

車線変更が必須である交通環境下における他車の割り込み場所の推定

○杉本 瑞生（東京大学）， Woo Hanwool（東京大学）， 田村 雄介（東京大学），
山崎 慎也（マツダ株式会社技術研究所）， 黒田 康秀（マツダ株式会社技術研究所），
菅野 崇（マツダ株式会社技術研究所）， 山本 康典（マツダ株式会社技術研究所），
山下 淳（東京大学）， 浅間 一（東京大学）

Estimation of Other Vehicles' Cutting-in Places in Mandatory Lane-Change Situations

○ Mizuki SUGIMOTO (The University of Tokyo), Hanwool WOO (The University of Tokyo),
Yusuke TAMURA (The University of Tokyo), Shinya YAMASAKI (Mazda),
Yasuhide KURODA (Mazda), Takashi SUGANO (Mazda), Yasunori YAMAMOTO (Mazda),
Atsushi YAMASHITA (The University of Tokyo), and Hajime ASAMA (The University of Tokyo)

Abstract : Car crashes tend to occur when lane-change. If it is possible to detect lane-change before surrounding vehicles cross the centerline, accident rates should be decreased. In this study, we estimate other vehicles' cutting-in places in the situation where two lanes are merged. We propose the estimation method based on gap acceptance model. We evaluated the performance using real traffic data.

1. 序論

交通事故は減少傾向にあるが、依然として死亡事故の主な原因の1つである。警視庁の調査によると、交通事故の約9割が人為的要因により発生している¹⁾。近年、交通事故の解決策として自動運転技術や運転支援システムに関する開発が目されており、こうしたシステムを開発する上では自車の安全確保が必要である。そのため、周辺車両の運転者が数秒後にどのような状態を実現したいのかという運転意図の推定が重要である。特に交通事故が発生しやすい車線変更の推定ができれば、交通事故の軽減に大きく貢献できる。

実際に運転者が最も車線変更を行う場面は、合流等の車線変更が必須である交通環境下である。そのため、車線変更が必須である交通環境下を仮定した他車の車線変更推定が必要である。Wooらは隠れマルコフモデルを用いて、他車が車線変更を行うか否かという車線変更推定手法を提案した²⁾。この研究では、追い越し等の車線変更が必須でない交通環境下を仮定した車線変更推定を行っているが、車線変更が必須である交通環境下を仮定した他車の車線変更推定を行っていない。

また、合流等の車線変更が必須である交通環境下では、他車がどの場所へ割り込むのかを他車が実際に割り込む前にわかっていると、自車の運転者は加減速等の運転操作をして割り込みに必要な車間を確保する等の対応行動が取りやすい。そのため、合流等の車線変更が必須である交通環

境下では、他車がどの場所に割り込むのかの推定が重要である。Toledoらは変更後の車線の前後車両との車間距離に基づいて車線変更の可能性を評価するGap acceptance modelを用いた他車の車線変更推定手法を提案した³⁾。この研究では、追い越し等の車線変更が必須でない交通環境下、合流等の車線変更が必須である交通環境下、双方の交通環境下を仮定し、他車が車線変更を行うか否かという車線変更推定を行ったが、他車がどの場所に割り込むのかという推定は行っていない。

以上の問題点を踏まえ、本研究では、合流等の車線変更が必須である交通環境下において、他車がどの場所に割り込むのかという割り込み場所の推定を研究目的とする。本研究では、Fig. 1に示すような合流部分を想定する。割り込み場所の候補は、本線車線を走行する車両中、推定対象となるTarget（合流車線上を走行する車両）の直前を走行するLead及びTargetの直後を走行するRearを境界とする本線車線上の領域Space 1, Space 2, Space 3と定義す

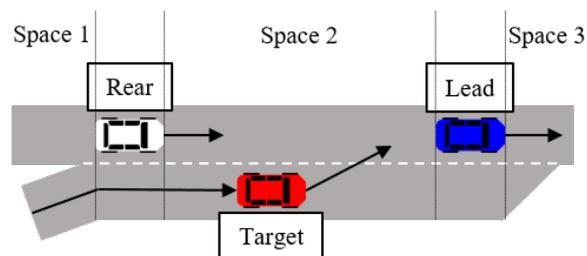


Fig. 1: The problem setting of this study

る。そして、Gap acceptance model を用いて、Space 1, Space 2, Space 3 の3つのどの割り込み場所へ車線変更を行うのかを推定する。提案手法の有効性評価は実交通データを用いて行う。

