

ドライバー挙動モデルの開発

加納 誠*¹ 白石智良*¹ 丸岡勝幸*¹ 石川裕記*¹ 見持圭一*¹ 山本隆嗣*¹ 酒井繭美*¹ 辻 求*¹ 桑原雅夫*²
東京大学国際・産学共同研究センター*¹ 東京大学生産技術研究所*²

交通流シミュレータとドライビングシミュレータを結合したシステムでは、仮想交通環境下で被験者の運転挙動を計測/解析でき、また、被験者の運転挙動を交通流シミュレータに反映できることから、被験者のドライバー挙動と交通状況への影響の両面から、ITS サービスの評価ができる。このシステムではシミュレータで制御される車両の挙動も実際の車両挙動に近づけ、周辺車両と相互作用しながら行動を決定し、走行する必要がある。本稿では複数の行動モデルを有し、認知情報によって一つの行動モデルが選択されると、その行動モデルの判断、操作が実行されるドライバーモデルを提案する。このドライバーモデルと車両ダイナミクスモデルを組合せることにより、周辺車両と相互作用しながら、実車両に近い自然な車両挙動を示すシミュレーションを実現した。

Development of a Driver Behavior Model

Makoto Kano*¹ Tomoyoshi Shiraishi*¹ Katsuyuki Maruoka*¹ Yuki Ishikawa*¹ Keiichi Kenmotsu*¹
Takatsugu Yamamoto*¹ Mayumi Sakai*¹ Kyu Ysui*¹ Masao Kuwahara*²

Center for Collaborative Research, University of Tokyo*¹ Institute of Industrial Science, University of Tokyo*²

The system links the traffic simulator (TS) with driving simulator (DS) can evaluate various ITS services by observing and analyzing the behavior of DS driver and the effect of traffic situation. In this system, the behavior of vehicles controlled by TS is required to be similar to that of real vehicles. In this paper, we introduce a driver behavior model which contains sub-modules for perception of information about nearby vehicles, and judgment and action selection modules for various situations. Using this driver behavior model and a vehicle dynamics model, we can simulate realistic vehicle behavior decided by interactions with neighboring vehicles.

Keyword: ITS, simulator, driver model

1. はじめに

東京大学国際・産学共同研究センターの産学連携プロジェクト「サステイナブル ITS」では、複合現実感交通実験スペースを開発している。これは交通流シミュレータ(以下 TS)とドライビングシミュレータ(以下 DS)を結合した仮想実験室と、実交通環境を計測、解析する実観測実験室を有機的に結合した基盤システムである。[1]

この複合現実感交通実験スペースでは、TS により作り出される交通状況と、実験車両で撮影されたビ

デオ映像を DS のコンピュータグラフィックスに合成することにより、リアルな映像の仮想空間内で DS 被験者の運転挙動を計測/解析できる。また、DS 被験者の車両挙動を TS に反映させることにより、一台の車両挙動が交通状況に及ぼす影響を解析できる。

この複合現実感交通実験スペースを利用することにより DS 被験者の運転挙動と交通状況への影響の両面から ITS サービスを評価することが期待できる。

複合現実感交通実験スペースでは、シミュレータで制御される車両も実際の車両と同様に、周辺車両

と相互作用しながら行動を決定し、走行する必要がある。

本報告では、複数の行動モデルを有し、認知情報によって一つの行動モデルが選択されると、その行動モデルの判断、操作が実行されるドライバーモデルを提案する。このドライバーモデルと車両ダイナミクスモデルを組合せることにより、周辺車両と相互作用しながら、実車両に近い自然な車両挙動を示すシミュレーションが実現できる。

2. ドライバーモデル

2-1 ドライバーモデルの概要

本報告で説明するドライバーモデルは、マイクロシミュレータ KAKUMO 上に実装されるドライバーモデルである。KAKUMO は仮想実験室の TS と DS との間に位置し、両者の仕様の違いを吸収する役割を持つ(図 1)。

