

# Travel time measurement in closed toll highways

Soriguera, f., Rosas, and D., Robuste, F.: Travel  
time measurement in closed toll highways,  
Transportation Research Part B, vol.44(10), pp.  
1242-1267, 2010

2010.12.2  
論文ゼミ#9  
B4 瀧口洋平

# 目次

- 1.Intoroduction
- 2.提案目的
- 3.Single section travel time measurement
- 4.リアルタイム/オフラインでの実装
- 5.実証: AP-7(スペイン)
- 6.結論

# 1.Intoroduction

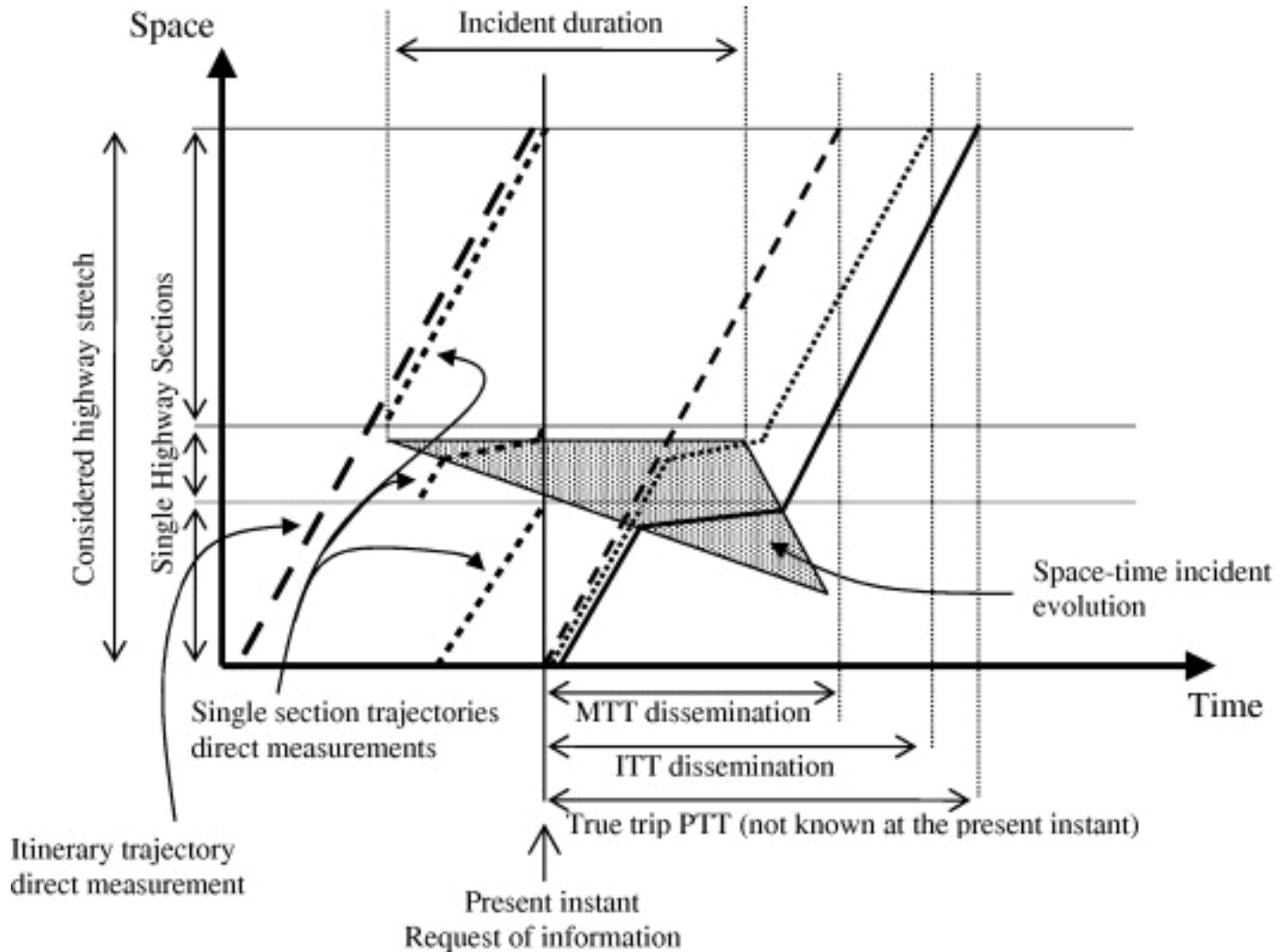
- 旅行時間は、旅程の決定や交通ネットワークの管理において最も重要な情報である.
- 従来は離散的な点での速度を検知器で計測する間接的な旅行時間推定が研究されてきた. (Coifman,2001)また、特定の車両の再同定を行い精度を向上させる研究もある. (Coifman and Krishnamurthya, 2007)
- ここ10年はITSの進歩により自動で車両IDを認識し、直接旅行時間を計測できるようになった. (Turner, 1998)
- GPSでの計測では2-3%の車両からデータが得られれば交通流は正確にわかるという研究もある. (Herrera, 2009)
- 本論文では、料金所のチケットから得られるデータ(出発地, 出発時間, 到着地, 到着時間)に基づき、直接旅行時間推定を提案する.

