

# Integrated driving behavior model

Toledo, T. , Koutsopoulos, H. N., Ben-Akiva, M.,  
Transportation Research Part C, vol. 15, Issue 4, pp. 96 - 112, 2007

---

# Estimation of an integrated driving behavior model

Toledo, T. , Koutsopoulos, H. N., Ben-Akiva, M.,  
Transportation Research Part C, vol. 17, Issue 2, pp.365 - 380, 2009



2008/06/24(水)

論文ゼミ#10

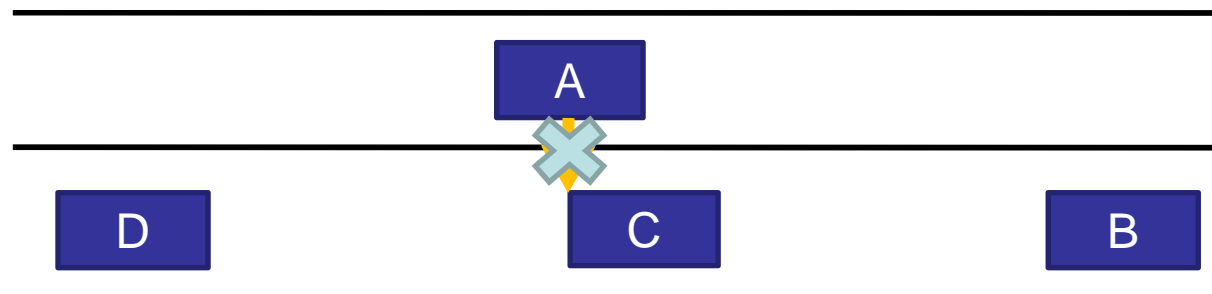
M1 山田孝太郎

- はじめに
- 使用データ
- モデル概要
- 尤度関数
- 各モデル
  - Target Lane
  - Gap Acceptance
  - Target Gap
  - Acceleration
- 結論

- ミクロ交通シミュレーション
  - 車両の挙動を個別に表現
- 車両挙動モデル
  - 速度・加速モデル
  - 車線変更モデル
- 既往モデルの問題点
  - 加速と車線変更の意思決定が独立に行われる。

例) 車両Aが車線変更しようとしているとき

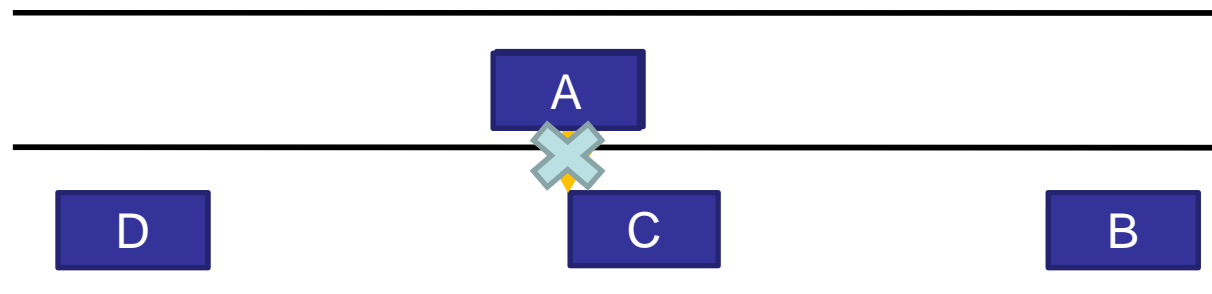
従来



- ミクロ交通シミュレーション
  - 車両の挙動を個別に表現
- 車両挙動モデル
  - 速度・加速モデル
  - 車線変更モデル
- 既往モデルの問題点
  - 加速と車線変更の意思決定が独立に行われる。

例) 車両Aが車線変更しようとしているとき

現実



- 車両軌跡データから得られたデータの区分
  - 周辺の状況: 周辺にいる自動車との距離など
  - 走行計画: 希望する経路
  - ネットワークの知識と経験: 運転者の道路への慣れ
  - 運転の特性: 攻撃性や反応時間
- 利用データ
  - Arlington, VAのフリーウェイのデータ

区間の長さ	997m
観測数	15632(442台)
平均速度	15.6m/s
区間平均密度	31.4veh/km/lane

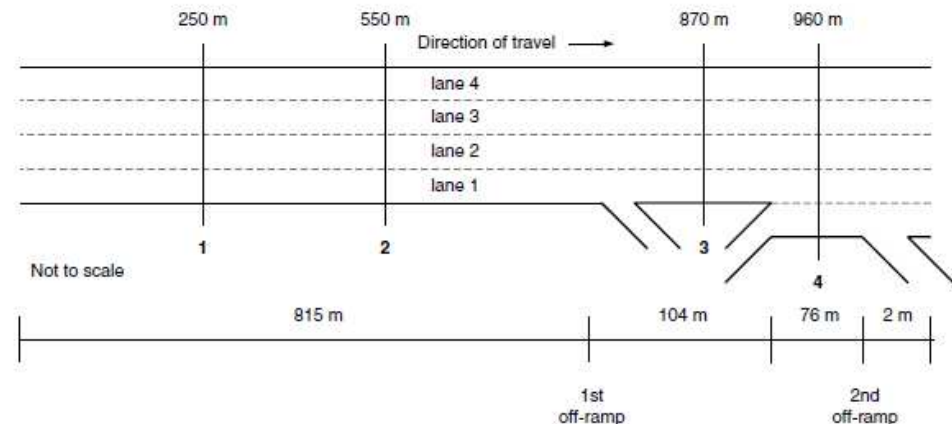
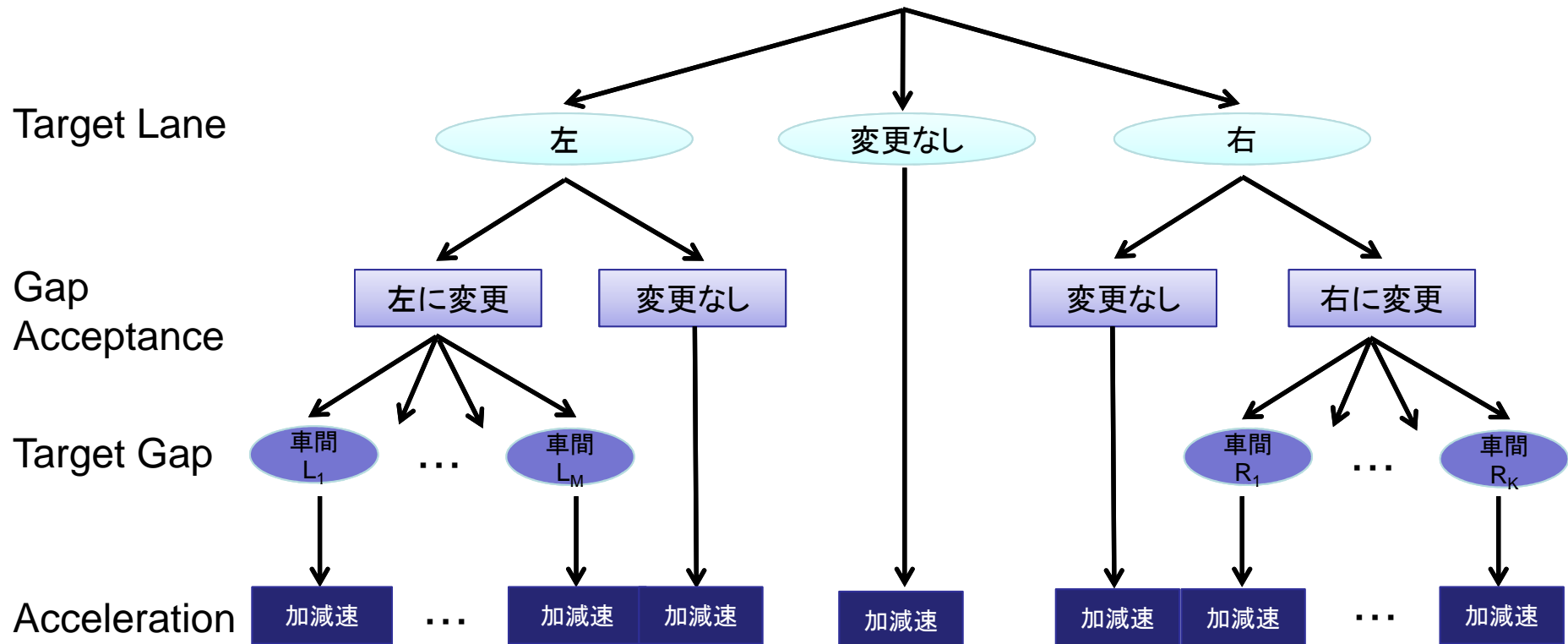


