

高速道路合流部における 自動運転車両の戦略的制御

篠原 祐吾¹・塩見 康博²・花房 比佐友³

¹学生会員 立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577滋賀県草津市野路東1丁目1-1)

E-mail: ce0005kp@ed.ritsumei.ac.jp

²正会員 立命館大学 理工学部 (〒525-8577滋賀県草津市野路東1丁目1-1)

E-mail: shiomi@fc.ritsumei.ac.jp

³正会員 株式会社アイ・トランスポート・ラボ (〒101-0052東京都千代田区神田小川町3-10 新駿河台ビル9階)

E-mail: hanabusa@i-transportlab.jp

高速道路ネットワークの拡充にともない、高速道路合流部での渋滞の多発が予想される。一般のドライバーが運転する場合には、自車の安全な合流のみを主眼に置かれるが、自動運転車両の場合、安全性や快適性が担保されている限りでは多様な合流行動を適用することができる。その場合、交通流の全体最適に資する合流挙動を戦略的に行うことも可能であろう。そこで、本研究では自動運転車両を想定し、強化学習による合流挙動のモデル化を行う。この際、4つ報酬設定（安全性、快適性、効率性、全体効率性）を提案し、その設定による車両挙動、および周辺車両への影響の差異を分析した。その結果、安全性制御では、合流時に本線を走る後方車両が減速する挙動、快適性制御では、徐々に加速しながら合流する挙動、効率性制御と全体効率性制御では、合流車線で十分に加速した後合流するなど、多様な合流挙動が表現されることが明らかとなった。

Key Words: merging behavior, reinforcement learning, autonomous vehicles, rewards

1. はじめに

2017年以降、首都圏近郊のネットワーク整備に伴い交通量が増加し、渋滞損失時間は増加傾向にある。2020年以降は新型コロナウイルス感染症の影響等により大きく減少したが¹⁾、今後新型コロナウイルスの収束に伴い再び渋滞損失時間が増加することも予想される。特に合流部では、交通渋滞が発生しやすい。

近年自動運転の開発が進んでおり、今後自動運転車両が普及し始めると、手動運転つまり一般のドライバーが運転している車両の中に少ない台数の自動運転車両が存在することとなる。このような交通状況で、自動運転車両がいかにして適切な挙動をとるのが課題となると考えられる。一般のドライバーが運転する場合、合流部において、自車の安全にのみ主眼を置いた運転挙動をとると考えられる。この際、合流車線での加速が不十分であると、前述のように後方車両が減速を余儀なくされ、この減速が後方車両に伝播し本線の

走行速度の低下に繋がり、渋滞が発生する場合がある。一方、自動運転車両の場合、安全性や快適性が担保されていれば、様々な合流行動を適用することが期待できる。その場合、合流挙動によって交通流の全体最適化させ、戦略的に渋滞を解消することも可能であると考えられる。

高速道路合流部での合流挙動の制御に関する研究は多く存在する。その中でも、先見的なルールを必要としない強化学習を用いた研究に着目する。その一例として、西崎²⁾は高速道路合流部での長大車両を考慮した強化学習による運転挙動モデルの開発した。その上で、高速道路合流部のシミュレーションを行い、その妥当性の証を行うとともに、シミュレーション環境を決定する変数を変化させることで、どの変数が合流挙動に影響を与えるのか分析した。しかし、このモデルは長大車両が安全に合流するためのモデルで、車両に乗車している人の快適性や周辺車両への影響などは考慮されておらず、多様な合流戦略を検討したものではない。

そこで、本研究では、自動運転車両を想定し、特定の値を戦略的に改善するための強化学習による合流挙動のモデル化を行う。強化学習において、エージェントは行動を選択することで環境から報酬を得るため、報酬設定によって学習後の挙動が変化する。そのため本研究では、異なる報酬設定に基づいて学習された車両制御モデルを用いたシミュレーションを行い、合流車両の挙動、周辺車両への影響の差異を分析する。

2. 強化学習の概要

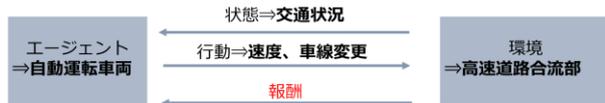


図-1 強化学習の概略図

(1) 強化学習の概要

設定された交通量・道路設定に対する最適な合流車両の制御を戦略的に行うために、強化学習による手法を用いる。強化学習の概略図を図-1 に示す。シミュレーションによって設定された道路状況下で、得られた交通状況に対して、速度や車線変更などの行動を起こす。その際に出力された値をもとに報酬を与える。