## 2.提案目的

- 料金所のデータを使う際は、車両が高速を出るときにしかデータが得られない。ある車両の旅程の進入、脱出時間から求められるMTT(measured travel time)は、長い旅程や混雑が起これば情報に大きく遅れが出る欠点がある。
- その欠点を軽減するため、single sectionの旅行時間を足し合わせる推定法で得られるITT(instantaneous trip travel time)がある。
- PTT(predicted travel time)は、ある時点で高速に入った車の実際の旅行時間のことであり、入った時点ではわからない。

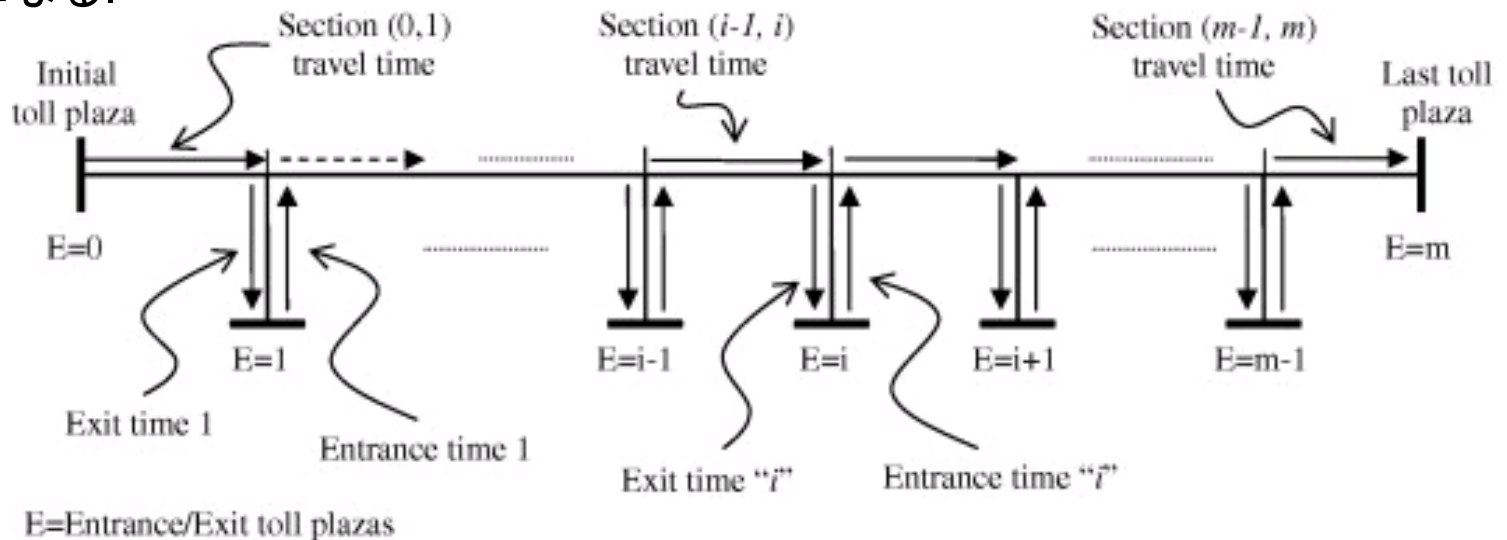
## 2.提案目的

- MTT,ITT,PTTの時間のずれを表す.



## 2.提案目的:問題点

- 交通流全体に対し、各セクションで料金所を取る車両の数が少ないため、正確には高速に乗り降り(exit time, entrance time)にかかる時間を求められない。
- Single sectionごとにexit timeとentrance timeを足しているので予測が過大になる。



→ETCベースの測定システムの導入で解決できるが、金と普及率がネックになるため、別の方法で上記の問題を解決する。

# 3.1 基本アルゴリズム

- 今回の推定にはバイクを含む乗用車のみを考える. 事前にデータクリーニングを行っておく.
- 入口0から出口1まで移動する時の旅行時間は以下で表す. ここで,  $t_s$ は本線上でかかる時間,  $t_{ex}$ は料金所を出るのにかかる時間(減速走行時間+支払時間)である. 0(高速の始点, 料金所がない)から入る時は以下.

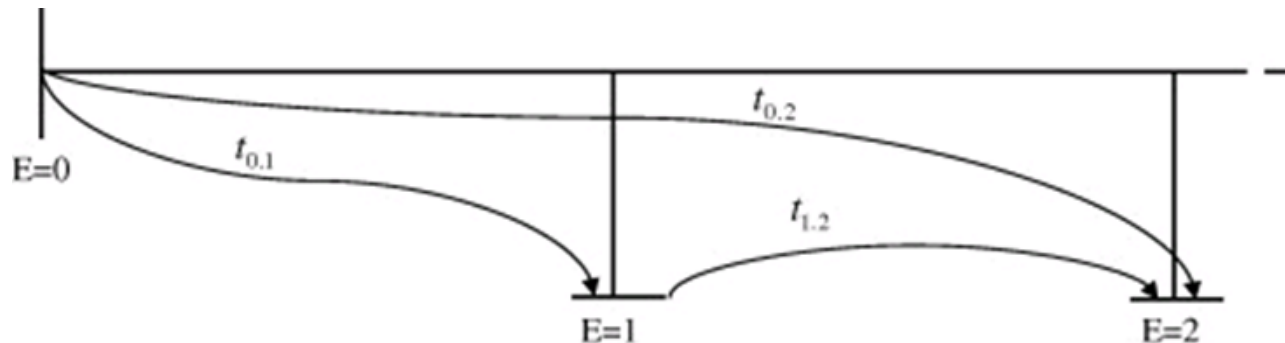
$$t_{0,1} = t_{s(0,1)} + t_{ex(1)} \quad \dots(1)$$