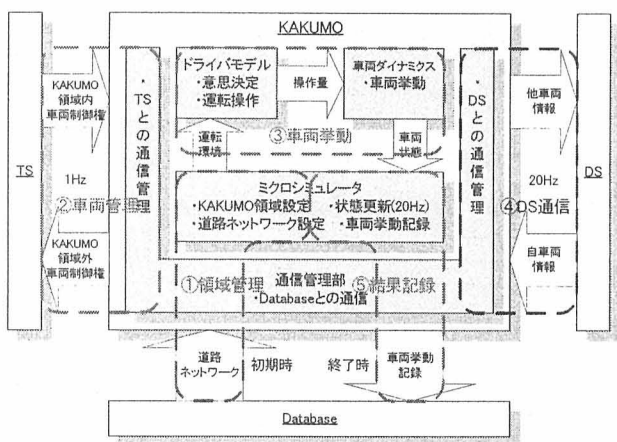


図 1 KAKUMO

仮想実験室の TS は 1Hz で首都高全域のような広範囲の交通状況を模擬する。そのため車両一台一台の挙動は粗く表現されている。例えば車線変更では、車線を一瞬にして移動する。これをそのまま DS に表示すると、DS 被験者の目の前にいきなり車両が現れることになる。

KAKUMO は TS の模擬範囲の一部について、20Hz で車両挙動を詳細に模擬する。KAKUMO で制御された車両の挙動が DS に送信され、DS で 60Hz に補間されて 3D 映像に表示される。従って KAKUMO 上のドライバーモデル、車両ダイナミクスで計算される車両挙動は、DS 被験者が違和感のない程度に実車両の挙動に近くなければならない。また、KAKUMO では 500 台程度の車両を制御する。従って、その 500 台分のドライバーモデル、車両ダイナミクスモデルの計算を 1/20 秒以内に完了する必

要がある。このように、KAKUMO のドライバーモデルは挙動精度と処理時間のトレードオフ関係の中で、バランスの良い計算を効率的に行う必要がある。

2-2 ドライバーモデルの特徴

このドライバーモデルの特徴として、

- ・行動モデルによる行動実行
- ・仮想目標点による制御
- ・制御フェーズの導入

が挙げられる。

2-2-1 行動モデルによる行動実行

ドライバーモデルは複数の行動モデルを持つ。各行動モデルには要求、判断、目標点設定、操作の各処理が定義されている。認知情報を基に、各行動モデルの要求が確認され、要求があると判定された行動モデルの判断、目標点設定、操作の処理が実行される。認知情報空間を各行動モデルの領域に分割しておき、認知情報が含まれる領域の行動モデルが発現する仕組みである。このモデル構造は、行動モデルを追加することにより、新しい行動を定義することができ、拡張が容易である。今回開発している高速道路用モデルでは、左車線変更、右車線変更、追従走行、自由走行の行動モデルを持つ(図 2)。

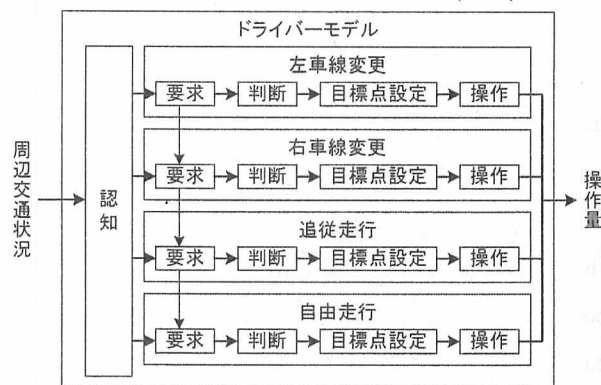


図 2 ドライバーモデル概略図

2-2-2 仮想目標点による制御

選択された行動モデルのルールに従って仮想目標点が設定される。これはドライバーの注視点のように、追従走行時には前方の対象車両、自由走行時には車線の前方に設定される。道路形状がカーブの時には直線時よりも手前に設定される。この目標点を追従するように操作量が決定される。

2-2-3 制御フェーズの導入

実ドライバーでは車線変更する場合、指示器をオンにして隣車線に十分なスペースがあるかを確認し、スペースがあると判断すると車線変更を開始し、車線移動し終わると指示器をオフにする。このモデル

でも、要求、判断、実行、完了の制御フェーズを設け、車線変更を一連の操作として定義、実現する。

図3に車線変更時の制御フェーズを表す。車線変更の要求があると、要求フェーズになり、指示器をオンにする。 T_1 秒後に判断フェーズになり、車線変更が実行可能であるかの判断を開始する。判断結果が真になった段階で実行フェーズになり、 T_2 秒間かけて目標点が移動する。目標点移動が完了すると、完了フェーズになり、 T_3 秒後に指示器をオフにして車線変更が完了する。