Fig. 6. The Arlington, VA case study network.

# モデル概要

- 加減速と車線変更モデルの相互依存性を考慮
- モデル構造(Nested Logit Model)



潜在的選択

何を選んだかは不明

明示的選択

実際の選択がわかる

- 意思決定の状態依存性を考慮できる.
  - ただし, 説明変数を通じて
- 各ネストでランダム効用モデルを仮定
  - 時間  $t$  における個人  $n$  が選択肢  $d$  を選択したときの効用の基本的な形

$$U_n^d(t) = \beta^d X_n^d(t) + \gamma^d EMU_n^d(t) + \alpha^d v_n + \varepsilon_n^d(t)$$

- $X_n^d(t)$  : 説明変数のベクトル
- $EMU_n^d(t)$  : 期待最大効用. 上位のレベルの選択肢が選択されたときに下位のレベルから得る効用
- $v_n$  : 個人 $n$ の属性を表す潜在変数ベクトル
- $\varepsilon_n^d(t)$ : 誤差項
- $\beta^d, \gamma^d, \alpha^d$  : パラメータベクトル

## □ 同時確率分布

$$F_n(TL(t), l(t), TG(t), a(t) | d_n, v_n, \tau_n, h_n^*) = \underbrace{P_n(TL(t) | d_n, v_n)}_{\text{Target Lane}} \underbrace{P_n(l(t) | TL(t), v_n)}_{\text{Gap Acceptance}} \\ \cdot \underbrace{P_n(TG(t) | TL(t), l(t), v_n)}_{\text{Target Gap}} \underbrace{f_n(a(t) | TL(t), l(t), TG(t), v_n, \tau_n, h_n^*)}_{\text{Acceleration}}$$

## □ 車線変更と加速の挙動のみが観測されるので.

$$f_n(l(t), a(t) | d_n, v_n, \tau_n, h_n^*) = \sum_{TL(t)} \sum_{TG(t)} F_n(TL(t), l(t), TG(t), a(t) | d_n, v_n, \tau_n, h_n^*)$$

## □ 時間 $T_n$ 間での同時確率

$$f_n(\mathbf{l}, \mathbf{a} | d_n, v_n, \tau_n, h_n^*) = \prod_{t=1}^{T_n} f_n(l(t), a(t) | d_n, v_n, \tau_n, h_n^*)$$



## □ 個人 $n$ の尤度関数

$$L_n = \int \int \int_{\tau, h^*} \sum_d f_n(\mathbf{l}, \mathbf{a} | d_n, v_n, \tau_n, h_n^*) p(d) f(h_n^*) f(\tau) f(v) dh^* d\tau dv$$

- $p(d)$  : 出口 $d_n$ で降りる確率
- $f(h^*)$  : 車頭時間間隔の分布
- $f(\tau)$  : 反応時間の分布
- $f(v)$  : 個人特性変数(標準正規分布)

$$p(d_n) = \begin{cases} \pi_1 & d_1 \\ \pi_2 & d_2 \\ 1 - \pi_1 - \pi_2 & \text{それ以外} \end{cases}$$

## □ 最大化すべき対数尤度関数(目的関数)

$$L = \sum_{n=1}^N \ln(L_n)$$



# Target lane model(推定結果)

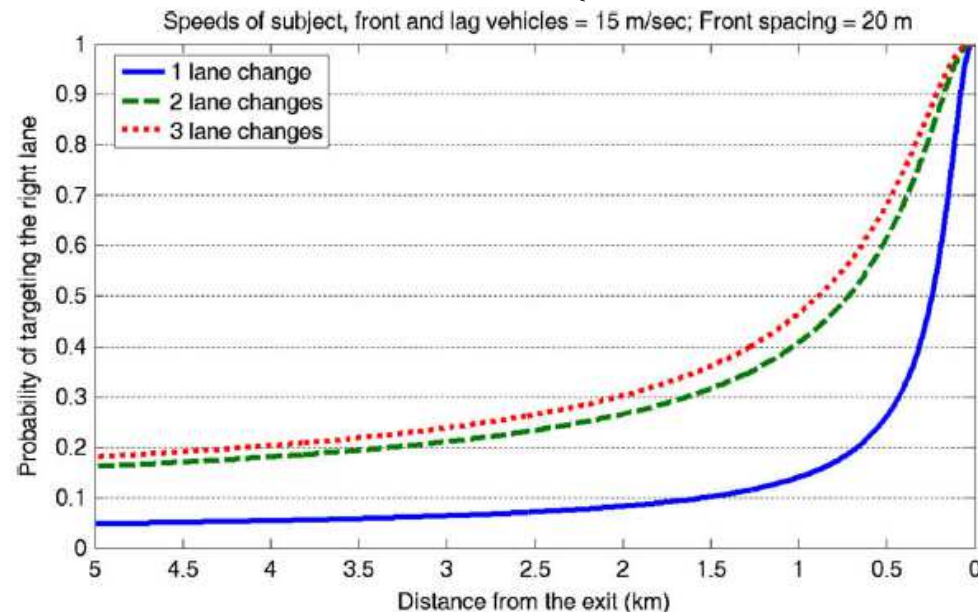
変数	パラメータ値	t値
Current lane constant	2.128	2.68
Right lane constant	- 0.369	- 1.28
Path plan impact, 1lane	- 2.269	- 5.57
Path plan impact, 2lane	- 4.466	- 7.18
Path plan impact, 3lane	- 7.265	- 8.34
$\theta^{MLC}$	- 0.358	- 2.74
Next-exit impact dummy, 1lane	- 1.264	- 2.92
Next-exit impact dummy, each additional	- 0.252	- 1.36
Front vehicle speed(m/s)	0.0745	1.78
Front vehicle spacing(m)	0.0225	3.68
Heavy neighbor dummy	- 0.218	- 0.93
Tailgate dummy	- 3.793	- 1.83
Lane density(veh/km/lane)	- 0.0018	- 1.45
Right-most lane dummy	- 1.039	- 3.85
Gap acceptance EMU	0.0052	0.41
$\pi_1$	0.0063	0.57
$\pi_2$	0.0406	1.16
$\alpha_1$	0.539	5.07
$\alpha_2$	1.035	5.15