(2) 報酬設定

本研究では、合流車両の最適挙動の探索方法として、シミュレーションを繰り返し実行し、合流車両の行動に対して報酬を与え、総報酬が最大となったものを最適挙動とする。報酬に関しては、重視する項目を「安全性」、「快適性」、「効率性」、「全体効率性」の 4 種類に分けてシミュレーションを行う。

安全性に関しては、周辺車両との衝突安全性に関する報酬 (報酬 1) と合流車線長の制約に関する報酬 (報酬 2) の和によって与える。

報酬 1 (R_1) については、宇野ら³⁾によって考案された PICUD (Possibility Index for Collision with Urgent Deceleration,²⁾ が負の値をとる時に、式(1)として負の報酬を与える。

$$R_1 = \begin{cases} 0 & \text{if } PICUD \geq 0 \\ PICUD/a & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 a は任意の調整パラメータを表し、ここでは $a=10$ とする。PICUD は、前方車両が仮に急減速を行うとした時に、後続車が反応遅れ後に急減速して、両者が停止した時の相対的な位置を表す指標である (式(2))。

$$PICUD = \frac{V_1^2}{-2a} + S_0 - \left(V_2 \Delta t + \frac{V_2^2}{-2a} \right) \quad (2)$$

- V_1 : 前方車両の減速開始時の速度(m/s)
- V_2 : 前方車両の減速開始時の後続車両の速度(m/s)
- S_0 : 前方車両の減速時の車間距離(m)
- Δt : 前方車両ブレーキ開始から後方車両ブレーキ開始までの時間, 反応遅れ時間(s)
- a : 減速時の加速度(m/s^2) (-3.3 m/s^2 と仮定)

PICUD が 0 以下の値を示す状況は、前方車両が突然急減速することにより、おなじく後方車両が急減速しても衝突を回避することができない可能性を示唆する。なお、合流車両の前方または後方に車両がない場合、PICUD=999 とする。反応遅れ時間は、鈴木ら⁴⁾による設定をもとに 1.0 秒と設定する。これは、制動停止時の空走距離算定において、反応動作に要するブレーキ反応時間が 1.0 秒と与えられるためである。

高速道路における合流や車線変更の際に前後車両との衝突の危険性を評価する際、指標として車間距離や TTC (Time To Collision)⁴⁾ が用いられることが多い。車間距離は前後の車両の距離を表すものだが、仮に同じ車間距離でも車両の速度が違くと安全性が変化するという点で、前後車両の距離のみが考慮される車間距離よりも前後車両の距離と速度が考慮される PICUD の方が優れているといえる。また、TTC とは、例えばある車両が先行車に追従走行している時に、仮に現在の速度・進行方向を 2 台の車両が保った場合、追従車が先行車に追突するまでに要する時間で衝突の程度を評価する指標である。ところが TTC では先行車の速度が相対的に速い場合は有限な評価値としては算出できず、安定的に安全性を評価することが難しい。先行車の相対速度が多少高くても両者の距離が小さければ、先行車が急減速した時に衝突する危険性が考えられる。これらのような点から PICUD は、高速道路における衝突危険性評価の際に優れていると言える。

報酬 2 (R_2) については、合流開始地点によって設定を行い、合流開始地点が合流車線開始地点に近いほど高い報酬を与える (式(3))。

$$R_2 = S_1/b \quad (3)$$

- S_1 : 合流地点と合流車線終了地点までの距離(m)
- b : パラメータ (ここでは 10 とする)

快適性に関しては、報酬3 (式(4)) によって与えられ、加速度とジャークを説明変数とする快適性の関数(王ら⁵⁾)を参考に設定を行った。ただし、ジャークは単位時間当たりの加速度の変化を表す。毎秒出力された合流車両の加速度とジャークの値を関数に代入することで報酬を得る。

$$\text{報酬3} = \alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3 + \delta x_4 \quad (4)$$

x_1 : 加速度の正の因子(m/s²)
 x_2 : 加速度の負の因子(m/s²)
 x_3 : ジャークの正の因子(m/s³)
 x_4 : ジャークの負の因子(m/s³)
 $\alpha = -1.5, \beta = 5.5, \gamma = -2.0, \delta = 3.0$

