられる ($1 \leq i \leq l_1, 1 \leq j \leq l_2$)。その他の各枝は *gap* を挿入することに対応し、スコア関数に定義された *gap cost* を枝長として与えられる。さらに、適当な枝長変換をして枝長を非負にすることにより、2次元文字列アライメント問題はこの有向グラフ G 上での最短経路問題に帰着できる。この最短経路問題は、動的計画法 (Dynamic Programming; DP) により、 $O(l_1 l_2)$ 時間で解くことができる [1][4]。

3.2 2次元文字列アライメント問題への帰着

進行方向に沿って2地点 P, Q がこの順にあるとし、地点 A での観測車両の集合を $\mathcal{P} = \{p_1, \dots, p_{n_P}\}$ で表し、地点 Q での観測車両の集合を $\mathcal{Q} = \{q_1, \dots, q_{n_Q}\}$ で表す。

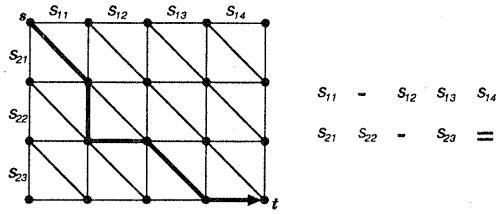


図 1: アライメント問題の最短経路問題への帰着
(- は internal gap, = は external gap)

また、車両 x の観測車長、観測車高をそれぞれ $l(x), h(x)$ で表す。

各車両間のスコアを対数尤度を用いて定めることを考える。いま、実際の車長 l が、地点 P では平均 l 、分散 $\sigma_{l,P}^2$ で観測されるとし、一方、地点 Q では平均 l 、分散 $\sigma_{l,Q}^2$ で観測されるとすると、車長 l の車両が地点 P で車長 l_P 、地点 Q で車長 l_Q に観測される確率密度は、

$$\Pr(l_P \cap l_Q | l) = \frac{1}{2\pi\sigma_{l,P}\sigma_{l,Q}} \exp\left(-\frac{(l_P - l)^2}{2\sigma_{l,P}^2} - \frac{(l_Q - l)^2}{2\sigma_{l,Q}^2}\right)$$

となるから、地点 P で車長 l_P と観測された車両が、地点 Q で車長 l_Q に観測される事後確率密度 $p_l(l_P, l_Q)$ は、

$$\begin{aligned} p_l(l_P, l_Q) &= \frac{1}{2\pi\sigma_{l,P}\sigma_{l,Q}} \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(l_P - l)^2}{2\sigma_{l,P}^2} - \frac{(l_Q - l)^2}{2\sigma_{l,Q}^2}\right) dl \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_{l,P}^2 + \sigma_{l,Q}^2)}} \exp\left(-\frac{(l_P - l_Q)^2}{2(\sigma_{l,P}^2 + \sigma_{l,Q}^2)}\right) \end{aligned}$$

となる [5]。

同様に、実際の車高 h が、地点 P では平均 h 、分散 $\sigma_{h,P}^2$ で観測されるとし、一方、地点 Q では平均 h 、分散 $\sigma_{h,Q}^2$ で観測されるとすると、地点 P で車高 h_P と観測された車両が、地点 Q で車高 h_Q に観測される確率密度 $p_h(h_P, h_Q)$ は、

$$p_h(h_P, h_Q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_{h,P}^2 + \sigma_{h,Q}^2)}} \exp\left(-\frac{(h_P - h_Q)^2}{2(\sigma_{h,P}^2 + \sigma_{h,Q}^2)}\right)$$

となる。

簡単のため、 $\sigma_l = \sqrt{\sigma_{l,P}^2 + \sigma_{l,Q}^2}$

$\sigma_h = \sqrt{\sigma_{h,P}^2 + \sigma_{h,Q}^2}$ と表すことにする。

これらに基づいて、地点 P で観測された車両 $p_i \in \mathcal{P}$ と地点 Q で観測された車両 $q_j \in \mathcal{Q}$ を対応させるスコアを

$$d(p_i, q_j) = \ln p_l(l(p_i), l(q_j)) + \ln p_h(h(p_i), h(q_j))$$

で与え、gap cost を

$$\begin{aligned} d(p_i, -) &= d(-, q_j) \\ &= \frac{1}{2} \{\ln p_l(0, 3\sigma_l) + \ln p_h(0, 0)\} \\ &= \frac{1}{2} \{\ln p_l(0, 0) + \ln p_h(0, 3\sigma_h)\} \\ &= -\frac{1}{2} \ln(2\pi\sigma_l\sigma_h) - \frac{9}{4} \end{aligned}$$

