

# 交通流におけるプラトーンの制御戦略に関する研究

## Strategy of Control of Platooning in Traffic Flow

藤岡 健彦 (東京大学) 大前 学 (東京大学) 三宅 浩四郎 (東京大学)

Takehiko Fujioka and Manabu OMAE and Koushiro Miyake

Department of Mechanical Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan

Structures and controllers for platooning controls in traffic flow are proposed. Simulation studies and analysis of traffic flow are carried out by use of the controllers. Traffic simulator is developed for the analysis. Basic characteristics of platooning behavior are investigated to build the system. In this paper, by use of information got from this investigation, platooning controls that aim to improve traffic flow are proposed. As traffic flow, situation where platooning vehicles and manual controlled vehicles coexist is used. Simulation results show that implementation of effective platooning controllers can improve traffic flow.

**Key Words :** Intelligent Transport Systems, Platoon, Traffic flow, Advanced Highway Systems, Optimization, Nonlinear Planning Problem, Steepest Descent Method, Vehicle Control

### 1. 緒 言

近年、道路交通問題を解決する有効な手段の一つとして、自動車及び道路の知能化、すなわちITS (Intelligent Transport Systems)の名の下に様々な研究が活発に行なわれており、国内外のプロジェクトにおいては、特に高速道路上におけるITSの研究が多く見られる。中でも、車両同士が高密度の走行群を形成する、プラトーン走行に関する研究は、その利点や制御方式に関して数多くの研究がなされてきた。本研究では、高速道路上の交通流の挙動を考察し、特にプラトーンの挙動が交通流に与える影響を解析し、より高度なプラトーンの制御方式を提案する。

従来、プラトーンの研究として、プラトーン自体の制御方式を扱ったもの<sup>[1]</sup>や、プラトーン内での車車間通信を扱ったもの<sup>[2]</sup>などの、より限定された範囲の研究が多くなされてきた。対して、プラトーンレベルで障害回避や合流離脱といったタスク制御を行ない、よりマクロな視点から交通流を評価する研究は多見されなかった。本研究は交通流の挙動を論じるものであり、各車両の制御方式のみならず、車間通信を想定したよりマクロな視点から見た交通流の中でのプラトーンを対象としている。また、プラトーンを一力学系として扱うことで、その挙動を扱い易くした。

本研究では、車両モデルと縦・横方向制御を備えた車両を走行させることが出来る交通流シミュレータを用いることにより、プラトーンと非自動運転車が混在するより現実的な交通流を解析した。このシミュレーションにより、まずプラトーンの基本的な動特性を検証した。次に、ここで得られたプラトーンの諸特性を元に、従来行なわれてこなかった、プラトーンレベルでの制御方式を検討した。具体的には、車間距離や走行速度などを、交通状況に適した値にしてやることで、より効率的な交通流を構成しようとした。ここで、交通流の効率性を比較するために、燃費や交通容量などの数量的比較項目を導入し、これを各制御方式及び交通状況において比較した。

このようにして、制御方式と交通流特性を定量的に評価することによって、より高度なプラトーン形態を可能にするタスクコントローラを開発し、プラトーン挙動を最適化することが本研究の目的である。

本報では、プラトーン制御系及びプラトーンコントローラ概念を説明する。また、プラトーンコントローラを用いてプラトーン制御を行なうことによって、交通流がどのように改善されるかを紹介する。

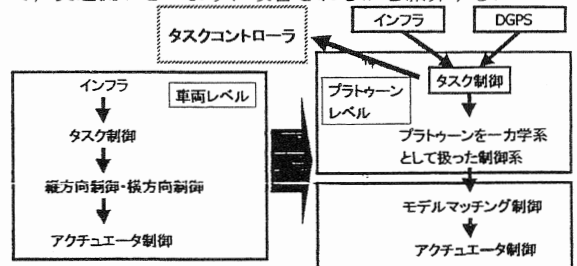


Fig. 1 Proposed system of platoon controller

### 2. 交通流におけるプラトーン挙動の特性

#### 2.1 プラトーン制御

プラトーンは本来、自動運転により高密度車両走行形態を形成することによる高交通容量の実現や、人的要因に起因する事故の低減による安全性の向上、などといった目的の下に研究が行われてきた。本研究では、プラトーンを形成する際に必要な制御として、主に縦方向制御に関して考察する。