- $t_{en}$ は料金所から本線に入るのにかかる時間.

$$t_{s(0,1)} \approx t_{0,2} - (t_{1,2} - t_{en(1)}) \approx t_{0,3} - (t_{1,3} - t_{en(1)}) \approx \dots \quad \dots(2)$$

$$t_{ex(1)} = t_{0,1} - t_{s(0,1)} \quad \dots(3)$$

- 右: 模式図



# 3.1 基本アルゴリズム

- 以上を一般化すると次式となる.  $m$ は最後の料金所である.

$$t_{i,i+1} = t_{en(i)} + t_{s(i,i+1)} + t_{ex(i+1)}, \quad \forall i = 1, \dots, m - 1 \quad \dots(4)$$

- ここで $t_{en(i)}$ は料金所ごとに一定とする.
- ←料金所から本線に入るまでは加速度はほぼ一定と考えられる. これに料金所での反応時間の5秒を足して $t_{en(i)}$ とする.
- $t_s$ と $t_{ex}$ を公式化すると次のようになる.

$$t_{s(i,i+1)} \approx (t_{i,i+2} - t_{en(i)}) - (t_{i+1,i+2} - t_{en(i+1)}) \approx (t_{i,i+3} - t_{en(i)}) - (t_{i+1,i+3} - t_{en(i+1)}) \approx \dots \quad \dots(5)$$

$$t_{ex(i+1)} = t_{i,i+1} - t_{s(i,i+1)} - t_{en(i)} \quad \dots(6)$$

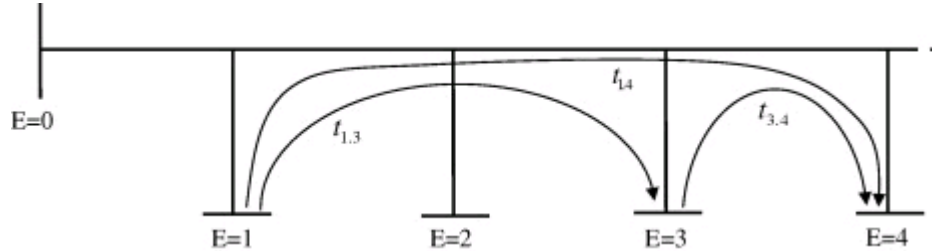


# 3.1 基本アルゴリズム

- 留意点
- 次の出口で降りたい車により、一部の車線だけが混雑することがある。つまり目的地によって一つのセクションの中でも旅行時間が異なる。これは旅行時間推定に大きな誤差を引き起こし得る。
- 上記の対策として、補助レーンが設置されていることがあり、その影響で exittime が過小、もしくは負になることがある。全体の旅行時間推定においてはむしろそれは有効に働いている。
- 長すぎるトリップに対しては情報の遅れ、ドライバーの休憩などの要因により精度が下がるため、基本アルゴリズムを適用すべきではない。

## 3.2 拡張アルゴリズム

- 二つのセクションの旅行時間を推定できるように拡張する.



- 基本アルゴリズムの時と同様に一般化する.

$$t_{s(1,3)} \approx (t_{1,4} - t_{en(1)}) - (t_{3,4} - t_{en(3)}) \approx (t_{1,5} - t_{en(1)}) - (t_{3,5} - t_{en(3)}) \approx \dots \quad \dots(7)$$

$$t_{ex(3)} = t_{1,3} - t_{s(1,3)} - t_{en(1)} \quad \dots(8)$$

- 添え字の2は拡張アルゴリズムにより計算したという意味である.

$$t_{s(i,i+2)} \approx (t_{i,i+3} - t_{en(i)}) - (t_{i+2,i+3} - t_{en(i+2)}) \approx (t_{i,i+4} - t_{en(i)}) - (t_{i+2,i+4} - t_{en(i+2)}) \approx \dots \quad \dots(9)$$

$$t_{ex2(i+2)} = t_{i,i+2} - t_{s(i,i+2)} - t_{en(i)} \quad \dots(10)$$

## 3.2 拡張アルゴリズム

- ここで、基本アルゴリズムで各セクションの旅行時間が十分にとれているとすると、

$$t_{s2(i,i+1)} = t_{s(i,i+2)} - t_{s(i+1,i+2)} \quad \dots(11)$$

- 取れていない場合は距離  $l$  の比で  $t_{s2}$  を仮定する.

$$t_{s2(i,i+1)} = \frac{t_{s(i,i+2)} \cdot l_{s(i,i+1)}}{l_{s(i,i+2)}} \quad \dots(12)$$

$$t_{s2(i+1,i+2)} = \frac{t_{s(i,i+2)} \cdot l_{s(i+1,i+2)}}{l_{s(i,i+2)}} \quad \dots(13)$$

- こうして得られた基本、拡張アルゴリズムを精度で重みづけし、加重平均を行って旅行時間を推定する.