で与える ($1 \leq i \leq n_P, 1 \leq j \leq n_Q$)。これは、車長、車高のいずれかが 3σ 範囲以上離れる場合は別の車両とみなす考えに基づく。しかしながら、地点 P でのデータの終わりの部分、及び、地点 Q でのデータの始めの部分は、対応するデータが得られていない可能性がある。そこで、internal gap cost には上で与えたものをそのまま用い、external gap cost には、仮に対応するデータがあったとしたときに得られるべき 1 車両当たりの平均コストを基準に与えることにする。(internal gap cost や external gap cost は、parametric search (例えば、[1]) の手法を用いることにより、最適なものを求めることができる。)

これから、DP を用いてアライメント問題を $O(n_P n_Q)$ で解くことができる。

さらに、現実には対応し得ないと思われる車両間の対応スコアは $-\infty$ にしておくことも考えられる (例えば、旅行時間が負になる、あるいは、あまりに短い、または長いものなど)。

3.3 リアルタイム処理への拡張

現実問題への応用を考え、時系列に従ってアライメントを更新するよう拡張する。

時系列に従って、各地点で新規車両を観測する度に、該当車両のデータを追加し、該当部分のアライメントを更新する。これだけでは各地点での管理データは単調に増えるのみであるので、一度に保持できる車両データ数が設定した上限値を越える場合には、現在保持しているデータの中で最古のものを捨てるようにする。

2次元の文字列アライメント問題は、2次元格子状有向グラフ上の最短経路問題に帰着できる。

アライメントのグラフの各点でのスコアは、隣接する点のスコアと、隣接枝のコストのみから定まるので、最古のデータを削除しても、アライメントのスコアには、その車両の存在を反映させたままにしておくことが可能である。すなわち、途中で古い車両のデータを捨てていっても、最終的には観測車両すべてからアライメントを計算するのと同様の結果が得られる。

上記は以下の4つの操作を時系列に従って繰り返すことにより実現できる。

- 上流側の管理データに最新観測車両を1台追加し、対応する部分のアライメントを計算
- 下流側の管理データに最新観測車両を1台追加し、対応する部分のアライメントを計算
- 上流側の管理データ中最古の車両を1台削除
- 下流側の管理データ中最古の車両を1台削除

4 実験結果

4.1 実験対象データ

実験に使用した実観測データについて以下にまとめる。なお、本実験はまだ試行段階であるので、センサを用いて各観測データを得る代わりに、各観測地において車両の側面から録画されたビデオ画像を利用した。車長および車高は、ビデオ画像より手作業で測定し、白線の長さを基準に求めた。

首都高速道路

上流観測点: 渋谷 (2車線中左側走行車線)
 下流観測点: 高樹町 (2車線中左側走行車線)
 区間距離: 約 2.9 km,
 途中に渋谷 IC 入口, 同出口,
 高樹町 IC 入口がこの順に有
 (図 2)。

観測時間: 1998年9月16日(水)
 11時30分頃より約2時間

観測車両数: 上流側 1519台
 下流側 2079台

備考: 下流側のデータの車長, 車高が約10%大きい。

東名高速道路

上流観測点: 大和二号橋

下流観測点: 大塚橋
 (共に3車線分)

区間距離: 約10km,
 途中に横浜町田 IC と港北 PA 有。
 下流側には港北 PA からの合流車線もあるが、これは観測対象外
 (図 3)。

観測時間: 1999年6月2日(水)
 14時00分頃より約2時間

観測車両数: 左車線上流側 1576台
 左車線下流側 1681台
 中車線上流側 3104台
 中車線下流側 2595台
 右車線上流側 2461台
 右車線下流側 1861台