変数	パラメータ値	t値
Path plan impact, 1lane	- 2.269	- 5.57
Path plan impact, 2lane	- 4.466	- 7.18
Path plan impact, 3lane	- 7.265	- 8.34
$\theta^{MLC}$	- 0.358	- 2.74

$$path\_plan\_impact\_j_n^{lane\ i}(t) = [d_n^{exit}(t)]^{\theta^{MLC}} \delta_n^{ji}(t) \begin{matrix} i \in \{CL, RL, LL\} \\ j \in \{1, 2, 3\} \end{matrix}$$

$d_n^{exit}$ : 出口までの距離

$$\delta_n^{j,i}(t) = \begin{cases} 1 & i \text{ から } j \text{ 車線変更する場合} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$$



変数	パラメータ値	t値
Next-exit impact dummy, 1lane	- 1.264	- 2.92
Next-exit impact dummy, each additional	- 0.252	- 1.36

$$next\_exit\_impact\_1_n^{lane\ i}(t) = \delta_n^{next\ exit}(t) \delta_n^{1,i}(t) \quad i \in \{CL, RL, LL\}$$

$$next\_exit\_impact\_add_n^{lane\ i}(t) = \delta_n^{next\ exit}(t) \delta_n^{add,i}(t) \quad i \in \{CL, RL, LL\}$$

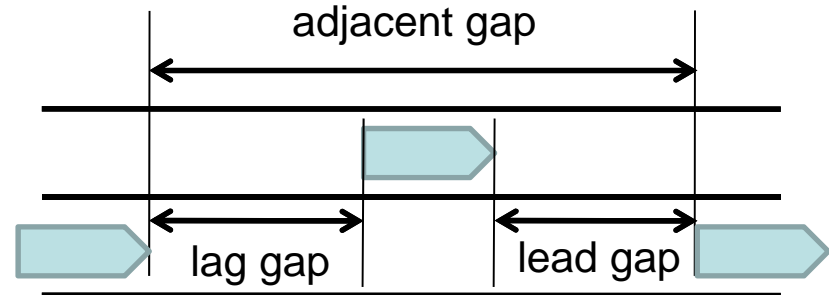
$$\delta_n^{next\ exit} = \begin{cases} 1 & \text{次のランプを利用} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$$

$$\delta_n^{add,i} = \begin{cases} 2 & \delta_n^{3,i} = 1 \\ 1 & \delta_n^{2,i} = 1 \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$$

# Gap acceptance model

- 近接する車間が車線変更に十分か判断する
- 前方と後方の車間に分けて考える
  - 臨界車間  $G_n^{gap\ i\ TL,cr}$  より大きいかどうかで判断

$$\begin{aligned} p(l_n^{TL}(t) = 1 | TL_n(t), v_n) \\ = p(G_n^{lead\ TL}(t) > G_n^{lead\ TL,cr}(t) | TL_n(t), v_n) \\ \times p(G_n^{lag\ TL}(t) > G_n^{lag\ TL,cr}(t) | TL_n(t), v_n) \end{aligned}$$



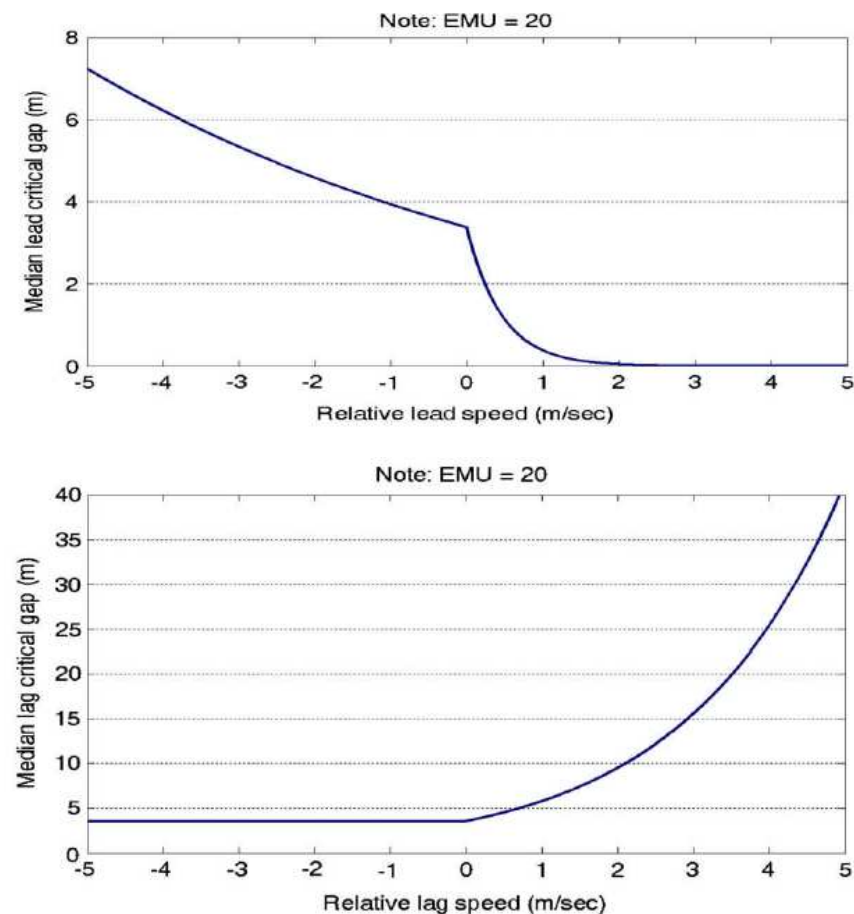
- 臨界車間は確率変数なので

$$\ln(G_n^{gap\ i, TL, cr}(t)) = X_n^{gap\ i}(t) \beta^{gap\ i} + \gamma^{gap\ i} EMU_n^{gap\ i} + \alpha^{gap\ i} v_n + \varepsilon_n^{gap\ i}(t)$$