## 4.1リアルタイムでの実装

- 実装に際しては, 情報取得間隔 $\Delta t$ が重要となる.  $p$ は時間.
- 前式をリアルタイムで適用するときは以下のようになる.

$$\begin{aligned}
 t_{s(i,i+1)}^{(p)} &\approx (t_{i,i+2}^{(p)} - t_{en(i)}) - (t_{i+1,i+2}^{(p)} - t_{en(i+1)}) \approx (t_{i,i+3}^{(p)} - t_{en(i)}) - (t_{i+1,i+3}^{(p)} - t_{en(i+1)}) \approx \dots\dots \\
 &\approx (t_{i,i+n^*}^{(p)} - t_{en(i)}) - (t_{i+1,i+n^*}^{(p)} - t_{en(i+1)}) \quad \dots(17)
 \end{aligned}$$

- ここで $i+n$ は期間 $\Delta t$ の間に $i$ から行ける最遠の出口を表し,  $n^*$ は次の条件の下での最大の $n$ を表す.
- また,  $\delta t$ は車両軌跡の重複を確認するのに必要な時間.
- この時車両の軌跡は以下で表される.

$$\begin{aligned}
 p - t_{i,i+n}^{(p)} \geq p - t_{i,i+2}^{(p)} - \Delta t + \delta t &\rightarrow t_{i,i+n}^{(p)} \leq t_{i,i+2}^{(p)} + \Delta t - \delta t \quad \dots(18) \\
 p - t_{i,i+n}^{(p)} - \Delta t + \delta t \leq p - t_{i,i+2}^{(p)} &\rightarrow t_{i,i+n}^{(p)} \geq t_{i,i+2}^{(p)} - \Delta t + \delta t
 \end{aligned}$$

# 4.1リアルタイムでの実装

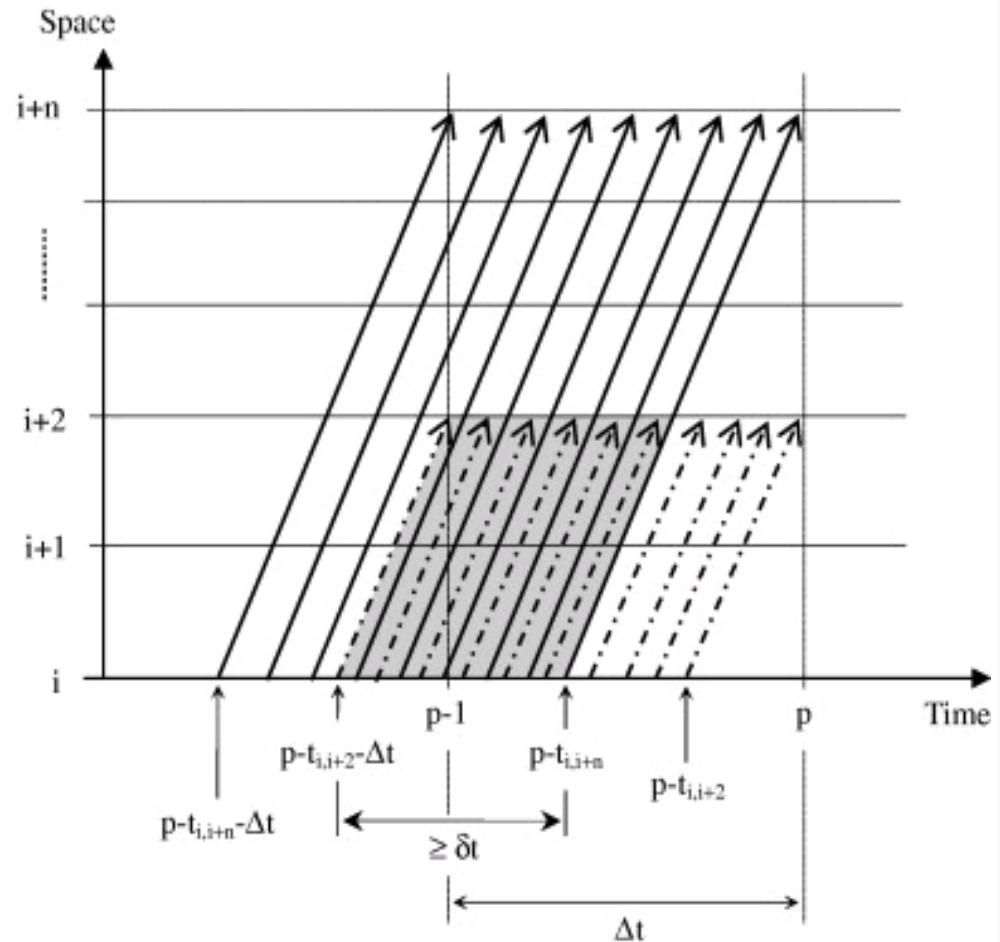
- $n$ を固定したとすると $t$ の条件は近似を用いて以下のように表される.

$$t_{i+2,i+n}^{(p)} \leq \Delta t - \delta t \quad \dots (20)$$

$$t_{i+2,i+n}^{(p)} \geq -\Delta t + \delta t$$

- 同様にしてexit timeも求めるための条件もわかる.

$$t_{i+1,i+2}^{(p)} \leq \Delta t - \delta t \quad \dots (23)$$



**Legend:**



Zone of simultaneous traveling.  
 ("n\*" corresponds to the maximum "n" for which this zone spans at least for a duration of "δt")