備考: 左および中車線においては、下流側のデータの車長, 車高が約10%大きい。右車線においては、下流側のデータの車長, 車高が約10%小さい。

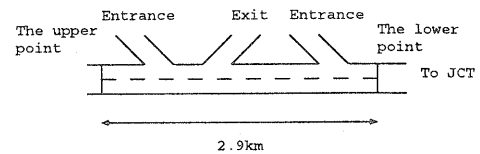


図 2: 観測地点略図 (首都高速道路)

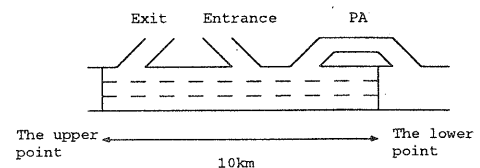


図 3: 観測地点略図 (東名高速道路)

4.2 測定長の比を利用した車両の対応スコア

前節の方法では対応させる2車両の車長(車高)の測定長の差が平均0の正規分布に従うと仮定してスコアを定めたが、今回の実験データの観測方法では、人手によって車長・車高を測定しているため、車長・車高の長い車両ほど観測誤差が大きくなる傾向がみられた。そこで、対応させる2車両の車長(車高)の測定長の比が平均1の正規分布に従うと仮定してスコア

を定めることにより、車長（車高）の長い車両により大きな測定誤差を許し対応付けされやすくした、スコア関数に対しても実験を行った。

4.3 アライメントの限界

アライメント問題に帰着させる方法では、順序の入れ違った車両が存在するときはすべての車両を正しく対応付けることができないので、車両同定率には上限がある。表 1 に各データでの車両同定率の上限を示す。Known は実対応が知られている車両数で、max Hit は Known のなかで順序が保存されている最大車両数である。従って、アライメントによる同定率の上限は $\text{max Hit} / \text{Known}$ で与えられる。この上限は、最長一致部分文字列問題を解くことにより求めることができる。

4.4 データ解析

実際の対応を元に、各パラメタの推定値、及び車長、車高の補正率を求めると、表 2 のようになった。A と R はそれぞれ絶対値と比によるパラメタであることを示す。ただし、補正率は最小二乗法、標準偏差は標本分散から推定している。

4.5 実験結果

各データとも、誤差の絶対値、比の 2 通りのスコア評価方法について、前節の実対応より求まるパラメタ値を用いて比較実験した。

いずれの場合も各観測点での管理データ数の上限は 1000 台とし、首都高速データに対しては、最小旅行時間 100 秒、最大旅行時間 5000 秒、東名高速データに対しては、最小旅行時間 240 秒、最大旅行時間 10000 秒として、それ以下、またはそれ以上の旅行時間のものは対応させないようにしてある。

表 3 で、Type の欄が A のものは絶対値による評価法、R のものは比による評価法であることを示す。求まった対応付けの確信度 (Confidence) を $\text{Hit} / (\text{Hit} + \text{Missed})$ 、同定率 (Specified) を $\text{Hit} / \text{Known}$ で与えて解の質を比較してある。首都高速については、良く推定できている。東名高速の左車線の同定率が低いのは、車両順序の変化が激しいためと思われる。一方で、右車線の場合、大型車などの特徴的車両が少なく、同定が難しくなっていると思われる。

次に、測定値の比を利用した場合の各結果について、各時刻での最新 1 分間以内に下流側を通過した車両に対し、その時点で求まった対

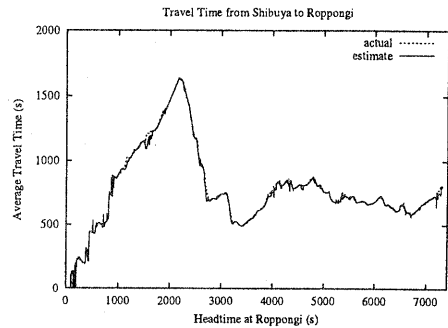


図 4: 推定旅行時間 (首都高速)