$$gap\ i \in \{lead, lag\}$$

# Gap acceptance model(推定結果)

変数	パラメータ値	t値
<i>Lead critical gap</i>		
Constant	1.127	2.78
$Max(\Delta V_n^{lead}, 0)(m/s)$	-2.178	-0.63
$Min(\Delta V_n^{lead}, 0)(m/s)$	-0.0153	-1.86
Target gap EMU	0.0045	1.29
$\alpha^{lead}$	0.789	2.46
$\sigma^{lead}$	1.217	2.55
<i>Lag critical gap</i>		
Constant	0.968	4.18
$Max(\Delta V_n^{lag}, 0)(m/s)$	0.491	5.95
Target gap EMU	0.0152	1.65
$\alpha^{lag}$	0.0107	0.47
$\sigma^{lag}$	0.622	4.53



相対速度と臨界車間の関係

# Target gap model

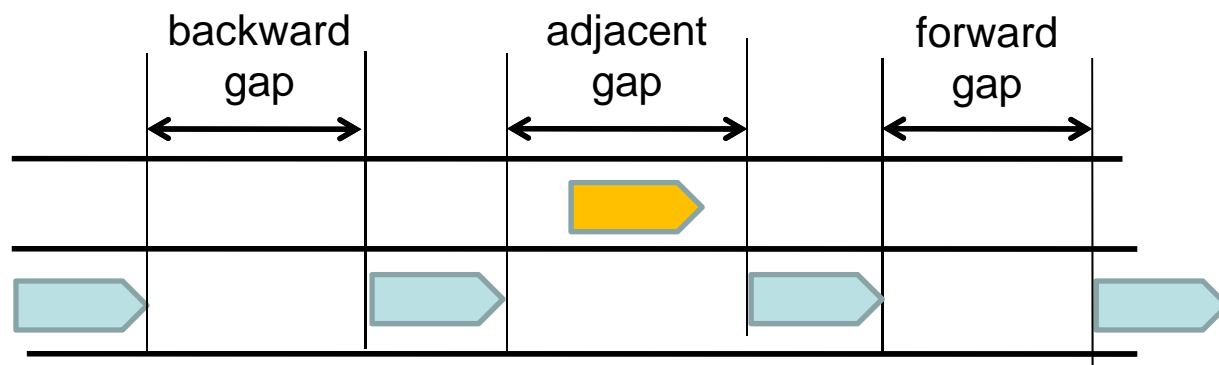
- 近接する車間が十分でないとき, どの車間で車線変更を行うか判断
- 効用関数

$$U_n^{gap\ i}(t) = X_n^{gap\ i}(t)\beta^{gap\ i} + \alpha^{gap\ i}v_n + \varepsilon_n^{gap\ i}(t)$$

- 選択確率

$$p(TG_n(t) = i | TL_n(t), l_n^{TL} = 0, v_n) = \frac{\exp(V_n^{gap\ i}(t) | v_n)}{\sum_{j \in TG(t)} \exp(V_n^{gap\ j}(t) | v_n)}$$