# 5.実証: AP-7(スペイン)

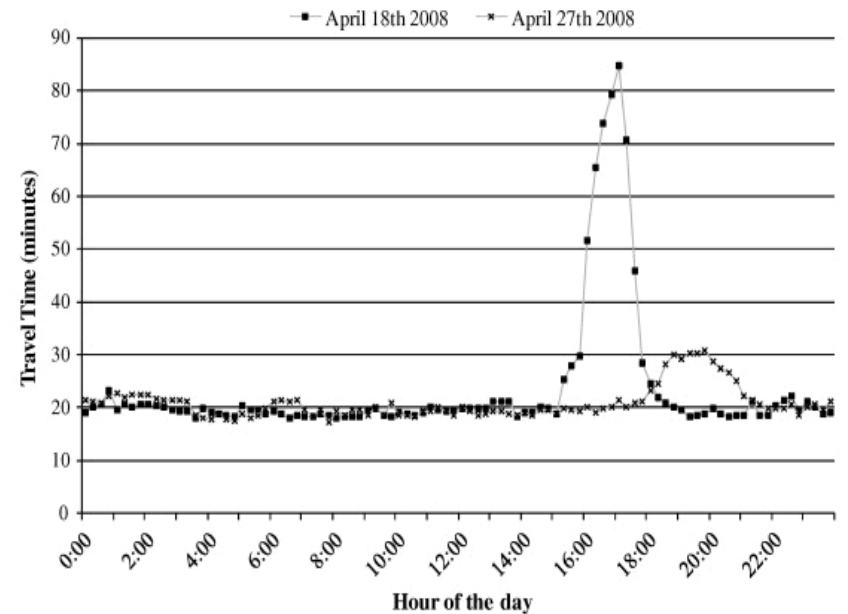
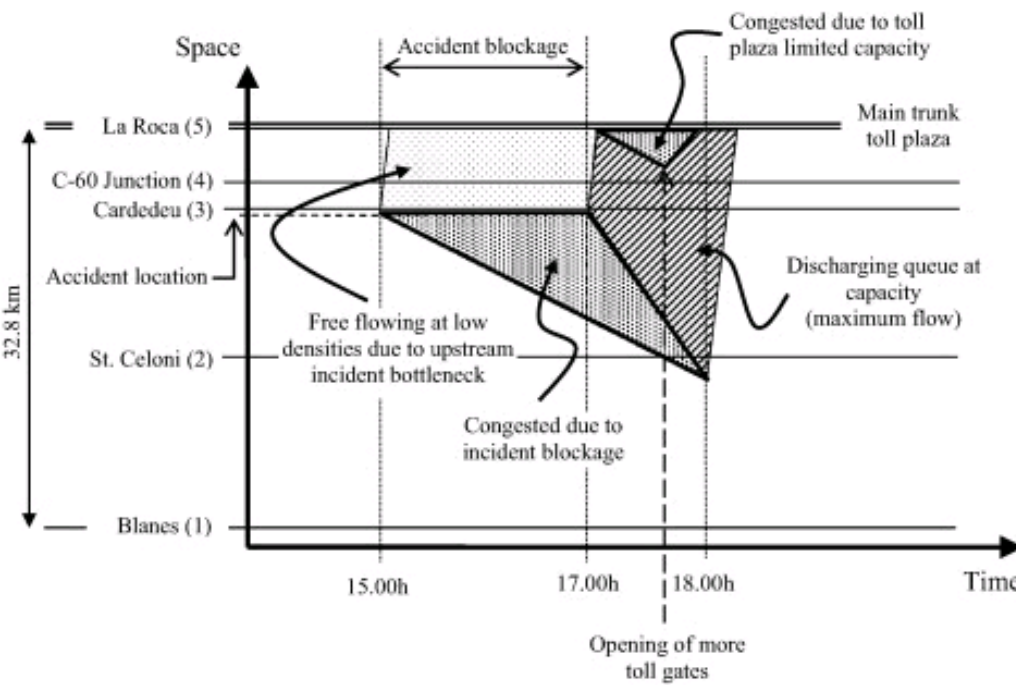
- La Roca del Valles(バルセロナ近郊)からLa Jonquera(フランス国境付近)までの120kmで、リアルタイムでの実験を行った。

- データ1

2008/4/18(Fri). 15時ごろ事故が発生し、17時ごろ解消。

- データ2

2009/4/27(Sun). 一般的日曜日で、夕方に少し混雑が起きる。



Note: These travel times correspond to " $t_{1.5}^{(p)}$ ", the representative average of the MTT for the itinerary "1,5" every 15 minutes directly obtained from toll ticket data.

# 5.1 サンプル期間 $\Delta t$ の選択

- 誤差の求め方. 標準正規分布を仮定しており,  $\alpha$ は有意確率. ここでZは標準化変数,  $\sigma$ は標準偏差, Nはサンプル数,  $n^*$ は期間内に進めるセクション数を表す.

$$\varepsilon_{(t_{ij}^{(p)})} = \frac{Z_{(1+\alpha)/2} \cdot \sigma_{(t_{ij}^{(p)})}}{\sqrt{N_{ij}^{(p)}}} \quad \dots(30)$$

- これから単一セクションでの旅行時間の誤差の推定は以下となる.

$$\varepsilon_{(t_{s(i,i+1)}^{(p)})} = \frac{\sqrt{2} \cdot \varepsilon_{(t_{ij}^{(p)})}}{\sqrt{n^* - 1}} \quad \text{if } n^* = 2 \quad \dots(31)$$
$$\varepsilon_{(t_{s(i,i+1)}^{(p)})} = \frac{\sqrt{2} \cdot \varepsilon_{(t_{ij}^{(p)})}}{\sqrt{2n^* - 3}} \quad \text{if } n^* \geq 3$$

# 5.1 サンプル期間 $\Delta t$ の選択

- 典型的な需要パターンA~Eを仮定し,  $\Delta t=1,3,5,15$ の時の, 単一セクションでの誤差を調べる. 表より $\Delta t=5$ は誤差が少なく, 標準偏差も小さい.