2. 提案手法

提案手法では、割り込み場所の推定を行うために新たに定義した条件分岐に従って、Gap acceptance model を用いて推定を行う。

Gap acceptance model は Fig. 2 に示すように、変更先の車線を走行している車両との車間距離に基づいて車線変更の可能性を評価する手法である。この手法では、Target の車線変更先である本線車線を走行する Lead 及び Rear との車間距離 G_l , G_r と、運転者が車線変更を実行するのに必要最小限の Lead 及び Rear との車間距離 (Critical gap) G_l^{cr} , G_r^{cr} とを比較することで、Target 車の車線変更の可能性を評価する。具体的には、 G_l が G_l^{cr} より大きく、 G_r が G_r^{cr} より大きい場合、Target は Lead と Rear との間への車線変更に必要なスペースの余裕が十分にあるため、Target は車線変更を実行すると仮定する。それ以外の場合、Target は車線変更を実行しないと仮定する。このように場合分けを行い、それぞれの場合の確率を算出して比較し、最も確率の高い場合を推定結果として出力する。

本研究では、Target が Space 1, Space 2, Space 3 の3つのどの割り込み場所に車線変更を行うのかを推定するために、Fig. 3 に示すように新たに運転者が車線変更を実行する可能性を次のように仮定する。

Lead との車間距離 G_l が Lead 車との Critical gap G_l^{cr} より大きく、Rear との車間距離 G_r が Rear との Critical gap G_r^{cr} より小さい場合、Target は Space 2 への車線変更に必要なスペースの余裕がなく、Space 1 に近い。そのため、Target は Rear に追い越されるのを待って Space 1 への車線変更を実行すると仮定する。

G_l が G_l^{cr} より大きく、 G_r が G_r^{cr} より大きい場合、Tar-

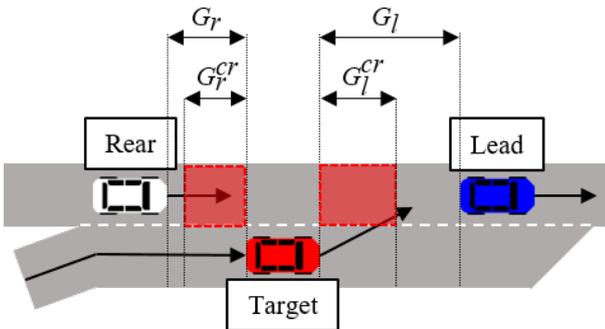
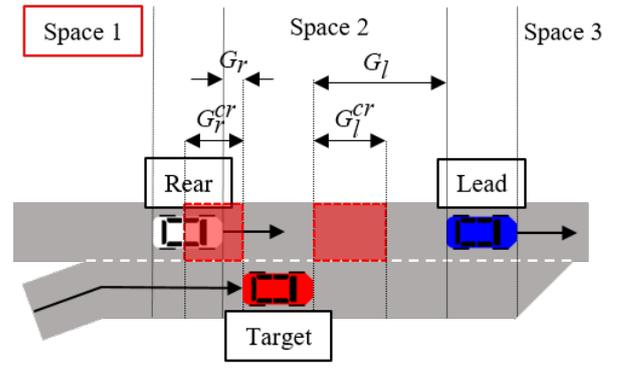
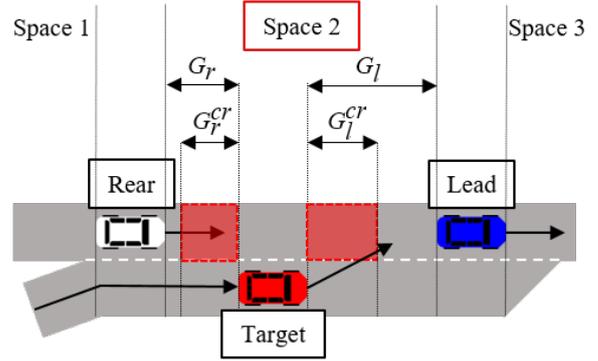