#### 2.2 制御目標

プラトーン縦方向制御における制御目標として、目標車間距離が多くなる場合取り上げられている。この目標車間距離と、車載レーダー等で測定した車間距離との相対誤差を用いて、車間距離を様々な制御方式で制御するのが一般的である。次にその制御方式について解説する。

#### 2.3 スtringスタビリティ

プラトーンの縦方向制御を考える際、必ず問題になってくるのが、Stringスタビリティ (string stability) の問題である。Stringスタビリティには何種類かの定義があるが、主に次の二つがよく用いられている。

- ・ 加速度の伝播関数のゲインが1以下
  - ・ 車間距離の伝播関数のゲインが1以下
- 両者ともほぼ同じ結果をもたらすことが知られている。つまり、これらの条件を満たす範囲でチューニングパラ

メータの調整を行う限り、ストリングスタビリティが満たされた制御になる。

#### 2.4 車間距離制御

車間距離制御は、主に三種類の方式が提案されており、それぞれ次のような利点がある。

- ・車間距離一定制御<sup>[1][2]</sup> : 交通容量
- ・車間時間一定制御<sup>[3]</sup> : 車間通信不要
- ・衝突安全距離確保制御<sup>[4]</sup> : 安全性

本研究ではTab.1に示されるような各制御方式の特徴を生かして、これらを組み合わせることにより、より効果的な制御方式を提案する。

Table 1: Feature of controls of inter-vehicle distance

	車間時間一定制御	車間距離一定制御
交通容量	やや大	大
車間通信	不必要	必要
消費燃料	比較的小	大

#### 2.5 提案されるプラトーン

本研究では、プラトーンを一力学系として扱う制御系を新たに提案する。プラトーンを一力学系として扱うことにより、プラトーンレベルでより高度なタスク制御が可能になるからである。同時に、車両レベルでは、各車両にモデルマッチング制御を施すことにより、均一な加減速特性を実現している。具体的には、PATH等で提案されている、インフラ→車両レベル、という制御階層を、インフラ→“プラトーンレベル”→車両レベル、という制御階層にすることで、より高度なプラトーン制御を行う。つまり、プラトーンレベルでのタスクコントローラを用いることにより、状況に応じた選択性のあるプラトーン制御を行うことが本研究の目的である。

### 3. 制御ストラテジー

#### 3.1 評価項目

交通流を評価する際、評価項目は大きく分けて、交通容量、安全性、対環境影響度の3つに分かれる。

本研究では、プラトーンを含む混成交通流を仮定しており、その交通流を最適化するにあたり、上記の項目の内、交通容量と、対環境影響度として燃費を評価項目として用いた。以下に各項目について説明する。

##### ・交通容量

多くの研究で提案されているように、自動運転の目的の一つには、交通容量の改善がある。車同士の車間距離をより短くすることによって、単位時間当りの交通量を増やそうとすることが目的である。その評価値として、様々な指標が用いられているが、本研究では次式で定義される“平均行程速度” $V$ を用いた。

$$V \equiv \frac{L}{T} \quad \dots\dots ①$$

$L$ : 総走行距離       $T$ : 走行時間

交通流に含まれるすべての車についてこの値を計算し、その平均値を用いて交通容量として評価した。

##### ・燃費

環境に対する影響度として、比較的多くの研究で用いられているのが交通流の消費燃料である。消費燃料を計算する方法として、車の加速エネルギーを積分する方法が一般的である<sup>[5]</sup>。しかし、この方法では空気抵抗やタ

イヤの転がり抵抗等を適切に反映した評価はできない。そこで本研究では、Boseら<sup>[6]</sup>が用いたルックアップテーブルを参考にした。これによって各速度、加速度における消費燃料が一意に求められる。すべての車両に同一のテーブルを適用することは難しいが、燃料消費量の変化特性は利用できると考えた。