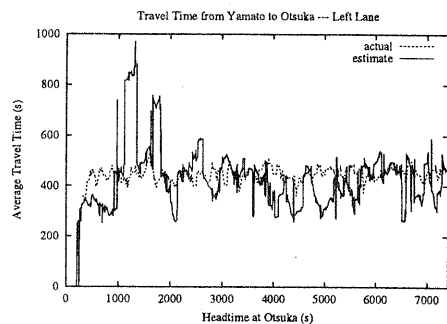


図 5: 推定旅行時間 (東名高速・左車線)

応付けを元に、その時刻での平均旅行時間を推定し、実際の対応付けでのそれと比較したところ、図 3~6 のグラフのようになった。首都高速については、交通流の変化が激しいにもかかわらず、非常に良く推定できている。東名高速に関しても左車線を除いては概ね良く推定できている。

5 External Gap を必要としないアライメントアルゴリズム

前節の実験で、同一路線の 2 地点で収集した車長列等の時系列データから、各車両の対応付けを行い、移動時間を求める問題に対し、2 次元文字列アライメント問題に帰着して DP を用いて解くアルゴリズムが有効であることが分かった。

一方で、時系列の最新時点側の対応付けの部分は、external gap の値の設定に大きく依存してしまう欠点がある。そこで、時系列の最新時点側の external gap を必要としないようにアルゴリズムを拡張する。

	max Hit	Known	上限 (%)
首都高速	625	625	100.00
東名高速 (左)	242	383	63.19
東名高速 (中)	625	825	75.76
東名高速 (右)	465	574	81.01

表 1: アライメントによる車両同定率の上限

	Modification		S. D. (A)		S. D. (R)	
	Length	Height	σ_l	σ_h	σ_l	σ_h
首都高速	0.8906	0.9275	0.4261	0.2538	0.0543	0.0975
東名高速 (左車線)	1.0671	1.0094	0.5206	0.1750	0.0692	0.0695
東名高速 (中車線)	1.0526	1.0083	0.3446	0.2749	0.0539	0.0647
東名高速 (右車線)	0.9669	0.9391	0.2691	0.1155	0.0594	0.0705

表 2: 実際の車両対応から求まる各パラメタの推定値

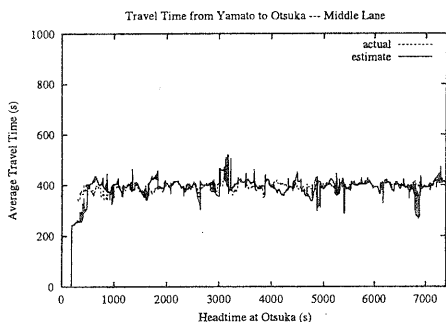


図 6: 推定旅行時間 (東名高速・中車線)

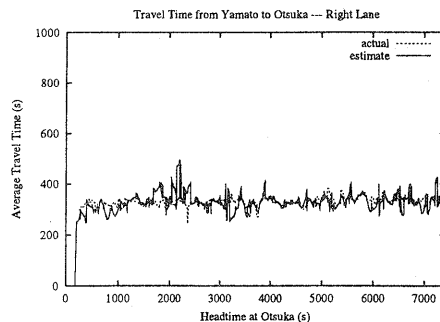


図 7: 推定旅行時間 (東名高速・右車線)

5.1 アルゴリズム

まず、前節のアルゴリズムでは、時系列最新地点側の external gap cost の値が g のとき、あるアライメント A のスコア $S(A, g)$ は、

$$S(A, g) = S'(A) + g \cdot x(A)$$

で与えられていた。ただし、 A においては時系列最新地点側に長さ $x(A)$ の external gap 列が入るとし、時系列最新地点側の external gap 列部分以外から定まる A のスコアを $S'(A)$ で表した。

前節のアルゴリズムでは、ある g を与えて、

$$\begin{aligned} A_{\text{opt}} &= \arg \max_A S(A, g) \\ &= \arg \max_A (S'(A) + g \cdot x(A)) \quad (1) \end{aligned}$$

を求めている。

ここで、external gap cost の値 g は、仮に対応するデータがあったとしたときに得られるべき 1 車両当たりの平均コストを基準に与えるとしていた。