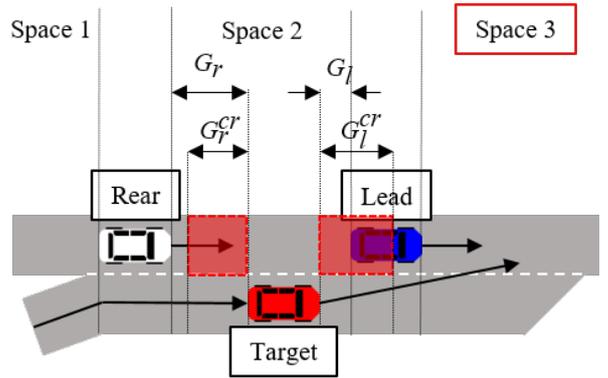
Fig. 2: Gap acceptance model



(a) A situation when the target vehicle cuts in space 1



(b) A situation when the target vehicle cuts in space 2



(c) A situation when the target vehicle cuts in space 3

Fig. 3: The proposed method

get は Space 2 への車線変更に必要なスペースの余裕があるため、Space 2 への車線変更を実行すると仮定する。

G_l が G_l^{cr} より小さく、 G_r が G_r^{cr} より大きい場合、Target は Space 2 への車線変更に必要なスペースの余裕がなく、Space 3 に近い。そのため、Target は Lead を追い越して、Space 3 への車線変更を実行すると仮定する。

このように場合分けを行い、それぞれの場合の確率を算出して比較し、最も確率の高い場合を推定結果として出力する。但し、 G_l が G_l^{cr} より小さく、 G_r が G_r^{cr} より小さい場合は、今回は考えない。

Space 1, Space 2, Space 3 への車線変更を実行する確

率 $P(\text{Space 1})$, $P(\text{Space 2})$, $P(\text{Space 3})$ は次式となる.

$$\begin{aligned} P(\text{Space 1}) &= P(\text{accept lead gap}|v) \times P(\text{reject rear gap}|v) \\ &= P(G_l(t) > G_l^{cr}(t)|v) \times P(G_r(t) < G_r^{cr}(t)|v) \\ &= P(G_l(t) > G_l^{cr}(t)|v) \\ &\quad \times (1 - P(G_r(t) > G_r^{cr}(t)|v)), \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(\text{Space 2}) &= P(\text{accept lead gap}|v) \times P(\text{accept rear gap}|v) \\ &= P(G_l(t) > G_l^{cr}(t)|v) \\ &\quad \times P(G_r(t) > G_r^{cr}(t)|v), \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(\text{Space 3}) &= P(\text{reject lead gap}|v) \times P(\text{accept rear gap}|v) \\ &= P(G_l(t) < G_l^{cr}(t)|v) \times P(G_r(t) > G_r^{cr}(t)|v) \\ &= (1 - P(G_l(t) > G_l^{cr}(t)|v)) \\ &\quad \times P(G_r(t) > G_r^{cr}(t)|v), \quad (3) \end{aligned}$$

ここで, $G_l(t)$ は時刻 t における Lead との車間距離を, $G_l^{cr}(t)$ は時刻 t における Lead に対する Critical gap を, $G_r(t)$ は時刻 t における Rear との車間距離を, $G_r^{cr}(t)$ は時刻 t における Rear に対する Critical gap を表す. また, v は運転者の運転特性を表す変数である.

Lead 及び Rear に対して車線変更を実行する確率 $P(G_l(t) > G_l^{cr}(t)|v)$, $P(G_r(t) > G_r^{cr}(t)|v)$, Lead 及び Rear の時刻 t における Critical gap $G_l^{cr}(t)$, $G_r^{cr}(t)$ は, 従来研究を参考に求める⁴⁾. Lead 及び Rear に対して車線変更を実行する確率 $P(G_l(t) > G_l^{cr}(t)|v)$, $P(G_r(t) > G_r^{cr}(t)|v)$ は次式となる.

$$\begin{aligned} P(G_l(t) > G_l^{cr}(t)|v) &= P(\ln(G_l(t)) > \ln(G_l^{cr}(t))|v) \\ &= \Phi\left(\frac{\ln(G_l(t)) - \ln(G_l^{cr}(t))}{\sigma_l}\right), \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(G_r(t) > G_r^{cr}(t)|v) &= P(\ln(G_r(t)) > \ln(G_r^{cr}(t))|v) \\ &= \Phi\left(\frac{\ln(G_r(t)) - \ln(G_r^{cr}(t))}{\sigma_r}\right), \quad (5) \end{aligned}$$

ここで, $\Phi(\cdot)$ は累積標準正規分布を表し, σ_l は毎時刻に計測された Lead との車間距離の標準偏差, σ_r は毎時刻に計測された Rear との車間距離の標準偏差である.