効率性報酬に関しては、報酬4 (式(5)) によって与えられ、合流車両の旅行時間が短くなるほど、高い報酬を与える。

$$\text{報酬4} = (60 - T_a) / c \quad (5)$$

T_a : 合流車両の旅行時間(s)
 $c = 4$

全体効率性に関しては、報酬5 (式(6)) によって与えられ、平均旅行時間が短くなるほど、高い報酬を与える。

$$\text{報酬5} = (60 - T_b) / d \quad (6)$$

T_b : 平均旅行時間(s)
 $d = 10$

3. 学習環境

強化学習を行うにあたっては、マイクロ交通流シミュレーターのMicroAVENUEを用いてシミュレーションを行う。以下、シミュレーションモデルの概要とその設定について述べる。

(1) MicroAVENUEの概要

MicroAVENUEは、1台1台の車両挙動を模擬し、自動車交通流を再現するマイクロモデルで、Micro AVENUEの車両モデルは前方車両の車間や速度を基に自車の加速度を決定する追従走行モデル (IDM+⁶⁾, 式(7)と式(8))によって車両が移動する仕組みであり、10msec単位の加減速挙動を表現する。

$$\frac{dv}{dt} = a \cdot \min \left\{ 1 - \left(\frac{v}{v_d} \right)^\delta, 1 - \left(\frac{s^*}{s} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

$$s^* = s_0 + vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \quad (8)$$

- v : 走行速度(m/s)
- s : 車間距離(m)
- s^* : 希望車間距離(m)
- Δv : 相対速度 (前方車両への接近速度)(m/s)
- s_0 : 最小車間距離(m)
- v_d : 希望速度(m/s)
- T : 安全車間時間(s)
- a : 最大加速度(m/s²)
- b : 希望加速度(m/s²)
- δ : 加速項のべき乗数(=4)

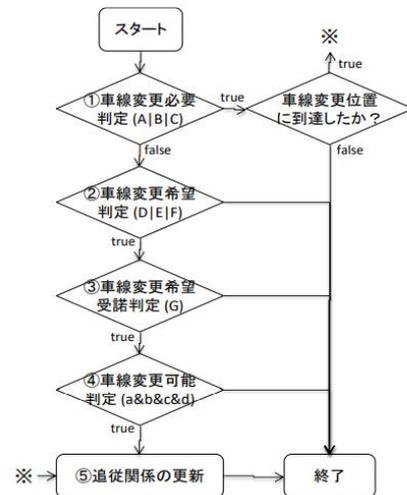


図-2 車線変更ロジックのフロー

また車線変更ロジックに関しては、車線変更モデルによって走行する。以下に車線変更モデルの詳細について記す。車線変更ロジックのフローについては、図-2に示す。

・車線変更モデル

①車線変更必要判定

車線変更は、まず状況によらず車線変更が必要かどうかを判定する。具体的には次のA-Cの条件のいずれかが満たされれば、車線変更が必要と判断して、目的の車線に割り込む。

A) 下流で現在の車線が絞られており、そこまでの残余距離が閾値未満である。

B) 交通規則等で車線変更が必要である。

②車線変更希望判定

車線変更が必要ない場合は、車線変更を希望するかどうかの判定を行う。具体的には、次のD-Fのいずれか

- が満たされれば、隣接車線への車線変更を希望する。
- D) 現在車線前方の滞留末尾車両までの残余距離が隣接車線よりも一定以上短い。
- E) 現在の走行速度が、本来の希望速度よりも一定以上低下している。
- F) 希望速度で走行しており、かつ前方車間距離が閾値以上空いている。(左の走行車線への復帰)

③車線変更希望受託判定

車線変更を希望する場合は、あらかじめ車線毎にあたえられた受託確率に基づいて、確率的に車線変更するかどうかを決める。受託確率は、右車線への変更の場合と、左車線への変更の場合で値を変えて設定できる。