$gap\ i \in \{adjacent, forward, backward\}$



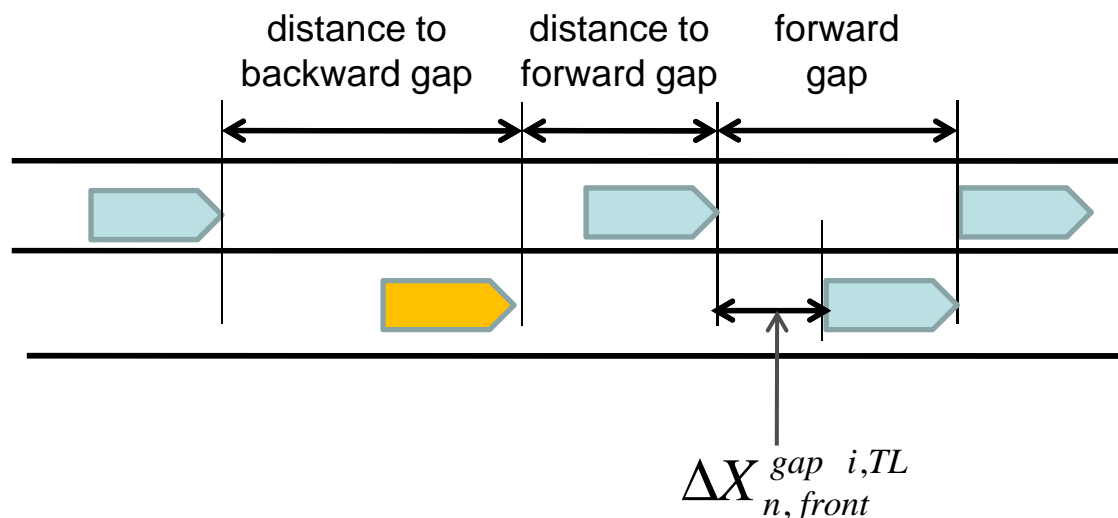


# Target gap model (推定結果)

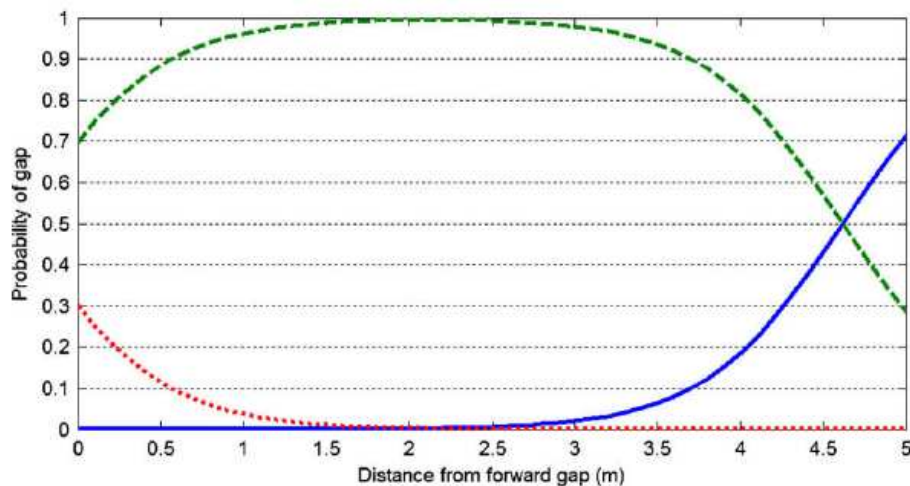
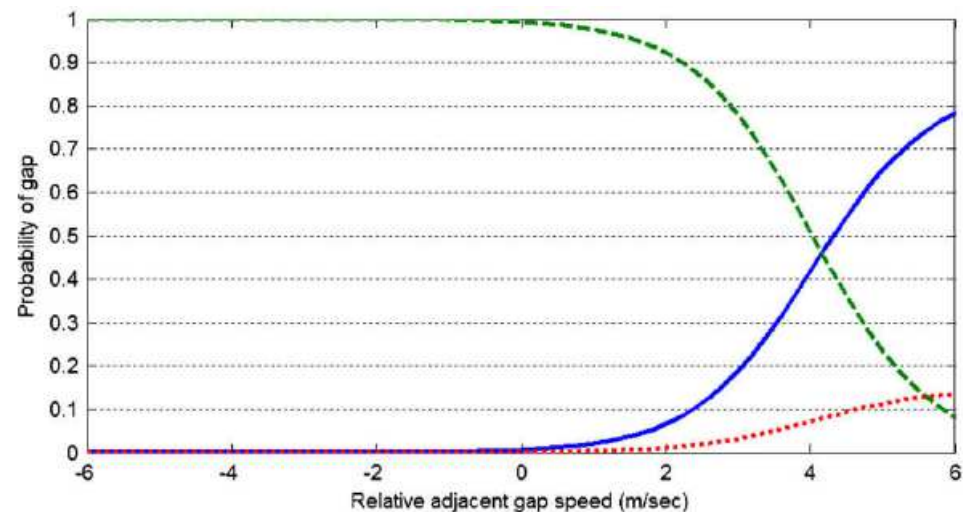
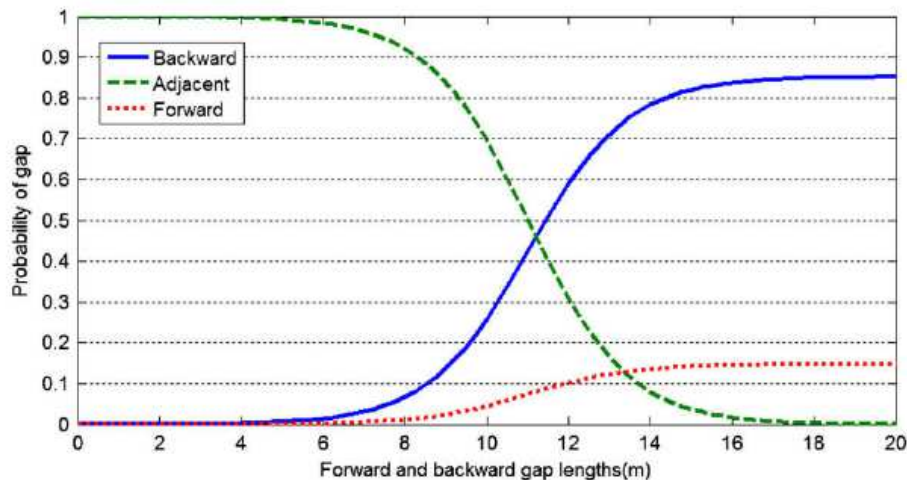
変数	パラメータ値	t値
Forward gap constant	- 0.837	- 0.50
Backward gap constant	0.913	4.40
Distance to gap (m)	- 2.393	- 7.98
Effective gap length (m)	0.816	2.20
Gap rate of change(m/s)	- 1.218	- 4.00
Front vehicle dummy	- 1.662	- 1.53
$\alpha^{back}$	0.239	0.81
$\alpha^{adj}$	0.675	0.95

Effective Gap:  $G_n^{gap i}(t)$   
 $= \text{Min}(\Delta X_n^{gap i, TL}, \Delta X_{n, front}^{gap i, TL})$

Gap rate of change:  
車間の長さ変化速度



# Target gap model(推定結果)



前方車間の長さ  
近接車間の変化速度  
前方車間までの距離  
を変数としたときの各車間の選択確率

※変数でない場合は、車間は5m,車間  
変化速度は0, 前方車間と後方車間ま  
での距離は等しいとする

- 追従走行と自由走行で加速挙動が異なる
  - 車頭時間によって挙動を決定

$$a_n^k(t) = \begin{cases} a_n^{cf}(t) & \text{if } h_n(t - \tau_n) \leq h_n^* \\ a_n^{k,uc}(t) & \text{それ以外} \end{cases}$$

- 時間tにおいてに追従走行をする確率

$$p(cf_n(t)) = p(h_n(t) \leq h_n^*) = \begin{cases} 1 & \text{if } h_n(t - \tau_n) \leq h_{\min}^* \\ \frac{\Phi\left(\frac{h_n(t - \tau_n) - \mu_h}{\sigma_h}\right) - \Phi\left(\frac{h_{\min}^* - \mu_h}{\sigma_h}\right)}{\Phi\left(\frac{h_{\max}^* - \mu_h}{\sigma_h}\right) - \Phi\left(\frac{h_{\min}^* - \mu_h}{\sigma_h}\right)} & \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$$

# Car-following model

## □ 外部に対する反応 (GMモデル)

$$response_n^r(t) = sensitivity_n^r(t) \times stimulus_n^r(t - \tau_n) + \varepsilon_n^r(t)$$

## □ 前方の車両の影響を受ける追従走行

$$a_n^{cf}(t) = \begin{cases} a_n^{cfacc}(t) & \text{if } \Delta V_n(t - \tau_n) \geq 0 \\ a_n^{cfdec}(t) & \text{それ以外} \end{cases}$$

## □ GMモデルに対応させると

$$a_n^g(t) = s^g[X_n^g(t)] f^g[\Delta V_n(t - \tau_n)] + \varepsilon_n^g(t)$$
$$= \alpha^g V_n(t)^{\beta g} \Delta X_n(t)^{\gamma g} k_n(t)^{\rho g} |\Delta V_n(t - \tau_n)|^{\lambda g} + \varepsilon_n^g(t)$$

$$s^g[X_n^g(t)] = \alpha^g V_n(t)^{\beta g} \Delta X_n(t)^{\gamma g} k_n(t)^{\rho g}$$