Lead 及び Rear に対する時刻 t における Critical gap $G_l^{cr}(t)$, $G_r^{cr}(t)$ は次式となる.

$$\begin{aligned} \ln(G_l^{cr}(t)) &= \gamma_l + \alpha_{l1} \max(0, \Delta V_l(t)) \\ &\quad + \alpha_{l2} \min(0, \Delta V_l(t)) + \beta_l v(t), \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ln(G_r^{cr}(t)) &= \gamma_r + \alpha_{r1} \max(0, \Delta V_r(t)) \\ &\quad + \alpha_{r2} \min(0, \Delta V_r(t)) + \beta_r v(t), \quad (7) \end{aligned}$$

ここで, α_{l1} , α_{l2} , β_l , γ_l , α_r , β_r , γ_r は係数である. また, $\Delta V_l(t)$ は時刻 t における Target と Lead との相対速度を, $\Delta V_r(t)$ は時刻 t における Target と Rear との相対速度を表す.

このようにして Target が割り込み場所 Space 1, Space 2, Space 3 への車線変更を実行する確率 $P(\text{Space 1})$, $P(\text{Space 2})$, $P(\text{Space 3})$ を算出し, 最も確率の高い割り込み場所を推定結果として, Target が観測され始めた時刻から本線車線への車線変更を実行する時刻まで毎時刻出力する.

3. シミュレーション実験

3.1 シミュレーション条件

本研究では, 米国連邦道路管理局 (FHWA) が公開しているカメラから測定された交通データを用いて, 提案手法の有効性評価を行った⁵⁾. 使用した交通データは, ロサンゼルス市内における国道 101 号線 (US 101) を通る車両群を高層ビルの屋上からカメラにより計測された. 道路は本線車線 5 車線, 合流車線 1 車線, 計測範囲は 640 m であり, 0.1 秒毎の車両群データを 1 回につき 15 分間, 合計 3 回の計測が行われた. 計測された車両の中から合流車線から本線車線へ車線変更を行った車両を Target とし, 提案手法の有効性評価を行った.

また, Critical gap を算出するために必要となる係数の設定値を Table 1 に示す. この値は, 実交通データを用いた回帰式により求めた従来研究を参考にした⁴⁾. 本研究では, 運転者の運転特性は平常であるとし, 運転者の運転特性を表す変数 v は 0 とした.

Table 1: Setting values of coefficient in critical gap calculation

α_{l1}	-6.323
α_{l2}	-0.155
β_l	0.099
γ_l	1.706
σ_l	0.939
α_r	0.512
β_r	0.211
γ_r	1.429
σ_r	0.775

3.2 シミュレーション結果

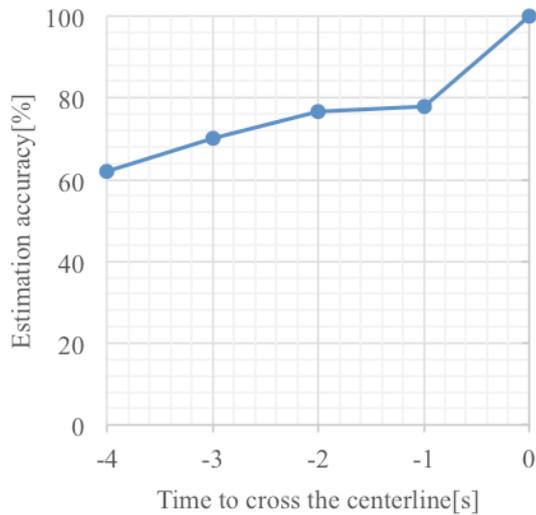


Fig. 4: Temporal change in estimation accuracy

提案手法の有効性の評価は、提案手法により推定された割り込み場所と、実際の割り込み場所とを比較した。その結果、Target が車線変更を実行する 4 秒前から実際に車線変更を実行するまでの 1 秒毎の推定精度の時間変化を Fig. 4 に示す。推定精度は、Target が実際に車線変更を実行するまで 4 秒前では 62%、3 秒前では 70%、2 秒前では 77%、1 秒前では 78% となり、実際に車線変更を実行する時刻に近づくにつれて推定精度が上がった。