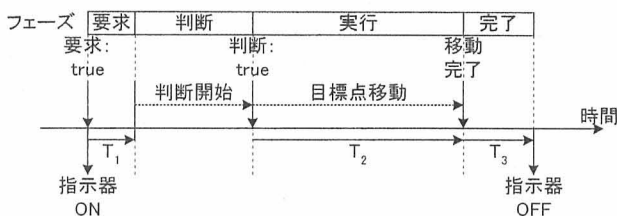


図3 車線変更時の制御フェーズ

各行動モデルのタイマーパラメータ T_1, T_2, T_3 値の

例を表1に示す。追従走行、自由走行ではパラメータ値は全て0になっているが、これは要求、判断が真の場合には一時刻内に要求フェーズから完了フェーズまでが行われることを意味する。

表1 タイマーパラメータの値

行動モデル	T_1	T_2	T_3
左車線変更	2	3	3
右車線変更	2	3	3
追従走行	0	0	0
自由走行	0	0	0

2-3 行動モデル

以下に各行動モデルの要求、判断、目標点設定、操作量決定の内容について説明する。要求はその行動を行う要求があるかを確認する処理で、判断はその行動が実行できるかを確認する処理である。共に真偽が判定される。目標点設定では、仮想目標点の位置が設定され、操作では目標点を基に操作量(アクセル開度、ブレーキ踏込み量、ハンドル舵角)が決定される。

2-3-1 左(右)車線変更モデル

要求: 次のいずれかの条件が満たされると真と判定される。

1) 目的経路に繋がる車線への移動: 現車線が目的経路に行けない車線で左(右)車線が目的経路に進める

車線の場合、確率的に要求が真になる。リンク終端に近づくにつれて真になる確率を高くする。

2) 前方車両の回避: 前方車両の速度が希望速度より遅く、左(右)車線前方車両がないまたは左(右)車線前方車両の速度が希望速度以上の場合に要求が真になる。ただし、現車線が目的経路に進める車線で左(右)車線が目的経路に行けない車線の場合には確率的に要求が偽になり、リンク終端に近づくにつれて車線変更を抑制する。

判断: 次の条件の全てが満たされる場合に真と判定される。

1) 左(右)車線前方車両が存在しない、または、現在及び一定時間後の左(右)車線前方車両との距離が許容距離以上である。

2) 左(右)車線後方車両が存在しない、または、現在及び一定時間後の左(右)車線後方車両との距離が許容距離以上である。

また、判断処理では、要求の条件が満たされなくなると、車線変更の要求がキャンセルされる。

目標点設定: 制御フェーズにより仮想目標点の設定方法が異なる。図4のように、要求、判断フェーズでは、現車線前方に目標点を設定する。実行フェーズでは目標点を現車線前方から左(右)車線前方に時間 T_2 をかけて連続的に移動させる。完了フェーズでは左(右)車線前方に目標点を設置する。

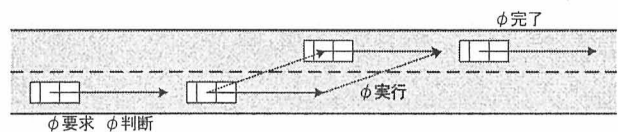


図4 車線変更時のフェーズと目標点の設定

1) 現車線前方に目標点を設定する場合、希望車間距離 $D^{des}(V)$ 、前方車両までの距離、左車線変更する

右車線前方車両、または右車線変更する左車線前方車両があればそれらの車両までの距離のうち最短の位置に目標点を設定する。希望車間距離前方に目標点が設置される場合には、目標点の速度として希望速度が設定される。それ以外の場合は目標点が設定された車両(目標車両)の速度が目標点の速度になる。ただし、目標車両の速度が希望速度より大きい場合には希望速度が目標点の速度になる。

2) 左(右)車線前方に目標点を設定する場合、希望車間距離 $D^{des}(V)$ 、左(右)前方車両までの距離、左(右)

車線変更する前方車両があればそれらの車両までの距離のうち短い方の位置に目標点を設定する。この

場合も速度については現車線前方の場合と同様に、目標点が希望車間距離前方の左(右)車線上に設置される場合には目標点の速度は希望速度が設定される。それ以外の場合には、目標車両の速度が目標点の速度になる。ただし、目標車両の速度が希望速度より大きい場合には希望速度が目標点の速度になる。