従って、いま、上流側通過車両台数を n_p 台、下流側通過車両台数を n_q 台とし、2 地点で観測された車両列間の真の対応付けを最も忠実に表すアライメントを A^* とすると、

$$\tilde{g} = \frac{S'(A^*)}{n_p + n_q - x(A^*)} \quad (2)$$

は g の良い推定値を与えると思われる。

$g = \tilde{g}$ としたときのアライメント A^* のスコアは

$$\begin{aligned} S(A^*, \tilde{g}) &= S'(A^*) + \tilde{g} \cdot x(A^*) \\ &= S'(A^*) + \frac{S'(A^*)}{n_p + n_q - x(A^*)} \cdot x(A^*) \end{aligned}$$

	Type	Hit	Missed	Known	Confidence	Specified
首都高速	A	522	58	625	90.00	83.52
首都高速	R	523	52	625	90.96	83.68
東名高速(左)	A	82	165	383	33.20	21.41
東名高速(左)	R	105	136	383	43.57	27.42
東名高速(中)	A	254	326	825	43.79	30.79
東名高速(中)	R	339	202	825	62.66	41.09
東名高速(右)	A	182	233	574	43.86	31.71
東名高速(右)	R	181	229	574	44.15	31.53

表 3: 各パラメタによる比較実験結果

$$= \frac{n_p + n_q}{n_p + n_q - x(A^*)} \cdot S'(A^*)$$

で表せるので,

$$A_{\text{opt}}^{\text{new}} = \arg \max_A T(A)$$

$$= \arg \max_A \left(\frac{n_p + n_q}{n_p + n_q - x(A)} \cdot S'(A) \right) \quad (3)$$

を A^* に対する推定として用いることを考える。

ここで, $n_p + n_q$ は一定なので, (3) 式は実は $\frac{S'(A)}{n_p + n_q - x(A)}$ を最大にする A を求めている。

この最大値は, 各上流側通過車両の index i に対して, 各枝 $e = (v_{i-1, n_q}, v_{i, n_q}) (1 \leq i \leq n_q)$ を取り除いたアライメントグラフを考え, 各点 v_{i, n_q} でのアライメントの最大スコア score_{i, n_q} を求め, $\frac{\text{score}_{i, n_q}}{i + n_q}$ が最大になる点を見つけることにより求まる。

5.2 実験結果

4.5 節で用いた各データについて, 上記のアルゴリズムを用いて旅行時間の推定を行った結果が図 8 ~ 図 11 である。東名高速の右車線を除いては, external gap を用いた場合とほぼ同等の結果が得られている。

右車線で結果が悪いのは, 車長の長い特徴的車両の割合が少ないためと考えられ, 実際, 車長 6 m 以上の車両の割合は, 左車線 43.0 %, 中車線 23.1 % に比べ, 右車線 7.2 % と圧倒的に少ないことが判明した。そこで, 右車線で真の対応付けの分かっている 574 台中長さ 6 m 未満のものに対し, ランダムに一部の車両を選んで長さを 2.5 倍, 高さを 2 倍することにより人為的に車長 6 m 以上の車両の割合を増やしたところ, 15 % まで増やせばかなり良い推定旅行時間を得ることができ, 20 % 以上にすればさらに安定した結果を得ることができた(図 12, 13)。

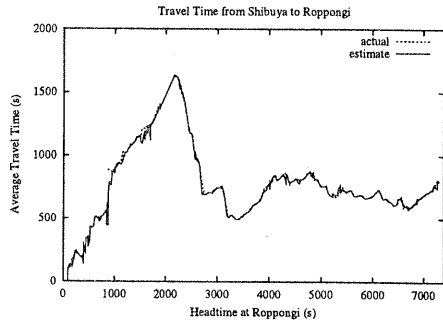


図 8: 推定旅行時間(首都高速)

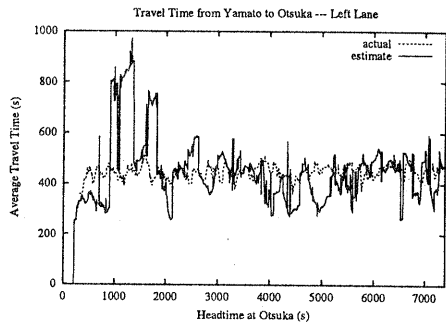


図 9: 推定旅行時間(東名高速・左車線)