また、評価データ中の 1 つの車線変更ケースにおける推定結果を Table 2 に示す。時刻は、Target が合流車線で観測され始めた時刻を 0 秒とし、本線車線へ車線変更を行うまでの経過時刻を表す。また、この時の各車の挙動を Fig. 5 に示す。本線車線で観測された車両を、車両の進行方向後ろから車両 1、車両 2、車両 3 とする。このケースでは、Target は時刻 3.3 秒から 3.4 秒の間で車両 2 を追い越し、時刻 8.3 秒で車両 2 と車両 3 の間へ車線変更を行った。結果は、時刻 0 秒から 3.3 秒までは実際の割り込み場所と同じ正しい場所が推定された。時刻 3.4 秒から 4.5 秒までは

Table 2: An example of estimation results in real traffic data

Time[s]	Estimated cutting-in place	Actual cutting-in place	Evaluation
0 - 3.3	Space 3	Space 3	True
3.4 - 4.5	Space 1	Space 2	False
4.6 - 8.3	Space 2	Space 2	True

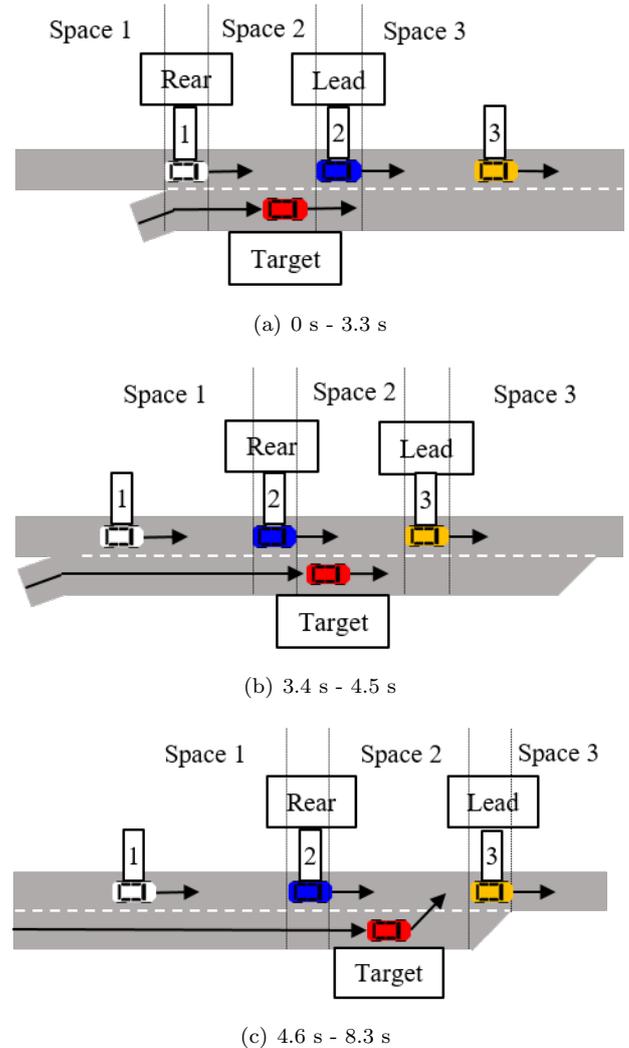


Fig. 5: Behavior of each vehicle in the example

実際の割り込み場所と異なる誤った場所が推定された。時刻 4.6 秒から 8.3 秒までは実際の割り込み場所と同じ正しい場所が推定された。

3.3 考察

運転中の人の反応時間の平均は約 1 秒であり、その大部分は 0.4~1.6 秒に分布している⁶⁾。そのため、Target が実際に車線変更を実行するまで 1 秒前及び 2 秒前の推定精度が重要である。本研究では実交通データによるシミュレーション実験の結果、Target が実際に車線変更を実行するまで 1 秒前における推定精度は 78%、2 秒前における推定精度は 77% と、共に 8 割近く高い精度が得られた。このことから、本研究の提案手法は有効であると考えられる。