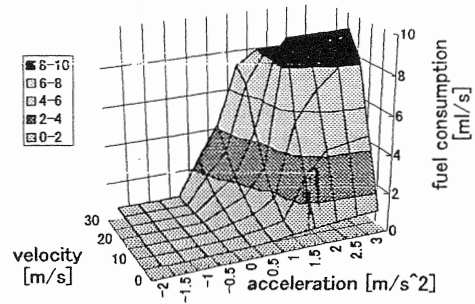


Fig. 2 Fuel Consumption

#### 3.2 制御構造

上述した評価項目を改善するような指令を出すのが、Fig.1のタスクコントローラの役割である。ここでは、そのタスクコントローラの構造を説明する。

タスクコントローラはプラトーンリーダーに装備されている。Fig.3にコントローラの概略を記す。コントローラは階層的な構造をもち、それぞれの層は次のような働きをする。

- ・インフラ層 インフラからの情報を得る。今回は、道路の混雑情報を入力値とした。
- ・タスク決定層 インフラ層から得られた情報を元に、プラトーンが取るべき形態を決定する。今回は、今通状況に応じて、「燃費優先モード」と「交通容量優先モード」を選択する。
- ・指令値決定層 タスク決定層で決定されたプラトーン形態を実行するために、最適な指令値を決定し、指令する。今回はプラトーンの数や車間距離を最適化することにより、燃費や交通容量を向上させる。
- ・車両レベル層 指令値層から出された指令値に従ってプラトーン構成車両が実行する。

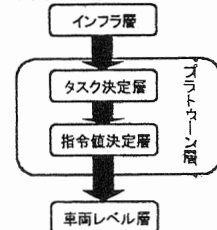


Fig. 3 Task Controller

#### 3.3 制御量

3.2節で述べたように、タスクコントローラのタスク決定層において最適値計算を行なう。ここではその計算方法を説明する。具体的には、燃費や交通容量といった評価項目を最適値にしなから、タスク決定層が指令したタスクを遂行するように、プラトーン制御量を計算する。今回計算したプラトーン制御量は、以下の2つの制御量である。各制御量とも、プラトーンを構成するすべての車両に指令される。

- ・プラトーン速度 $v$

・プラトーン内車間距離h

これらの値を調整することによって、燃費と交通容量を改善したり、要求タスクを遂行できるような走行形態をとることができる。

3.4 制御量が交通量特性に与える影響

v, hを決定するために、まずこれらの制御量が交通流特性に与える影響を解析した。Fig. 4, 5は、vとhを変化させた時の燃費、交通容量の値を示す。また、Fig. 6は、燃費と交通容量との相関図を示す。このグラフから、次のような傾向を確認した。

(i) 燃費にはピーク値があり、車間距離hによって、ピーク値を満たす速度vが変化する。具体的には、車間距離が大きくなるほどピーク値の速度は大きくなる。(Fig. 4参照)

(ii) 速度が大きい時は、車間距離が大きくなるほど燃費が良くなり、速度が小さい時は、逆に車間距離が小さいほど燃費は良くなる。(Fig. 6参照)

(iii) 交通容量は、速度に比例し、車間距離が小さくなるほど向上する。(Fig. 5参照)

