VCG メカニズムを援用した高速道合流部における経路予約型交通制御の計算手法

学生会員　東京大学大学院　広瀬啓人
正会員　東京大学大学院　羽藤英二

1. はじめに

近年、自動車に通信機能を搭載し、これを活用することによる、交通流の改善技術が注目されている。既に自動車交通において活用されている VICS(Vehicle Information and Communication System) や ETC(Electronic Toll Collection System)はその一例といえる。そして、この技術は、通信により走行挙動を完全に制御することが可能である、自動運転車の普及により、さらなる交通流改善効果が見込まれることが予想される。本研究は、将来的な自動運転車の普及を想定し、高速道路の合流部において自動車との通信を介しての交通流の最適化を行う交通流制御システムのフレームとその計算手法を提案するものである。

2. 提案する交通流制御システムのフレーム

提案する交通流制御システムの概念図を図-1 に示す。なお、車両の挙動（追従や車線変更に伴う加減速など）は、Time-Space 図上に 1 本の曲線によって表すことができるが、本研究ではこれを車両の 1 つの走行「経路」として解釈している。(図- 2 参照) すなわち、本研究における「経路」という単語は、一般的に用いられる空間的軌跡の意味合いにとどまらず、時空間的軌跡のことを指していることに注意されたい。また、走行車両は自動運転車と従来型の自動車が混在している状況を想定している。

合流部までのある一定距離の区間を「合流準備区間」と称す。また、合流が行われ車線が減少するまでの区間を「合流区間」と称す。

本システムは、「センサー」、「シミュレーター」、「ソルバー」の 3 つから構成される。「センサー」は、合流準備区間・合流区間内車に存在する車両からデータを取得する。取得するデータは、車両の位置情報・速度情報、そして予め登録された、その車両のドライバーの時間価値情報と目的地情報である。

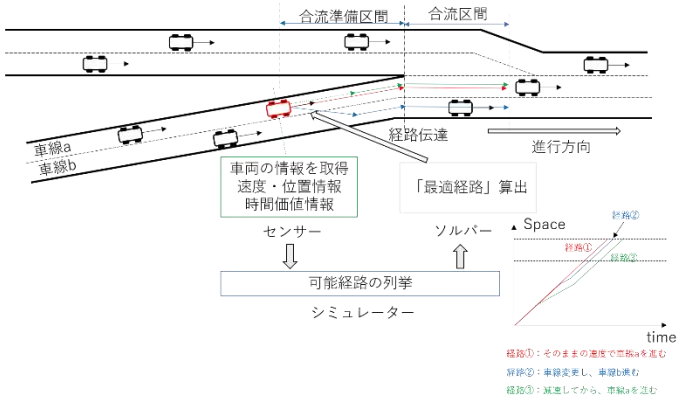

図-1　システムのイメージ図

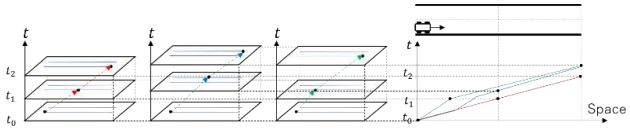

図-2　「経路」のイメージ図

合流準備区間・合流区間内に存在する車両は「センサー」により検知されており、「シミュレーター」を用い、合流区間を通過し終えるまでの区間における Time-Space 図上での経路列挙が行われる。その中から「最適な」走行軌跡の組み合わせが「ソルバー」により算出され、通信を介し車両の自動運転システムに与えられ、挙動が制御される。算出された走行軌跡情報の車両への提供のタイミングは、その車両が「合流準備区域」を走行している間とする。

ソルバーが算出する各車両の「最適経路」とは、社会的総余剰が最大となるものであることが望ましい。したがって、この組み合わせ最適化問題を解くにあたっては、VCG メカニズムを用いたオークションシステムの導入が考えられる。VCG メカニズムの特長である「効率性」と「耐戦略性」により、①「各ドライバーは自身の時間価値を正直に告白する」、②「算出される各車両の走行経路は社会的総余剰最大となるものとなっている」が実現する。