Table 1

Maximum expected estimation errors for various demand patterns and different " $\Delta t$ ".

Demand pattern <sup>a</sup>	$\Delta t$	Itinerary travel time standard deviation " $\sigma$ " (min)		N		n <sup>*</sup>		Maximum expected single section travel time absolute error <sup>b</sup> (min)	
		Median	25-75% percentile	Median	25-75% percentile	Median	25-75% percentile	Median	25-75% percentile
A	1 min	1.11	0.63-1.70	2	1-3	2	2-2	1.22	0.52-2.40
	3 min	1.29	0.92-1.85	3	1-6	2	2-2	1.00	0.51-2.62
	5 min	1.37	0.98-1.87	4	1-9	4	3-4	0.45	0.21-1.33
	15 min	1.55	1.55-1.87	22	11-33	4	4-4	0.21	0.14-0.36
B	1 min	1.22	0.92-1.56	4	1-9	2	2-2	0.90	0.44-2.20
	3 min	1.24	0.90-1.47	5	2-22	2	2-2	0.81	0.27-1.61
	5 min	1.22	0.87-1.49	7	2-30	4	3-4	0.30	0.10-0.94
	15 min	1.39	1.30-1.54	114	58-151	4	4-4	0.08	0.07-0.13
C	1 min	0.99	0.73-1.26	7	2-12	2	2-2	0.53	0.29-1.38
	3 min	0.99	0.73-1.24	8	2-34	2	2-2	0.49	0.18-1.36
	5 min	1.00	0.69-1.26	9	2-52	4	3-4	0.21	0.06-0.72
	15 min	1.18	1.02-1.28	181	114-218	4	4-4	0.06	0.04-0.08
D	1 min	3.09	2.09-3.95	6	1-10	2	2-2	1.84	0.92-4.83
	3 min	2.76	1.15-3.65	7	2-28	2	2-2	1.47	0.31-3.65
	5 min	2.46	0.93-3.61	9	2-42	3	3-3	0.68	0.12-1.93
	15 min	3.57	3.09-4.06	134	110-167	4	4-4	0.2	0.15-0.25
E	1 min	2.19	1.48-3.38	4	1-7	2	2-2	1.55	0.79-4.78
	3 min	2.02	1.24-2.93	5	2-18	2	2-2	1.28	0.41-3.21
	5 min	1.98	1.24-2.85	7	2-28	4	3-4	0.48	0.15-1.64
	15 min	2.60	2.14-4.21	89	74-104	4	4-4	0.17	0.13-0.31