これらの解析結果をふまえ、次のような計算手法を構成した。

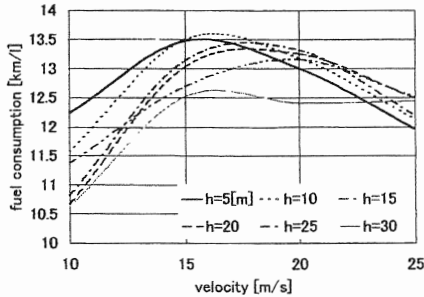


Fig. 4 Fuel Consumption

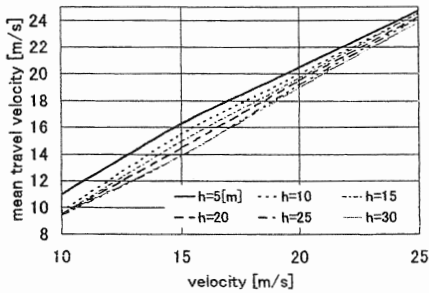


Fig. 5 Traffic Capacity

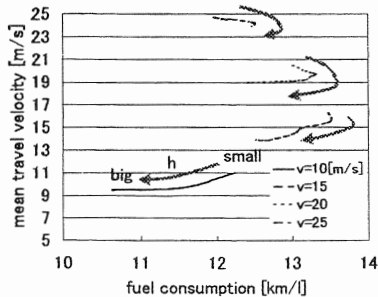


Fig. 6 Correlation of Fuel Consumption and Traffic Capacity

3.5 制御量決定の流れ

まず、インフラから環境情報を得、走行形態を決定する。具体的には、混雑状況を環境情報として入手し、それに応じた走行形態を決定する。また、渋滞率  $\sigma_1$  を定義し、これをインフラから得る環境情報とした。  $\sigma_1$  は、0 ~ 1 までの間の値をとる。渋滞になるほど値が大きくなる。今回は、100m当たり5台以上の車両が道路上に存在する時に  $\sigma_1=1$ 、1台以下の時に  $\sigma_1=0$  とした。

次に、2つの制御量のうち、車間距離hを決定する。具体的には、②式で示されるような関数で表現する。渋滞が激しくなる ( $\sigma_1$  が大きくなる) と、h が小さくなり、交通容量を確保するようになっている。今回、②式中の各定数は、 $h_{min}=5m$ ,  $h_{max}=30m$  とした。

$$h = h_{min} + \sigma_1(h_{max} - h_{min}) \quad \dots \quad \text{②}$$

次に、②式で計算されたhによって、もう一つの制御量vを決定する。③式にその計算式を示す。

$$v = v_{min} + \sigma_2(v_{max} - v_{min}) \quad \dots \quad \text{③}$$

まず、Fig. 4によって、②式で得られたhに対する燃費のピーク値を求め、その時の速度を③式中の  $v_{min}$  とする。また、今回は  $v_{max}=25m$  とした。③式中  $\sigma_2$  は要求モード変数であり、0~1の値をとる。このようにして、各車間距離における燃費を最適化することにより、指令値の最適値計算とした。  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  の内容をTab. 2に示す。また、Fig. 7に計算の流れを示す。

Table 2: values of equations

$\sigma_1$	0 非渋滞	→	1 渋滞
$\sigma_2$	0 燃費重視	→	1 交通容量重視

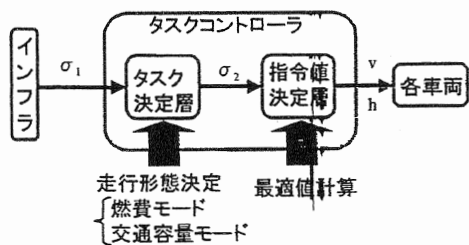


Fig. 7 Procedure of Calculation

4. シミュレーションによる評価

4.1 シミュレーションの目的

今回行ったシミュレーションの目的は、第3章で説明したプラトーン制御用タスクコントローラ的设计、及びその効果を検証するためである。プラトーンレベルで制御ロジックを組み込むことにより、より効率的なプラトーン制御を構築する。具体的には、交通流シミュレータを用い、タスクコントローラによってプラトーンを制御し、交通流全体の燃費や交通容量といった特性を解析した。

4.2 シミュレーションの概要

今回行ったシミュレーションモデルを説明する。概

略は、Fig. 8に示されるような直線路を非プラトーン車、プラトーン車が混在して走行するモデルである。ある条件を満たせば非プラトーンがあるプラトーンに合流したり、プラトーンリーダーになる。燃費や交通容量は、交通流全体の値を評価するものとする。