④車線変更可能判定

車線変更希望が受託された場合、次の条件 A~C 全てが満たされれば、車線変更するために追従関係を更新する。

- A) 隣接車線前方車との速度差が閾値以上である。
- B) 隣接車線の干渉範囲に車両が存在しない。
- C) 隣接車線の前方・後方 TTC がいずれかも閾値以上または負値である。

⑤追従関係の更新

車線変更時の追従関係の更新は、それまで自車線の前方車に追従していたものを、車線変更先の隣接車線前方車に追従するように変更する。同時に、自車の斜め後ろの車両に対して、それまで前方車に追従していたところを、自車に追従するよう変更する。

(2) シミュレーション設定

データ計測時間は 300 秒、本線の制限速度は 80km/h、合流車線の制限速度は 50km/h に設定した。また、本線車両の台数は 150 台、本線へ合流する車両の台数は 1 台とし、制御対象は合流車両とする。道路設定については図-3 に示す。

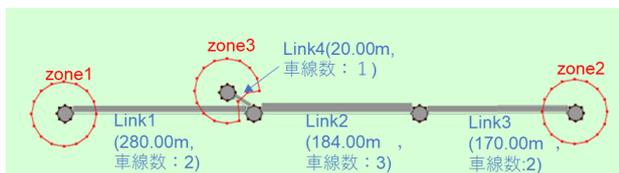


図-3 シミュレーション設定

a) 最適挙動の探索方法

シミュレーション毎に合流車両の速度と車線変更をランダムに制御し、合流の一連の挙動に報酬を与え、総報酬が最大になったものを最適挙動とする。その際車両情報更新機能によって制御を行う。車両情報更新機能とは、特定の車両のパラメータを更新する機能で、

車両に希望速度と車線変更の指示を出し、制御することができる。本研究では、車両情報更新機能を利用し、合流車両が合流車線を走行中、毎秒希望速度 (0km/h~80km/h) と車線変更 (合流もしくは車線維持) の指示を与える。

b) 比較方法

前述の通り、最適挙動を制御あり、人の運転挙動を制御なしと見なし比較を行う。制御ありの場合、車両情報更新機能によって制御するため、最適挙動をとる自動運転車両と見なすことができる。制御なしの場合、追従モデルによって走行し、車線変更モデルに従い車線変更を行う。

4. シミュレーション結果

シミュレーション結果から制御なしの場合と、それぞれの報酬設定で制御した場合を比較し、合流車両の挙動と合流車両が周辺車両へ及ぼす影響の分析を行う。図-4は合流車両の前方・後方車両とのPICUDの推移を表したものである。これより合流車両の周辺車両との衝突の危険性がわかる、図-5は、合流車両の合流開始地点を表したものである。これより合流車両が安全な地点で合流を行っているかがわかる。また、合流車線から走行車線への合流の様子が見られない場合は、合流車両は合流車線終了地点で合流していることを表す。図-6は合流車両の速度推移を表す。これより、合流車両の快適性の推移わかる。図-7~11はタイムスペース図を表す。これより、制御ごとの周辺車両への影響がわかる。また、表-1は合流開始時間を表し、合流車両が出発してから合流を開始するまでの時間を表す。表-2は、到着したすべての車両の平均旅行時間を表す。

i. 安全性制御

制御なしの場合と比較し、合流の位置は 30m ほど手前で合流を行っている。また、後方車両とのPICUD値は合流後1秒間のみ負の値をとり、安全であるといえる。一方で、周辺車両への影響に着目すると、合流時に本線を走る後方車両が減速する挙動が見られた。

ii. 快適性制御

制御なしの場合と比較し、減速や急な減速がなく、より快適であるといえる。しかし、後方車両とのPICUD値は合流後7秒間負の値をとり、安全とは言えない。一方で、周辺車両への影響に着目すると、後方車両がやや減速しているが、周辺車両に大きな影響はない。

iii. 効率性制御

制御なしの場合と比較し、合流前に十分な加速を

行い、合流車両の旅行時間が4秒短縮されており、効率が良いといえる。しかし、後方車両との PICUD 値が合流後 5 秒間負の値をとり、合流車線終了地点で合流を行っており、安全とは言えない。一方で、周辺車両への影響に着目すると、後方車両がやや減速しているが、周辺車両に大きな影響はない。

iv. 全体効率性

制御なしの場合と比較し、合流前に十分な加速を行う。また、前方車両との PICUD 値が合流後 9 秒間負の値をとり、合流車線終了地点で合流を行っており、安全とは言えない。一方で、周辺車両への影響に着目すると、周辺車両は速度変化を行ってなく、周辺車両への影響は見られない。