## 5.2 アルゴリズムの精度

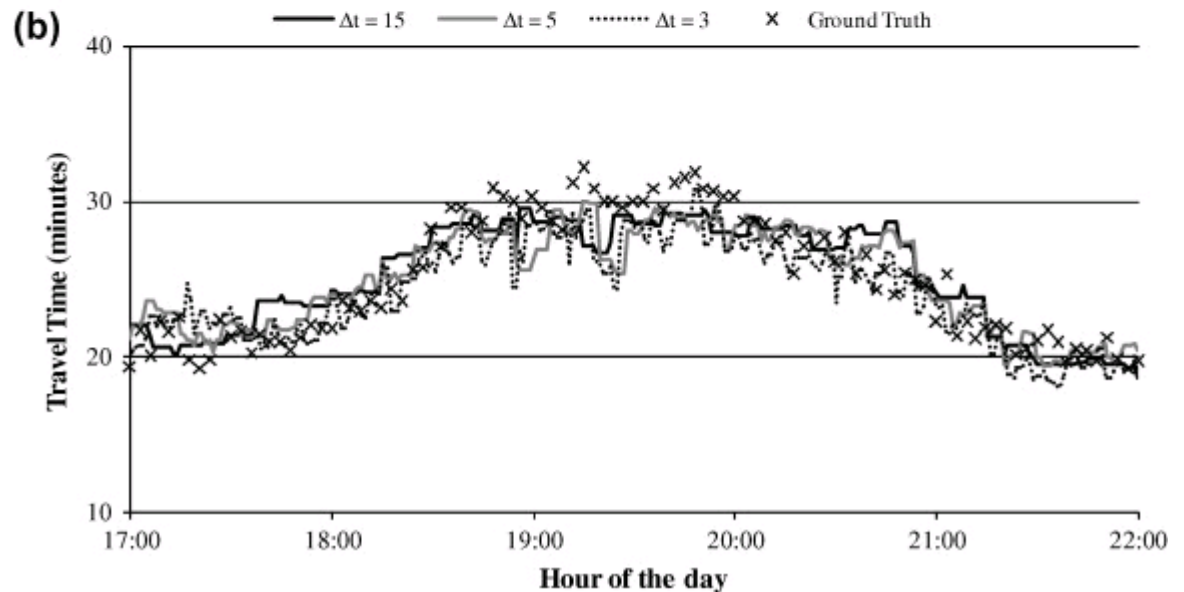
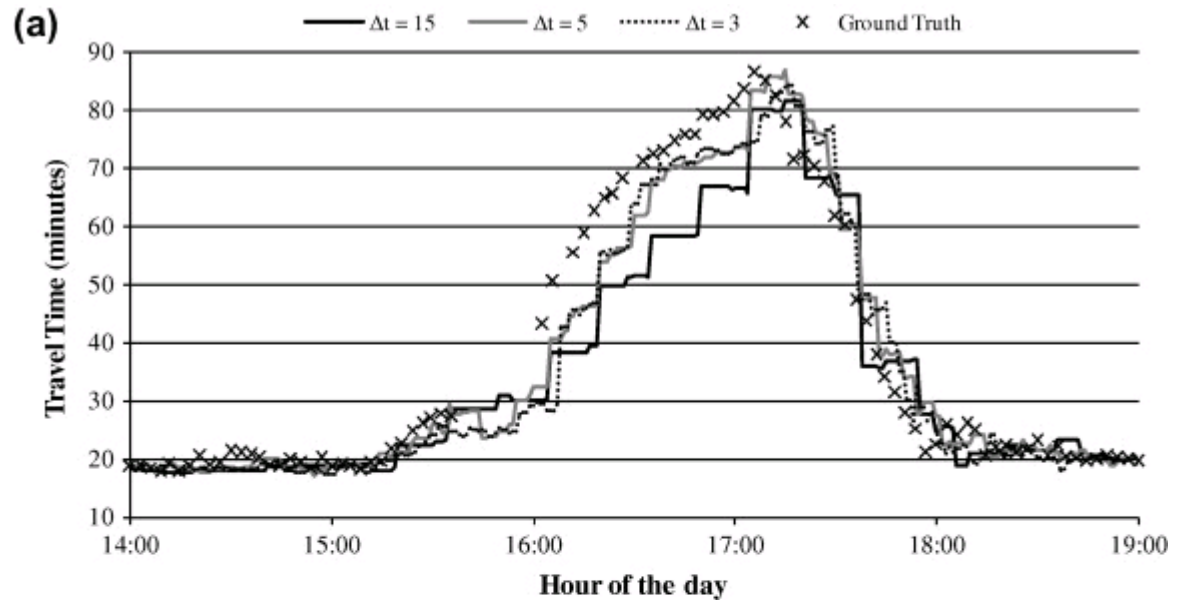
- 実データから旅程全体での誤差を比較.  $\Delta t=15$ も良いが, Eのような混雑時に誤差が予測より大きい.  $\Delta t=5$ は全対的にそれなりの結果が得られる.

**Table 2**  
Accuracy of the algorithm for various demand patterns and different " $\Delta t$ " considering the itinerary (1,5).

Demand pattern <sup>a</sup>	Test day	Period of the day	$\Delta t$	Itinerary travel time absolute error <sup>b</sup> (relative)	
				Mean	Max.
A	April 18th 2008	0 am–6 am 9 pm–12 pm	3 min	1.44 (0.07)	6.25 (0.25)
			5 min	1.18 (0.06)	3.14 (0.17)
			15 min	1.03 (0.05)	2.48 (0.13)
	April 27th 2008	0 am–8 am	3 min	1.74 (0.09)	4.19 (0.24)
			5 min	1.66 (0.08)	4.49 (0.19)
			15 min	1.62 (0.08)	3.61 (0.16)
B	April 18th 2008	6 am–7 am 9 am–3 pm 7 pm–9 pm	3 min	0.95 (0.05)	4.59 (0.20)
			5 min	1.07 (0.06)	3.53 (0.21)
			15 min	0.94 (0.05)	2.30 (0.12)
	April 27th 2008	8 am–4 pm 10 pm–12 pm	3 min	1.09 (0.06)	3.43 (0.17)
			5 min	1.14 (0.06)	3.26 (0.17)
			15 min	0.89 (0.05)	3.34 (0.17)
C	April 18th 2008	7 am–9 am	3 min	1.30 (0.07)	3.32 (0.18)
			5 min	1.04 (0.06)	2.87 (0.13)
			15 min	0.75 (0.04)	1.08 (0.06)
	April 27th 2008	4 pm–5 pm	3 min	0.87 (0.04)	2.89 (0.14)
			5 min	0.65 (0.03)	1.56 (0.08)
			15 min	0.76 (0.04)	1.08 (0.05)
D	April 27th 2008	5 pm–10 pm	3 min	1.47 (0.06)	5.07 (0.16)
			5 min	1.28 (0.05)	4.25 (0.14)
			15 min	1.06 (0.04)	2.30 (0.09)
E	April 18th 2008	3 pm–7 pm	3 min	3.62 (0.09)	14.72 (0.34)
			5 min	3.59 (0.08)	11.58 (0.23)
			15 min	5.84 (0.11)	18.09 (0.30)

## 5.2 アルゴリズムの精度

- $\Delta t$ の時間による真値とのずれを示す。(a)が突発的な渋滞発生時で、(b)は定期的な渋滞発生時。
- $\Delta t=5$ の時は両方でずれが少ない。



## 5.3リアルタイムでの計測


- 実際にある時間における旅行時間推定をITT, MTT, 真値の間で比較する。結果はシナリオD,EのどちらでもITTがMTTより良くなるが、真値とはまだ誤差がある。
- これよりリアルタイムでの予測能力においてはITTは十分ではないが、予測やモデルに安定性があるという点で優れていると言える。