3) 実行フェーズでは前記のように現車線前方と左(右)車線前方の目標点を計算し、その二点間を結ぶ線分上を移動するように目標点を設定する。

$$\begin{aligned} x^T &= \frac{t}{T_2} x_F^T + \frac{T_2 - t}{T_2} x_{LF}^T, \\ y^T &= \frac{t}{T_2} y_F^T + \frac{T_2 - t}{T_2} y_{LF}^T \end{aligned} \quad (1)$$

(x^T, y^T) は目標点の位置、 (x_F^T, y_F^T) は現車線前方目標点の位置、 (x_{LF}^T, y_{LF}^T) は左車線前方目標点の位置である。 T_2 は目標点の移動時間で t は実行フェーズ開始時を 0 とする時間 ($0 \leq t \leq T_2$) である。

目標点の速度についても同様に二点の目標点から以下の式により求める。

$$V^T = \frac{t}{T_2} V_F^T + \frac{T_2 - t}{T_2} V_{LF}^T \quad (2)$$

V^T は目標点の速度、 V_F^T は現車線前方目標点の速度、 V_{LF}^T は左車線前方目標点の速度である。

操作：アクセル、ブレーキについては、希望車間距離を保ちながら目標点を追従するようにフィードバック制御が行われる。

$$acc = k_p (D^T - D^{des}(V)) + k_d (V^T - V) \quad (3)$$

acc はアクセル量である。 D^T は自車と目標点との距離、 V^T は目標点の速度、 k_p, k_d は位置、速度に対するフィードバックゲインである。このアクセル量 acc の値が負の場合には -1 を乗算しブレーキ量 brk とする。

ただし、モデルでは足の状態として「アクセルペダル踏み」、「アクセルペダル上」、「ブレーキペダル上」、「ブレーキペダル踏み」の 4 状態を定義し、

状態遷移は、「アクセルペダル踏み」から「アクセルペダル上」へ、「アクセルペダル上」からは「ブレーキペダル上」または「アクセルペダル踏み」へ、「ブレーキペダル上」からは「ブレーキペダル踏み」または「アクセルペダル上」へ、「アクセルペダル踏み」からは「アクセルペダル上」への遷移が許される(図 5)。操作量計算の結果、アクセル量が計算されると「アクセルペダル踏み」の方向に遷移し、ブレーキ量が計算されると「ブレーキペダル踏み」の方向に遷移して、「アクセルペダル踏み」時にだけアクセル量が車両ダイナミクスに入力され、「ブレーキペダル踏み」時にだけブレーキ量が車両ダイナミクスに入力される。

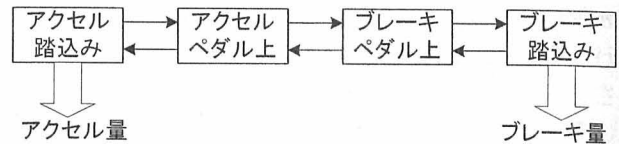


図 5 足の状態遷移

ハンドル角については、車両の方向と車両から見た目標点の方向の差が 0 になるようにフィードバック制御が行われる。

$$hdl = k_h (\theta^T - \theta) \quad (4)$$

hdl はハンドル舵角、 θ^T は車両から見た目標点の方向、 θ は車両の方向、 k_h はフィードバックゲインである。

2-3-2 追従走行モデル

要求：希望車間距離以内に、前方車両、左車線変更している右前方車両、右車線変更している左前方車両のいずれかがあり、その車両が同じリンク上、または目的経路のリンク上にいれば、真に判定される。

判断：要求と同じ条件。

目標点設定：同じリンク上、または目的経路のリンク上にいる、前方車両、左車線変更している右前方車両、右車線変更している左前方車両のうち、最も近くの車両上に目標点を設定する。

操作：アクセル、ブレーキについては、目標車両への追従制御になり、目標車両との距離を希望車間距離に保つようにフィードバック制御が行われる。

$$acc = k_p (D^T - D^{des}(V)) + k_d (V^T - V) \quad (5)$$

ただし、目標車両の速度が自車の希望速度より大きい場合には希望速度を目標値にしたフィードバック制御が行われる。

$$acc = k_p (D^T - D^{des}(V)) + k_d (V^{des} - V) \quad (6)$$

ハンドル角については、車両の方向と車両から見た目標点の方向の差と、車両の LA 座標系の A 座標についてフィードバック制御が行われる。

$$hdl = k_h (\theta^T - \theta) + k_a (p_A - p_A^T) \quad (7)$$

p_A は車両の A 座標値、 p_A^T は目標点の A 座標値である。LA 座標系は道路リンクの進行方向を L 軸、進行方向と垂直方向を A 軸として車両位置を表す座標系である。