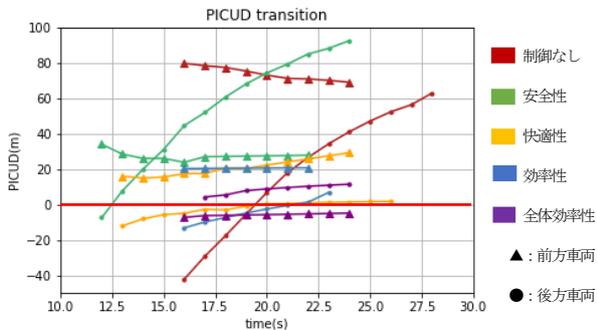


図-4 PICUD 推移

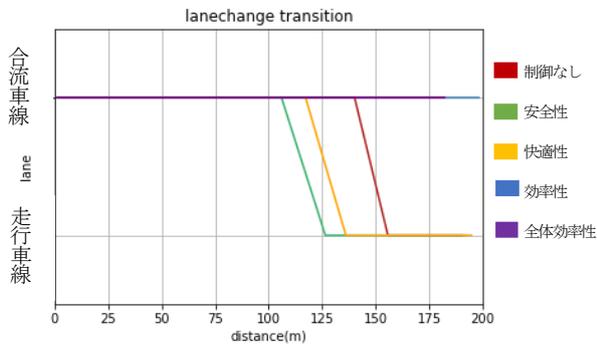


図-5 合流位置推移

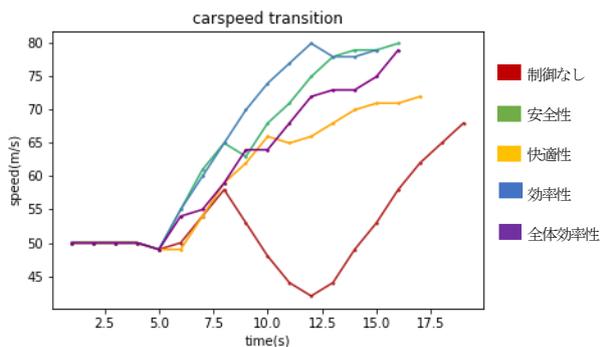


図-6 速度推移

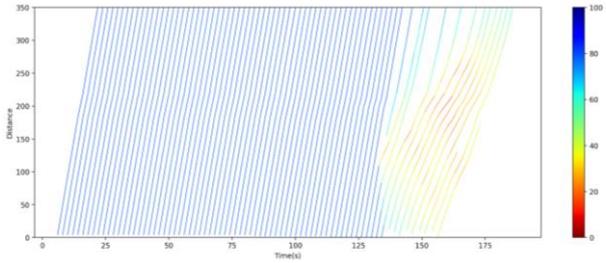


図-7 TS 図 (制御なし)

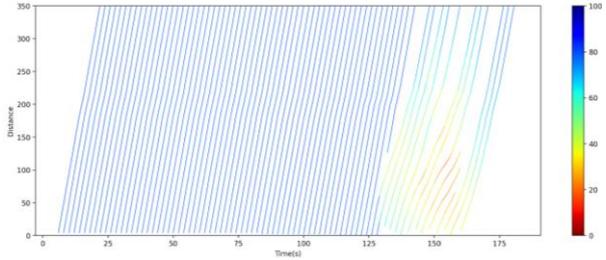


図-8 TS 図 (安全性制御)

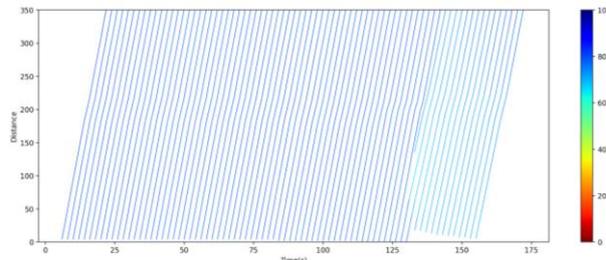


図-9 TS 図 (快適性制御)