また、3.2 で示した評価データ中の 1 つの車線変更ケースにおける推定結果のうち、Fig. 6 に示すような推定を誤った時刻 3.4 秒から 4.5 秒の場合を検討する。この場合では、Target と Lead (車両 3) との車間距離が Critical

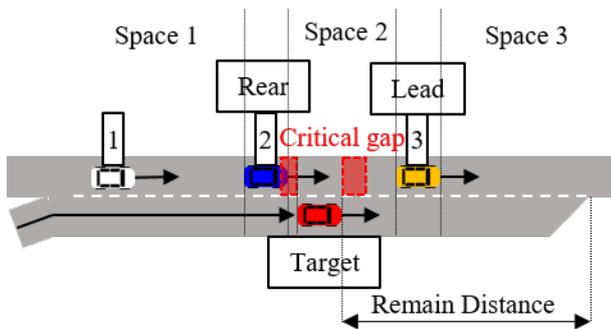


Fig. 6: The case of 3.4 - 4.5 s in the example

gap より大きく、Target と Rear (車両 2) との車間距離が Critical gap より小さいため、Target は Rear (車両 2) に追い越されるのを待って Space 1 (車両 2 の後ろ) へ割り込むと推定された。しかし、実際には 3.3 秒から 3.4 秒の間に Target が車両 2 を追い越しており、合流車線の残存距離 (Remain Distance) が十分に残っている。これらを考慮すると、Target はわざわざ車両 2 に追い越されるのを待つことをせず、Space 2 (車両 2 と車両 3 の間) かそれよりも前の場所へ割り込むことを期待される。このような誤った推定が散見されたため、推定精度向上には、Target が数秒前に追い越しを行ったかどうか、合流車線の残存距離が十分に残っているかどうか等の他の情報を考慮する必要があると考えられる。

4. 結論

本研究では、合流等の車線変更が必須である交通環境下における他車の割り込み場所の推定手法の構築を行った。提案手法では、Gap acceptance model を用いて Target が本線車線の Space 1, Space 2, Space 3 の 3 つのどの割り込み場所へ車線変更を行うのかを推定し、実交通データを用いてその有効性評価を行った。その結果、推定精度は、Target が実際に車線変更を実行するまで 4 秒前では 62%、3 秒前では 70%、2 秒前では 77%、1 秒前では 78% となり、実際に車線変更を実行する時刻に近づくにつれて推定精度が上がった。

今後は、推定精度向上のために、Target と Lead 及び Rear との車間距離と Critical gap とを単純に比較するだけでなく、Target が数秒前に追い越しを行ったかどうか、合流車線の残存距離が十分に残っているかどうか等の他の情報を考慮する手法の構築を計画している。また、従来研究で提案された車線変更を行う意図の推定手法と、本研究で提案した割り込み場所の推定手法を組み合わせる等、総合的な車線変更推定システムの構築を計画している²⁾。

参考文献

- 1) 警視庁: “平成 29 年中の交通事故の発生状況”, <https://www.npa.go.jp/news/release/2018/20180213001H29zennjiko.html> (Access: 29th June 2018).
- 2) H. Woo, Y. Ji, H. Kono, Y. Tamura, Y. Kuroda, T. Sugano, Y. Yamamoto, A. Yamashita, and H. Asama: “Automatic Detection Method of Lane-Changing Intentions Based on Relationship with Adjacent Vehicles Using Artificial Potential Fields”, *International Journal of Automotive Engineering (IJAE)*, Vol.7, No.4, pp.127-134, (2016).
- 3) T. Toledo, H. N. Koutsopoulos, and M. E. Ben-Akiva: “Modeling Integrated Lane-Changing Behavior”, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, Vol.1857, pp.30-38, (2003).
- 4) T. Toledo, and R. Katz: “State Dependence in Lane-Changing Models”, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, Vol.2124, pp.81-88, (2009).
- 5) Federal Highway Administration (FHWA) : “Next Generation Simulation (NGSIM)”, <https://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/ngsim.htm> (Access: 29th June 2018).
- 6) H. Makishita and K. Matsunaga: “The Brake Reaction Time To A Sudden Hazard While Driving”, *人間工学*, Vol. 38, No.6, pp.324-332, (2002).