

令和元年6月8日現在

機関番号：12301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K21397

研究課題名(和文)交通流の円滑化に資する車両制御システムの研究

研究課題名(英文)A Study of Adaptive Cruise Control for Smooth Traffic

研究代表者

小木津 武樹(Ogitsu, Takeki)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：00621202

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、自動車の交通流の円滑化に新しいソリューションを提供する。Adaptive Cruise Control (ACC) とV2Xを組み合わせると、制御安定性を確保しながら従来よりも自由に目標車間距離の設計が可能になる。本研究では交通流の円滑化に焦点を当てて目標車間距離を設計した。具体的には、車間距離を速度のべき乗に比例させるEDGを開発した。EDGは、低速度域では一定車間距離制御の性質を持ち、高速度域では一定車間時間制御の性質を持つ。本研究では、EDGを用いた制御アルゴリズムの開発を行い、実験による評価から、従来手法よりも交通流の整流効果と省エネルギー化が得られることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案する手法を用いる車間距離制御を利用することで、利用する車両のドライバの省力性や無駄な加減速と、後続車両に対するショックウェーブを、従来の車間距離制御手法に比べて軽減する事を両立できる。これにより、自動車交通における利便性の向上と省エネルギー化に貢献する。

研究成果の概要(英文)：This study offers a new solution for smoothing the flow of vehicle traffic. The combination of adaptive cruise control (ACC), a kind of ADAS, and V2X enables the freer design of a gap control strategy than before while maintaining control stability. If ACC is to be installed on more vehicles in the future, its influence on traffic flow must be reduced. Therefore, this study designs a gap control strategy focusing on smoothing the traffic flow. In particular, this study proposes an ACC that relies on the exponentiated distance gap (EDG), which makes vehicle-to-vehicle distance proportional to a power of vehicle velocity. EDG uses a constant distance gap (CDG) in the lower velocity range and a constant time gap (CTG) in the higher velocity range. In this paper, details of EDG are described in comparison with CDG and CTG. In addition, this study reports the evaluation of the EDG's influence on traffic flow, in comparison with CDG and CTG.

研究分野：カーロボティクス

キーワード：Gap Control Strategy Adaptive Cruise Control Cooperative ACC Platooning V-to-V Communication ITS

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

年々進化を続けており先進運転支援システム（ADAS）は、自動車交通における安全の一翼を担うようになった。研究開始当初においても430万ドルの市場規模であるADASは今後も多くの市場予想で規模は拡大する見込みである。日本に目を向けてみると、2014年以降新たに生産される大型バスやトラックなどの商用車で衝突軽減ブレーキの搭載が義務化されている。今後も、世界的に様々な種類のADASが義務化されるなどの理由で、普及率は高まっていくだろう。一方で、ADASは主に安全とドライバの省力化を目的として研究開発されてきたが、今後は交通流への影響を考慮するべきである。

また、将来的にV2X（Vehicle to Everything）通信が積極的に利用されていく可能性が多くの報告書によって示唆されている。ADASでV2Xを利用すると、車載センサでは得られなかった情報を得ることができ、あらゆる性能を向上することができる。特にV2V（Vehicle to Vehicle）通信で周囲の車両の情報を取得することで、制御の性能が向上できることは良く知られている。

ACC（Adaptive Cruise Control）はADASの初期から存在する。ACCでV2Vを利用して前走車の状態量を取得すると、車間距離制御の安定性が大きく向上することは良く知られている。従来のACCで制御の安定性を向上させるためには、端的に言えば、制御のフィードバックゲインを高く設定するか、目標車間距離を広く設定する必要があった。一方でV2Vを使用したACCは制御のフィードバックゲインを低く、かつ目標車間距離を短く設定しても、制御安定性を確保することができる。これを言い換えれば、現代のACCはV2Vを使用することで、制御の安定性は保証されながら、目標車間距離設計の自由を得たといえる。

2. 研究の目的

本研究で取り扱うACCは、前方に車両がいた場合、決められた車間距離を目標としてアクセル（場合によってはブレーキも）を制御するADASである。ACCはISOによって標準化されている技術である。この制御は、車間距離が速度に比例するCTG（Constant-Time Gap）と呼ばれる目標車間距離設計に基づいている。CTGは、人間の一般的な運転動作に似ていることと、制御安定性が比較的確保しやすいことが特徴である。一昔前まで、ACCは、自車に搭載されたセンサのみで実現されるために、制御に必要な情報の品質に課題があった。しかし近年では全車速域での制御も可能となっている。