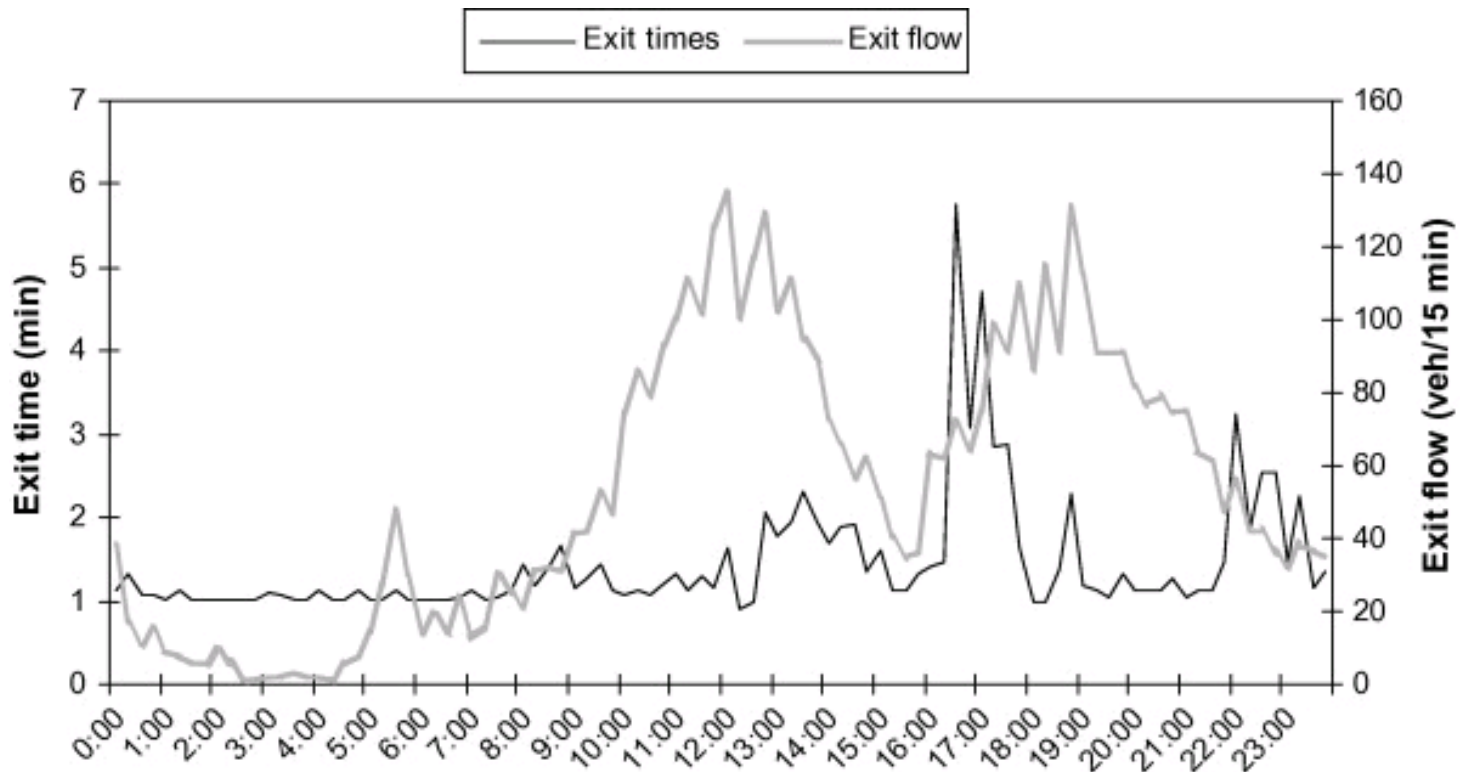
Table 3

Real time travel time dissemination in relation to the available information.

Type of available information	Travel time disseminated at "p" (min:s)	
	April 18th 2008 "p" = 18.15 h (Scenario D) Congestion dissolve	April 27th 2008 "p" = 17.30 h (Scenario E) Congestion onset
Only itinerary information (MTT) $t_{1,5}^{(p)}$	46:04	24:32
Single section travel time information (ITT) $t_{en(1)}^+ \sum_{i=1}^4 t_{s(i,i+1)}^{(p)} + t_{ex(5)}^{(p)}$	37:18	27:16
Real travel time for those vehicles entering the highway between instants "p" and "p + 1" (PTT)	24:47	30:14

## 5.4 exittimeについて

- 提案手法では付随結果としてexit timeが得られる. これは管制者にとってはLOSを左右する重要な指標である.
- 経験則によりAP-7ではexit timeを短い時間に抑えているが, それで対応できない事態の時は提案手法による定量的な推定で対策を行えばよい.
- exitime 



## 6.結論

- 出発, 到着時間だけのデータより多くの情報をチケットから入手し, 簡便な旅行時間推定手法を提案した.
- 単一セクションの旅行時間と, ジャンクションを抜ける時間がわかることで, サンプル数の少なさやタイムラグといった問題が回避できる.
- リアルタイムでの推定と, 規則的な旅行時間の比較により, 安定した事故検知システムを構築できる.
- 今後はジャンクション間, ループ型検出器のデータを用いることが考えられる.