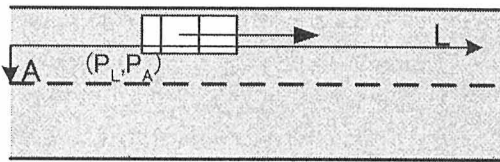


図 6 LA 座標系

2-3-3 自由走行モデル

要求：他の行動モデルの判断の結果、どの行動モデルでも真にならなければ自由走行モデルが行われる。
判断：常に真(true)になる。

目標点設定：希望車間距離前方に目標点が設定される。目標点の速度には希望速度が設定される。

$$\begin{aligned} D^T &= D^{des}(V), \\ V^T &= V^{des}. \end{aligned} \quad (8)$$

操作：アクセル、ブレーキについては、追従走行時と同じ式が使われるが、結局、希望速度で走行するように速度のフィードバック制御が行われる。

$$\begin{aligned} acc &= k_p (D^T - D^{des}(V)) + k_d (V^T - V) \\ &= k_d (V^{des} - V) \end{aligned} \quad (9)$$

ハンドル角については、追従走行モデルと同様のフィードバック制御式(7)が行われる。

3 車両ダイナミクス

車両ダイナミクスモデルは車両への入力であるアクセル開度、ブレーキ踏み量、ハンドル角から車両の位置、方向、速度、角速度を算出するモデルである。微分方程式では計算時間がかかりすぎ、1/20 秒間に計算が完了しない恐れがあるため、ここでは差分式により表現している。車両ダイナミクスモデル式を以下に示す。

$$F = \begin{cases} k_1 acc - k_2 V - k_3 & acc > 0, \\ -k_4 brk - k_2 V - k_3 & brk > 0. \end{cases}$$

$$F = F + Mg \sin(\varphi) \cos(\Delta\theta)$$

$$V = V + \frac{F}{M} \Delta t$$

$$X = X + V \cos(\theta) \Delta t \quad (10)$$

$$Y = Y + V \sin(\theta) \Delta t$$

$$\sigma_T = \sigma_S / 17.0$$

$$\theta = \theta + \sigma_T V \Delta t$$

acc はアクセル開度、 brk はブレーキ踏み量で共に[0,1]に正規化した値である。 V は車両速度[m/s]、 F は車両への力[N]を表す。 M は車両質量[kg]、 g

は重力加速度[m/s²]、 φ は道路傾斜角(L 方向成分)[rad]、 $\Delta\theta$ は道路(L 方向)と車両の方向差[rad]であり、第 2 式は道路が傾斜している場合の重力の影響を表している。 $k_i (i=1, \dots, 4)$ はパラメータである。

すなわち、このモデルでは、車両にかかる力にはアクセル、ブレーキにより発生する力と速度抵抗力、摩擦力、重力を考慮している。 Δt はサンプリング間隔[s]である。このモデルでは車両の進行方向の力、速度だけを考慮しているため、速度に関する式は第 3 式のようなになる。車両の方向を θ とすると、車両位置(X, Y)は第 4 式、第 5 式で表される。 σ_S はハ

ンドル角[rad]、 σ_T は操舵角[rad]である。車両の方向

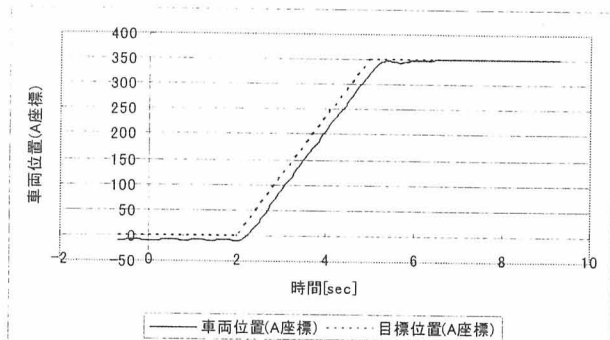
θ の変化量は操舵角 σ_T と車両速度 V に比例する形にしている。シミュレーションでは表 2 の値を使用している。