$$f^g[\Delta V(t - \tau_n)] = |\Delta V(t - \tau_n)|^{\lambda g}$$

$$g \in \{cfacc, cfdec\}$$

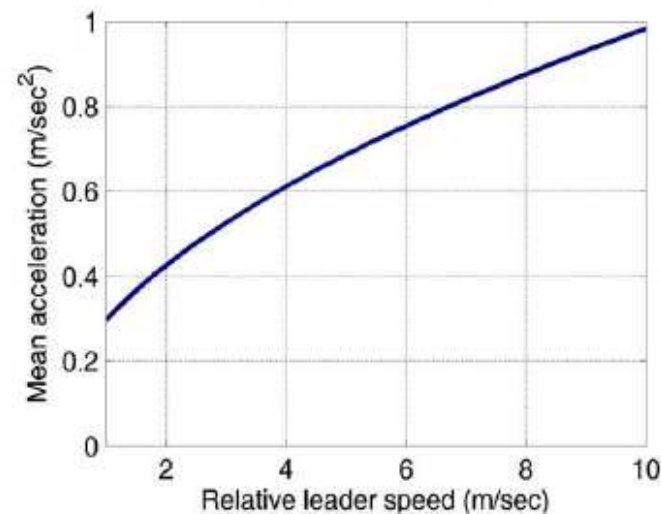
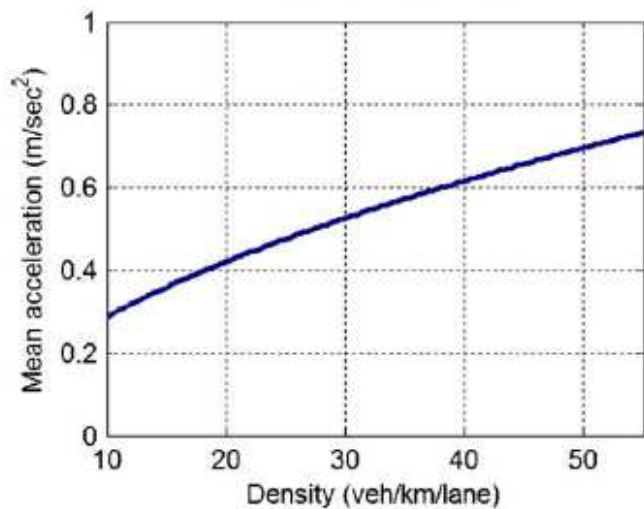
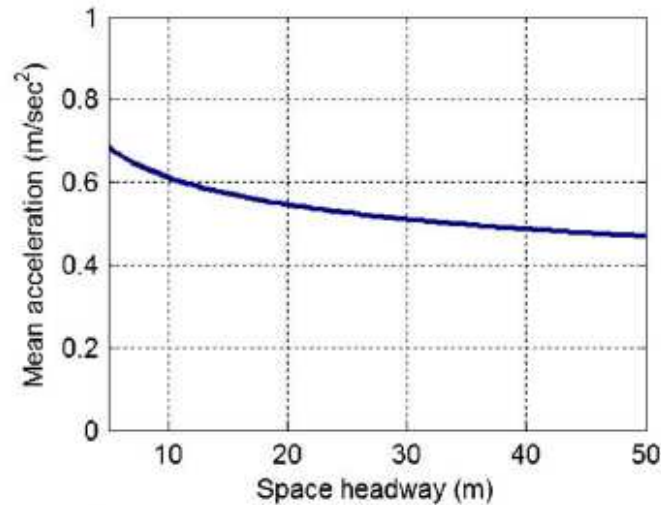
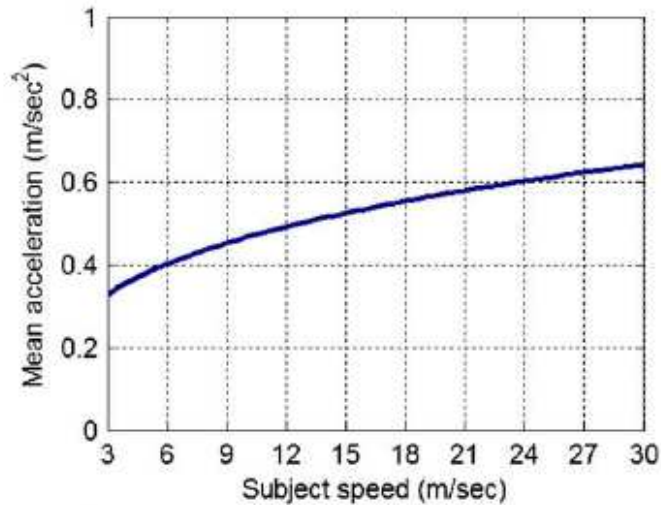
# Car-following model) (推定結果)

□ 加速度も確率分布となるので

$$f(a_n^r(t) | \tau_n) = \frac{1}{\sigma_r} \phi \left( \frac{a_n^r(t) - s^r[\cdot] f^r[\cdot]}{\sigma_r} \right)$$

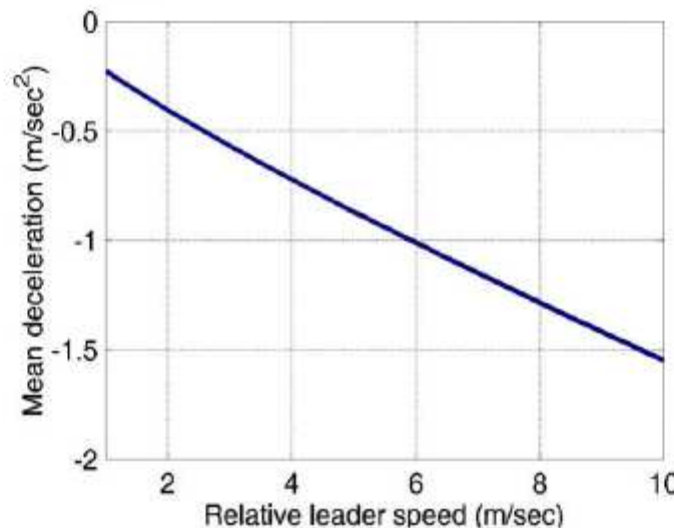
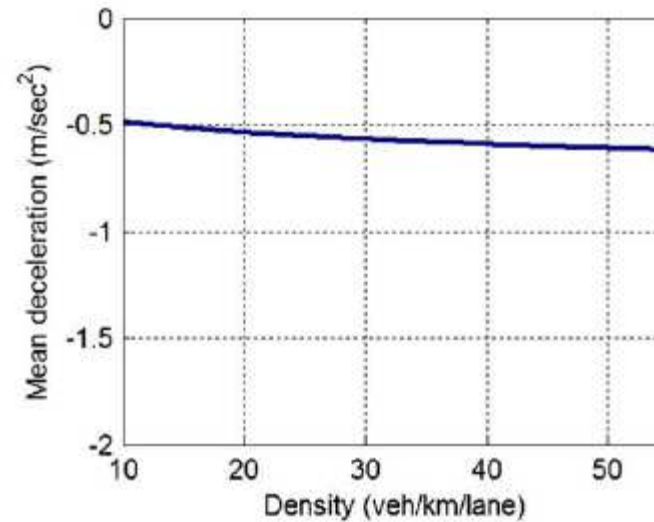
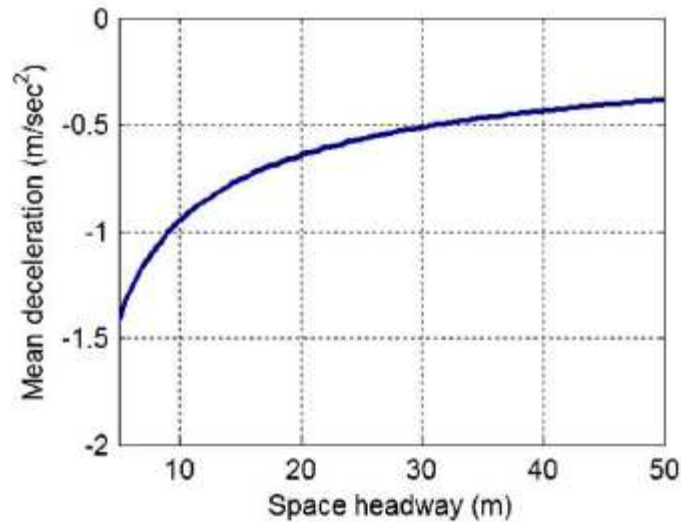
変数	加速		減速	
	パラメータ値	t値	パラメータ値	t値
Relative speed(m/s)	0.520	7.97	0.834	12.68
Sensitivity constant	0.036	1.21	- 0.860	- 3.92
Space headway(m)	- 0.166	- 1.68	- 0.565	- 9.51
Speed(m/s)	0.291	5.64	-	-
Density(veh/km/lane)	0.550	2.50	- 0.143	- 2.04
$\ln(\sigma_{cf,acc})$	0.126	12.05	0.156	14.87