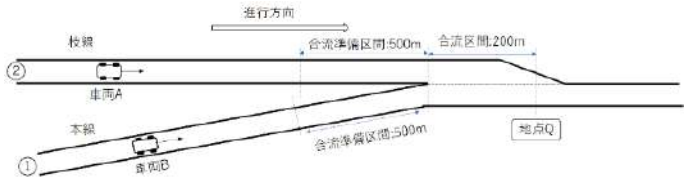

図-3　仮想ネットワーク

T_i	車両 i の合流準備区間進入時間
t_i	もう一方の車両がいない場合の車両 i の地点 P 通過予定時刻
t_i'	もう一方の車両が通行権を落札した場合の車両 i の地点 P 通過予定時刻
Δt_i	落札による車両 i の地点 P 通過予定時間短縮幅
	$\Delta t_i = t_i' - t_i$
v_i	車両 i のドライバーがもつ、1 秒当たりの時間価値
y_i	落札者を示すダミー変数。
	$y_i = \begin{cases} 1 & \text{車両 } i \text{ が通行権を落札したとき} \\ 0 & \text{車両 } i \text{ が通行権を落札できなかったとき} \end{cases}$
b_i	車両 i が宣言した、自身のもつ時間価値
p_i	車両 i の支払額

表-1 各変数

3. 仮想合流部における単純な設定下での計算例

2 つの 1 車線道路が合流し 1 車線となる、図-3 のような合流部を考える。両道路から 1 台ずつ(車両 A、B)が、合流部にほぼ同時に到達するときを想定する。ある時刻に合流部を通過できる車両は 1 台に限られるから、一方の車両は減速を余儀なくされる。これは、ある時刻における合流部の通行権の競合と解釈することができる。したがって、車両 A と車両 B の間である時刻における合流部通行権オークションとして以下のように問題設定を行う。(1)式中のzは社会的総余剰を意味し、(1)式の表すその最大化と(3)式による支払額の決定により、効率性と耐戦略性を持たせている。(VCG メカニズム)ただし、各変数のさすものは、表-1 の通りである。

$$\max z = \sum_{i \in N} b_i y_i \Delta t_i \quad (N = \{A, B\}) \qquad (1)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_i y_i = 1 \ (\mathrm{y_i} \in (0,1), \forall i \in N) \qquad (2)$$

$$p_i = b_i y_i \Delta t_j \qquad (3)$$

$$t_i = T_i + L_r / v_{r,i} \qquad (4)$$

$$t_i' = \min\{t_i, t_j + 2\} \ (i \neq j) \qquad (5)$$

シミュレーターとして、マイクロ交通シミュレーター”Gojyo”を使用し、2 つの車両を仮想合流部ネットワークに発生させ、上記の交通制御システムの有無による交通流の変化（車両 A と車両 B の合流部通過順の変化）を観察する。2 車両の設定（時間価値、速度）を表-2 にまとめる。車両 B を車両 A よりも後に発生させ、制御なしの場合、車両 A は車両 B よりも早く合流部に到達するような状況とする。

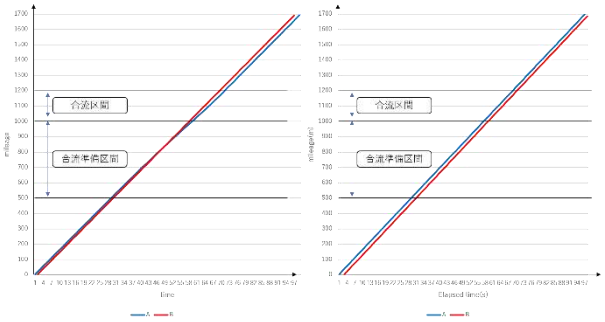

図-4

1 秒差、2 秒差の場合の 2 車両の Time-Space 図

（左：1 秒差、右：2 秒差）

	時間価値(/秒)	速度(m/s)
車両 1	1	17.636
車両 2	10	17.6465

表-2　車両の設定

車両 B を車両 A よりも 1 秒遅れて発生させた場合、車両 A が減速を行い車両 B の合流部通過を待ってから合流部を通過した方が社会的総余剰は大きくなるため、合流部通過順は入れ替わる。(図-4 左) 一方、発生タイミングのずれが 2 秒の場合では、車両 A が車両 B の通過を待つための減速幅が大きくなるため、車両 A は車両 B の通過を待たず、先に合流部を通過することが適解として導出される。(図-4 右) この結果は、制御システムが、車両発生タイミングの時間差と走行速度差、時間価値の差を考慮して、車両の挙動を制御したことを表している。

4. 結論と今後の課題

本研究では、高速道路合流部において、自動運転車が普及した状況を想定し、通信によりその走行挙動を制御することで、合流部における交通流最適化のための交通制御システムを提案した。そして単純化した設定のもと、「合流部優先通行権オークション」を通した社会的総余剰最大の交通流実現のための計算手法を提案した。そして、2 台の状況によって、異なるオークション結果が導かれることを示した。

今後の課題としては、膨大な数の経路の列挙手法が挙げられる。3. において扱った計算例では、これを理由とし、経路列挙を回避する形で最適解を求めている。計算機の性能の向上と合わせ、ZDD などの選択肢索引化手法などの解決手法が考えられる。