4 シミュレーション

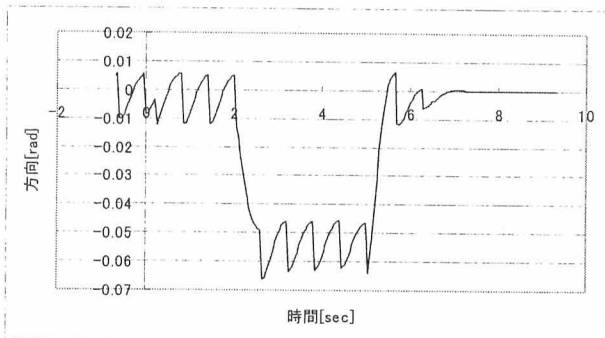
このドライバーモデルを利用して KAKUMO 単独でシミュレーションした結果を示す。車線変更時の車両の状態と操作量の時間変化のグラフを図 7 に示す。要求フェーズが 2 秒続き、判断フェーズに移行し、直ぐに車線変更が可能と判断され、2 秒から 5 秒まで実行期が続き、5 秒から 8 秒まで完了期になって車線変更が終了している。

表 2 車両モデルのパラメータ値

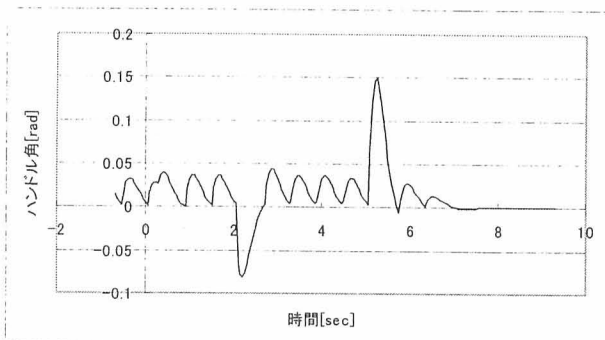
項目	値	単位
車両質量 M	1100	[kg]
重力加速度 g	9.8	[m/s ²]
サンプリング間隔 Δt	0.05	[sec]
パラメータ k_1	3000	
パラメータ k_2	20	
パラメータ k_3	100	
パラメータ k_4	9200	



a) 車両位置(A座標)



b) 車両方向



c) ハンドル舵角

図 7 シミュレーション結果

このモデルでは、目標点を連続的に隣車線まで移動させるため、実行フェーズの 2 秒から 5 秒まで、A 座標値は約 0cm から 350cm まで約 3 秒かけて移動している。実行フェーズの最初と最後に大きくハンドルをきり、実行フェーズ中は車両方向は $-0.05[\text{rad}]$ でほぼ一定になり、A 座標が線形に増加し

ている。車両方向が周期的に振動しているのは道路方向が不連続であるためである。

車線変更におけるハンドル角の変化のさせ方は、ハンドル角の変化が大きく急ではあるが、実ドライバーの運転挙動に近いものである。

5 おわりに

本稿では、複数の行動モデルを有し、周辺車両の認知情報を基に一つの行動モデルが選択されると、その行動モデルの判断、操作が実行されるドライバーモデルを紹介した。車線変更時のシミュレーション結果を示した。このモデルは複合現実感交通実験スペースの KAKUMO に実装され、現在、実験に用いられている。

今後の課題として、

- ・パラメータのチューニング
- ・一般道対応モデルへの拡張が挙げられる。

今後、実験車両あるいは DS による実験を行い、実ドライバーの挙動を解析し、ドライバーモデルの特性パラメータを調整する必要がある。

一般道対応モデルへの拡張では、行動モデルとして、駐車モデル、右左折モデル、駐車車両のすり抜けモデルなどの追加が必要になる。また、信号機、歩行者、対向車の認知が必要になる。また、現在は認知情報空間の行動モデル割り付けを手動で行っているが、行動モデルが増加するに従い複雑になるので、自動的に割り付ける方法などを検討する必要がある。

謝辞：本プロジェクトをご支援いただいている関係官庁、公団、民間企業、大学の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 池内他：産学官連携「サステイナブル ITS」プロジェクト、第 2 回 ITS シンポジウム 2003 講演集, pp.447-452, 2003
- [2] T. Shiraishi et al. : Development of a microscopic traffic simulation model for interactive traffic environment, 11th World Congress on ITS, 2004
- [3] 吉本：予測を含む操だモデルによる人間自動車系のシミュレーション、日本機械学会誌 第 71 巻 第 596 号, pp.1181-1186, 1968