## □ 各変数に対する加速挙動変化



※変数でない場合,  
車両速度: 15m/s  
車頭間隔: 25m  
密度: 30(veh/km/lane)  
前方車両相対速度: 3m/s  
に固定

## □ 各変数に対する減速挙動変化



※変数でない場合,  
 車両速度: 15m/s  
 車頭間隔: 25m  
 密度: 30(veh/km/lane)  
 前方車両相対速度: 3m/s  
 に固定

## □ 前方の車両の影響を受けない自由走行

$$a_n^{ff}(t) = \lambda^{ff} [V_n^{DS}(t - \tau_n) - V_n(t - \tau_n)] + \varepsilon_n^{ff}(t)$$

$$V_n^{DS}(t - \tau_n) = X_n^{DS}(t - \tau_n)\beta^{DS} + \alpha^{DS}V_n$$

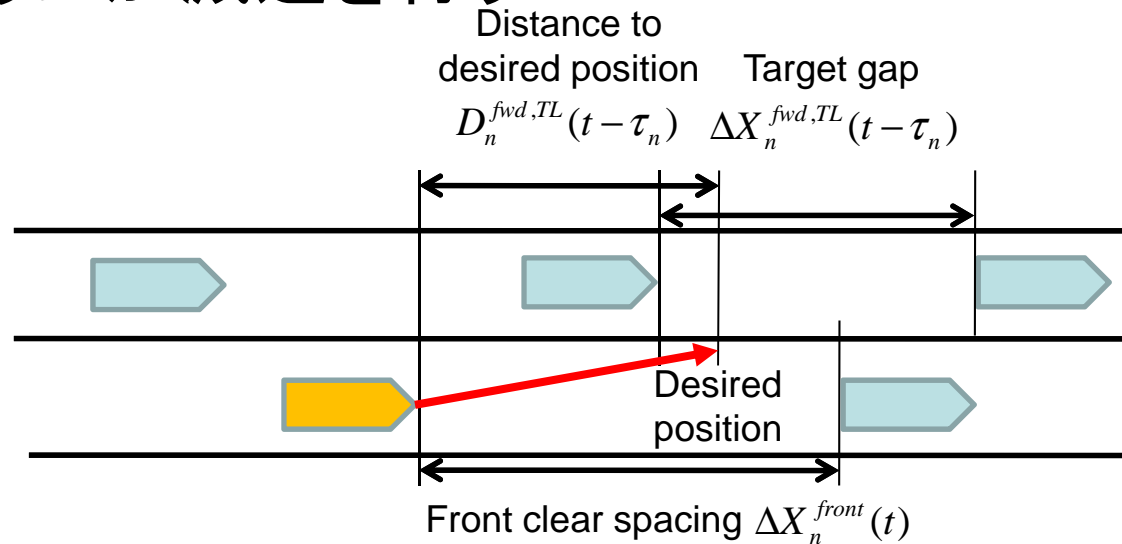
## □ 推定結果

変数	パラメータ値	t値
<i>Free-flow acceleration</i>		
Sensitivity constant	0.0881	11.20
$\ln(\sigma_{ff})$	0.169	10.36
<i>Desired speed</i>		
Constant	17.636	61.26
heavy vehicle dummy	-1.458	-1.12
$\alpha^{DS}$	-0.105	-0.40



# Target gap acceleration model

- 近接車間に車線変更できない場合，車間に入れるように加減速を行う



$$a_n^{tg}(t) = s^{tg} [X_n^{tg}(t)] f^{tg} [D_n^{tg}(t - \tau_n)] + \varepsilon_n^{tg}(t)$$

$$f^{tg} [D_n^{tg}(t - \tau_n)] = (D_n^{tg}(t - \tau_n))^{\gamma^{tg}}$$

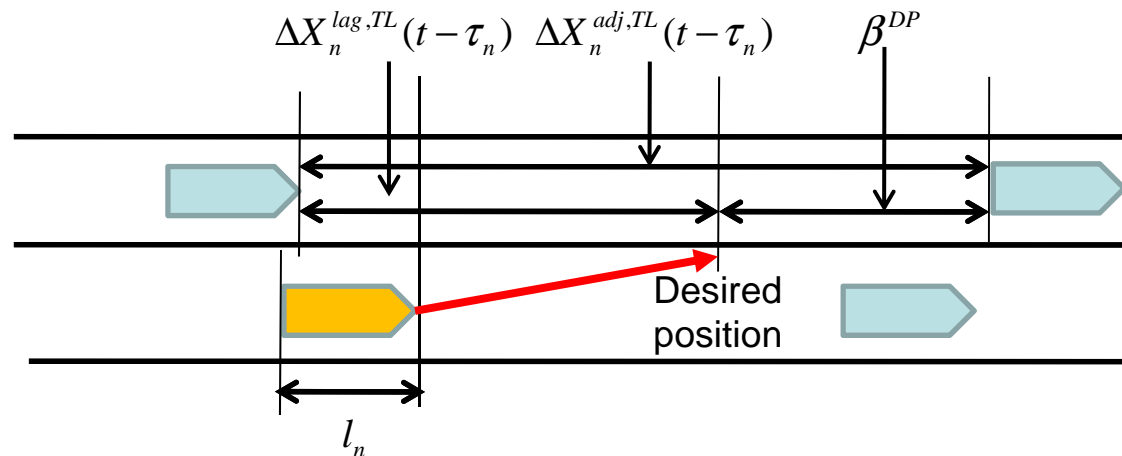
$$s^{tg} [X_n^{tg}(t)] = \alpha^{tg} V_n(t)^{\beta^{tg}} \exp[\lambda_+^{tg} \Delta V_n^{g,TL}(t)_+] \exp[\lambda_-^{tg} \Delta V_n^{g,TL}(t)_-]$$

$$tg = fwd, bck \quad g = \begin{cases} lead & \text{if } tg = fwd \\ lag & \text{if } tg = bck \end{cases} \quad \begin{aligned} \Delta V_n^{g,TL}(t)_+ &= \max(0, \Delta V_n^{g,TL}(t)) \\ \Delta V_n^{g,TL}(t)_- &= \min(0, \Delta V_n^{g,TL}(t)) \end{aligned}$$