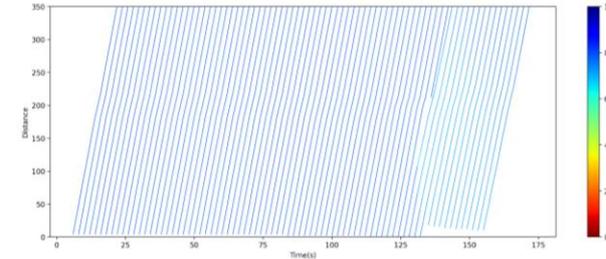


図-10 TS 図 (効率性制御)

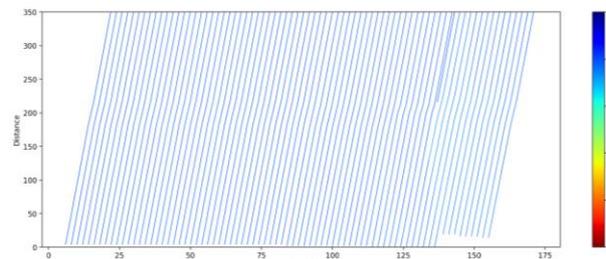


図-11 TS 図 (全体効率性)

表-1 合流開始時間

	制御なし	安全性	快適性	効率性	全体効率性
時刻 (s)	16	12	13	16	16

表-2 平均旅行時間

	制御なし	安全性	快適性	効率性	全体効率性
平均旅行時間 (s)	16.41	16.42	15.39	15.36	15.3

5. まとめと今後の課題

本研究では、4 つ報酬設定を提案し、その報酬設定による合流車両制御でシミュレーションを行い、合流車両の挙動、合流による周辺車両への影響の差異を分析した。安全性制御に関しては、制御なしの場合と比べて、合流位置は手前、前後車両との PICUD は高い値をとったが、合流前に後方車両が減速する挙動が見られ、渋滞を引き起こす可能性が示唆された。快適性制御に関しては、制御なしの場合と比べて、減速や急な減速は見られないが、後方車両との PICUD が低い値をとった。効率性制御に関しては、制御なしの場合と比べて、旅行時間が短縮されたが、後方車両との PICUD が低い値をとった。全体効率性に関しては、制御なしの場合と比べて、平均旅行時間が短縮され、車両の合流による周辺車両への影響は見られないが、前方車両との PICUD が低い値をとった。この結果から本研究でのシミュレーション設定において、4 つの報酬設定によって合流車両の制御を行った場合、それぞれの報酬設定で合流車両の安全性、快適性、効率性の改善、平均旅行時間の短縮を行うことができた。

今後は、今回提案した報酬設定のもとで、様々な交通状況に対応できる合流挙動モデルの構築を行う。また、今回は 4 つの報酬設定ごとに制御を行ったが、各報

酬を合成するなど、多様な報酬と合流車両の挙動や周辺車両への影響との関係性を明らかとしたい。

謝辞：本研究はJSPS 科研費 19H02268, および20KK0334 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) NEXCO 東日本, 高速道路の渋滞対策, https://www.nexco.co.jp/activity/safety/detail_07.html, 閲覧日 2022 年 9 月 26 日
- 2) 西崎省吾: 長大車両を考慮した強化学習による高速道路の合流挙動モデルの開発, 東京海洋大学修士論文 2021
- 3) 宇野伸宏, 飯田恭敬, 安原真史, 菅沼真澄: 一般道織込み部における客観的コンフリクト分析と速度調整モデルの構築, 土木計画学研究・論文集, vol.20, no.4, pp.989-996, 2003
- 4) 鈴木弘司, 松村悠貴, 都市高速道路合流部の錯綜事象における衝突危険性評価に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.71, No.51 (土木計画学研究・論文集 32 巻), I_493-I_502, 2015
- 5) 王鋒, 佐川貢一, 猪岡光, 自動車の加減速と乗り心地の関係に関する研究, 人間工学, Vol. 36, No. 4, 191-200, 2000
- 6) Hayward, J.C., Near-miss determination through use of a scale of danger, Highway Research Record, No.384, pp.24-34, 1972

STRATEGIC CONTROL FOR AUTONOMAOUS CAR ON FREEWAY MERGING SECTIONS

Yugo SHINOHARA, Yasuhiro SHIOMI and Hisatomo HANABUSA