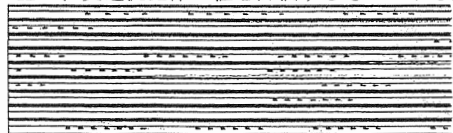


Fig. 8 Traffic Simulator

#### 4.3 シミュレーションの結果

第4.2節で説明したシミュレーションの結果を述べる。今回は、渋滞時と非渋滞時における、タスクコントローラの効果を検証した。具体的には、

- ・渋滞時： $\sigma_1=0$ , 100mに5台以上
  - ・非渋滞時： $\sigma_1=1$ , 100mに1台以下
- という2つの状況で、シミュレーションを行なった。

また、要求モードとしては、

- ・燃費要求モード： $\sigma_2=0$
- ・交通容量要求モード： $\sigma_2=1$

この時の燃費特性、交通容量特性をFig.9, Fig.10に示す。

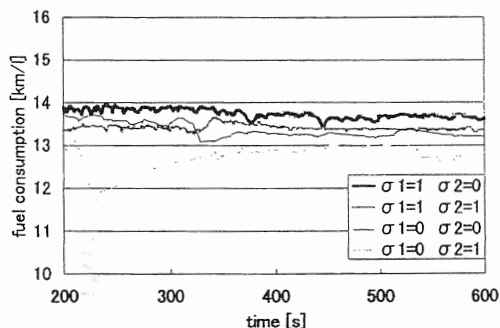


Fig. 9 Fuel Consumption

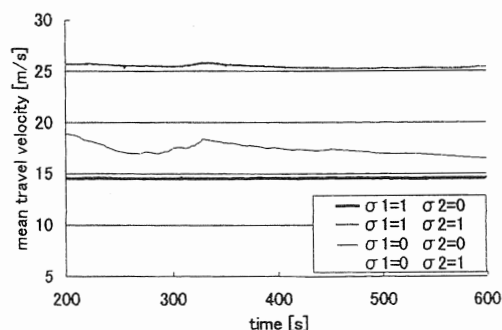


Fig. 10 Traffic Capacity

このシミュレーション結果から、次の事項が確認された。

- ・渋滞時、非渋滞時いずれの場合も、燃費などの要求モードを満たした制御が行なえた。
- ・積極的に車間距離を制御することにより、交通状況に応じた制御が行なえた。

#### 5. 結言

本研究では、プラトーンレベルでの制御の有効性を明らかにした。特に、タスクコントローラを導入し、制御構造を階層化することで、容易にプラトーンレベルで制御を行なう手法を提案した。以下に、今回得られた知見を述べる。

- ・プラトーンの制御量(車間距離、速度)が交通流の動特性に与える影響をシミュレータを用いて明らかにした。
  - ・提案された手法を用いれば、交通容量や燃費といった交通流特性を、プラトーンレベルで調整できることを明らかにした。
  - ・インフラからの情報を用いてプラトーンを制御する手法を提案し、その効果を確認した。
- 今後は、プラトーンを制御する変数をさらに増やし、より効果的な制御手法を確立するとともに、合流・離脱といったより現実的なモデルを制御する手法を検証していく予定である。

#### 文 献

[1]T.Kokubo : "Development of an Automatic Speed Control Algorithm Based on Traffic Flow", AVEC98, p.p. 755-759, Japan, (1998)  
 [2]Chi-Ying Liang, et.al : "Optimal Adaptive Cruise Control with Guaranteed string Stability", AVEC98, p.p.717-722, Japan, (1998)  
 [3]T.Kawabe , et.al : " A Concept of "Car in a Virtual Moving Cell" Platoon Construction on an Automated Highway System", IEEE ITSC1997, p.p.397-402, Japan, (1997)  
 [4] 伏木匠 : "ITSのためのトラフィックシミュレータの開発", Symp. on Simulation of Traffic Flow, Japan, (1996)  
 [5] 長谷部 勝也 : "高速道路における車両速度の自動制御", Symp. on Simulation of Traffic Flow, Japan, (1996)  
 [6] Arnob Bose, et.al : "Analysis of Traffic Flow with Mixed Manual and Semi-Automated Vehicle", Proceedings of 1999 American Control Conference, (1999).