## □ 近接車間に車線変更するために加速する場合

$$a_n^{tg}(t) = \alpha^{adj} f^{tg} [D_n^{tg}(t - \tau_n)] + \varepsilon_n^{tg}(t)$$

$$f^{adj} [X_n^{adj,TL}(t - \tau_n)] = \beta^{DP} X_n^{adj,TL}(t - \tau_n) - (X_n^{lag,TL}(t - \tau_n) + l_n)$$

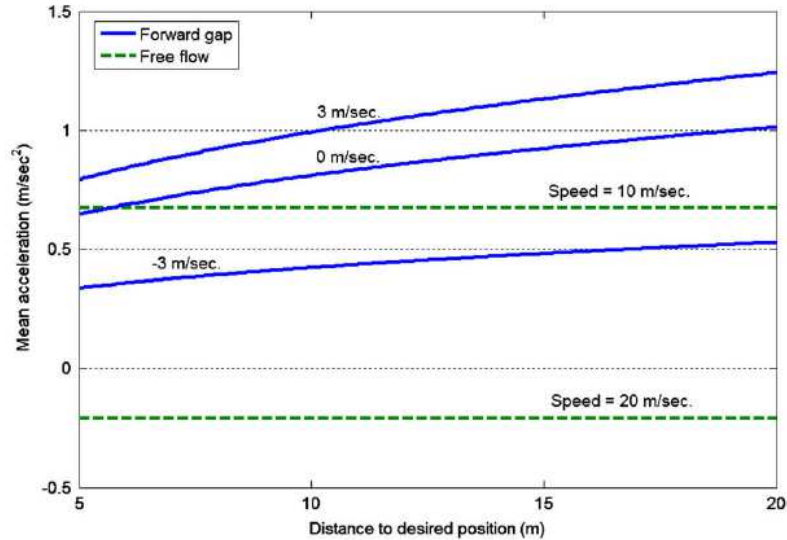


# Target gap acceleration model(推定結果)

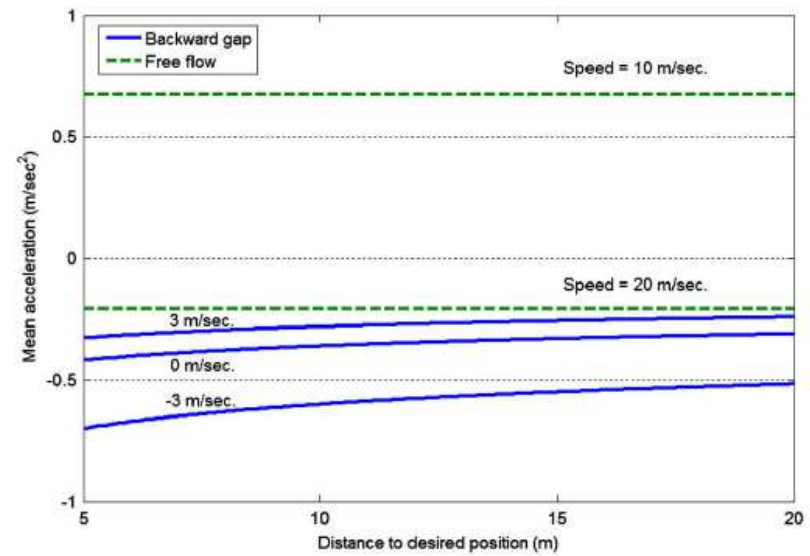
変数	パラメータ値	t値
<i>Forward gap acceleration</i>		
Constant	0.385	1.39
Distance to desired position(m)	0.323	2.03
$\exp[\Delta V_n^{lead,TL}(t)_+](m/s)$	0.0678	1.13
$\exp[\Delta V_n^{lead,TL}(t)_-](m/s)$	0.217	(-) 2.52
$\ln(\sigma_{fwd}^n)$	- 0.540	- 0.72
<i>Backward gap acceleration</i>		
Constant	- 0.596	- 1.56
Distance to desired position(m)	- 0.219	- 3.34
$\exp[\Delta V_n^{lag,TL}(t)_+](m/s)$	- 0.0832	- 1.15
$\exp[\Delta V_n^{lag,TL}(t)_-](m/s)$	(-) 0.170	1.44
$\ln(\sigma_{bck}^n)$	0.391	1.86
<i>Adjacent gap acceleration</i>		
Constant	0.131	2.29
$\ln(\sigma_{adj}^n)$	- 1.202	- 2.50

# □ 各車間への距離に対する加速度変化(相対速度別)

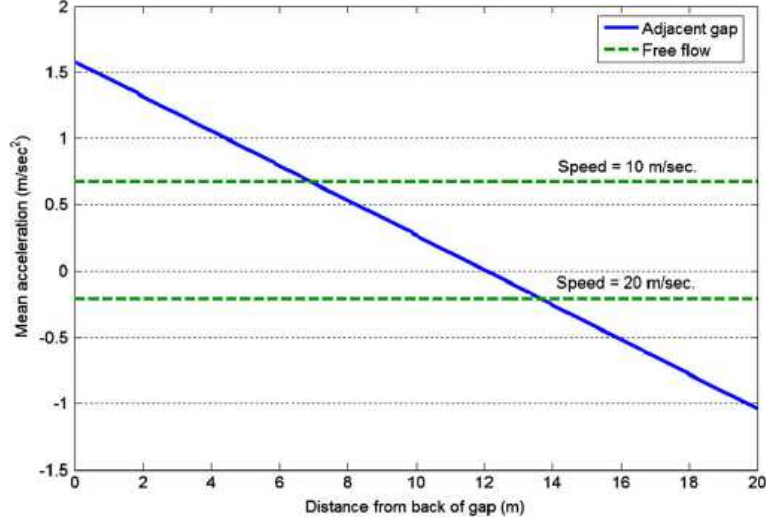
前方車間への距離



後方車間への距離



近接車間の後端からの距離



- 車線変更と加減速挙動の相互依存性を表現
- 最尤推定法でパラメータ推定
- 問題点
  - 1秒間隔のデータを利用
    - 他のモデルに適用する場合, パラメータをそのまま使えない
  - 反応時間・車頭時間分布は一律
    - 挙動によって分布は異なるはず
  - 時間ごとに変わる短期的目標と走行計画の状態依存性を表現していない



おわり