従って, 右車線での結果が悪かったのは, 車長の長い特徴的車両の割合が極めて少なかったためと思われる。

6 まとめと課題

本研究では, 比較的实现が容易な, センサデータから得られる 2 地点各通過車両の車長・車高等の時系列データを利用することを考え, 各車両の対応の推定問題を 2 次元の文字列アラ

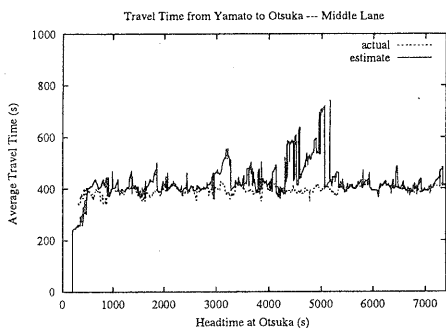


図 10: 推定旅行時間 (東名高速・中車線)

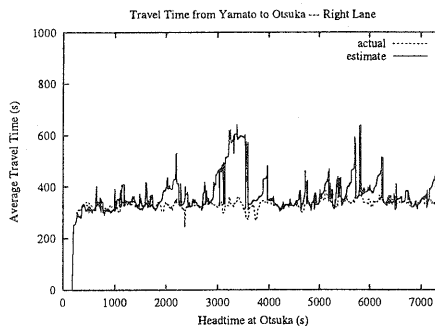


図 12: 特徴的車両を 15%に増やした場合

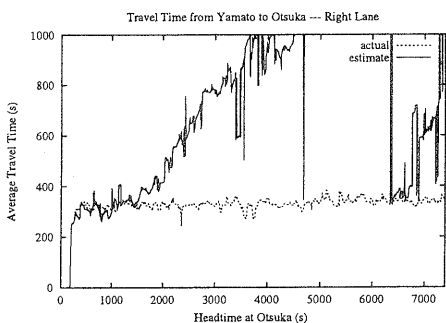


図 11: 推定旅行時間 (東名高速・右車線)

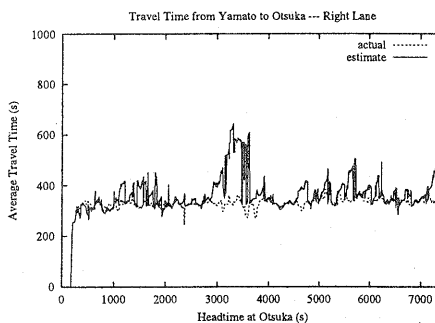


図 13: 特徴的車両を 20%に増やした場合

イメント問題として定式化し、その実用性を実観測データに対する実験によって検証した。一方で、アライメントを利用した場合、時系列の最新時点側の対応付けの部分は、external gap の値の設定に大きく依存してしまう欠点がある。そこで、時系列の最新時点側の external gap を必要としないようにアルゴリズムを拡張した。

これらの実験から、全域的な交通量の把握が可能となることがわかった。

今後の課題としては、まず特徴的な車両が少なく車長・車高のみでは困難な場合への対処法の考慮があげられる。また、一定時間内の通過車両数などの旅行時間推定への利用や、色などの画像情報の利用 [3] が考えられる。

参考文献

- [1] D. Gusfield. *Algorithms on Strings, Trees, and Sequences*. Cambridge University Press, 1997.
- [2] 井上健士, 横田孝義, 高橋一哉, 小林芳樹. 車群の DP マッチングを用いた車の旅行時

間推定. 情報処理学会 数理モデル化と問題解決研究報告, Vol. 96, Num. 10 pp. 7-12, 1996.

- [3] 小林弘忠, 石関隆幸, 遠藤雅也, 今井浩, 西村茂樹, 下浦弘, 天目健二. 2 地点での車両観測情報からの全域的交通流解析. 情報処理学会 第 4 回高度道路交通システム研究グループ資料, 2000.
- [4] S. B. Needleman and C. D. Wunsch. A general method applicable to the search for similarities in the amino acid sequences of two proteins. *Journal of Molecular Biology*, 48, pp. 443-453, 1970.
- [5] 辻紘良, 高橋理一, 鈴木和彦. 車高プロフィール同定による旅行時間計測. 研究会資料, 1983.