ACCにV2Vを使用した次世代の制御システムが、CACC（Cooperative ACC）である。CACCはACCと同様にCTGに依存している。ただしCACCは、V2V通信により前走車の品質の良い状態量を得ることができるため、ACCよりも短いTime Gapで走行することが可能である。またACCで課題であった、ストリングスタビリティの確保も、CACCではV2V通信のおかげで容易に実現ができる。ストリングスタビリティの確保は、自車前方のトラフィックショックウェーブを後方に増幅伝搬しないという効果を生む。

また、目標車間距離設計には、速度に因って車間距離を変化させないCDG（Constant Distance Gap）と呼ばれるもう一つの設計がある。PCC（Platooning Cruise Control）はCDGの代表的なADASである。一定の車間距離を極めて小さく保って制御することで、交通容量を増加させたり、高速域での空気抵抗を軽減してエネルギー消費を軽減させたりすることができる。PCCもCACCと同様にV2V通信を利用しており、ストリングスタビリティが確保される。

従来の目標車間距離設計は、全てCTGかCDGが前提となっており、見直される流れは見られない。これは技術的課題から、主に高速域での使用を前提に開発されてきたことが歴史的背景としてあることが原因の一つである。高速道路のような高速域のみを考えた場合、基本的に前走車の動きは少ないため、CTGやCDG以外の変則的な目標車間距離設計は必要としない。しかし、全車速域での動作を可能とする場合、各速度域で異なる目標車間距離設計が最適である可能性が充分にある。

そこで本研究では、交通流の円滑化に焦点を当てて新たな目標車間距離設計を提案する。提案する目標車間距離設計を用いるACCは市街地を含めたフル速度域の利用を想定する。提案する目標車間距離設計を用いるACCを利用することで、利用する車両のドライバの省力性や無駄な加減速と、後続車両に対するショックウェーブを、従来の車間距離制御手法に比べて軽減することを目的とする。

具体的には、上記の目的を達成するための目標車間距離設計を行う。また、実際の制御アルゴリズムを開発し、提案する設計が期待した効果を持つことを評価し報告する。

3. 研究の方法

本研究を説明するために、現在存在する目標車間距離設計について整理したい。ここでは、目標車間距離設計による交通流の円滑化のみに焦点を当てて議論を進める。片道一車線の平面路において複数の車両が縦一列の群を形成しているものとする。すべての車両は横方向への移動はしない。

まず、低速度域での走行を考える。速度制限が無い道路での低速度域での走行は、信号や渋滞などの減速・停止要因がある状況が予想される。もしその状況で車を運転しているならば、安全な範囲で前走車に続いてなるべく車間距離を空けずに早く加速することが後続車への親切とな

る。渋滞の終わりでこの行動をとることが、渋滞の解消に貢献することは良く知られている。つまり、後続車が存在する低速度域の状況において、交通流全体を見たとき、自車取るべき最善の行動は、安全限界まで前走車に接近して、前走車と同じ行動をして車間距離を拡げないことであると言える。

次に我々は高速度域での走行を考える。高速度域で走行しているということは、道路の交通容量に余裕がある状況が予想される。もしその状況で車を運転しているのなら、低速域の細かなアクセルとブレーキの操作から解放され、前走車の挙動に左右されず、なるべく一定の速度で走行することが一般的なドライバの習性である。また、無駄な加減速が少ないことはエネルギー消費の削減にもつながる。つまり、後続車が存在する高速度域の状況において、交通流全体を見たとき、自車取るべき最善の行動は、後続車に悪影響を及ぼさない範囲で前走車の無駄な加減速の振幅を減衰できるほどに車間距離を拡げて走行することであることが分かる。

ここで、ACCやCACCの依存しているCTGの各速度域での特徴を整理する。CTGは、前章で述べた通り、車間距離が速度に比例する。言い換えれば、前走車の速度に対して自車の速度周期応答が一次遅れとなる。つまり、図1の様に、前走車の無駄な加減速の振幅を減衰したい高速域でのCTGは理想的であるが、前走車との車間距離を拡げたくない低速域でのCTGは後続車に悪影響を及ぼす。低速域でのCTGはショックウェーブの発生の原因であり、可能なら行うべきではない。人間による運転がショックウェーブを発生させるのも、人間がCTGで走行するためである。また、高速域でのCTGも、後方交通流の状況によって慎重に者感時間を設定しないと、後方交通流に悪影響になる可能性がある。

次に、PCCの依存しているCDGの各速度域での特徴を整理する。CDGは、前章で述べた通り、速度に因って車間距離を変化させない。言い換えれば、前走車の速度に対して自車の速度が同じになる。つまり、図2の様に、前走車の無駄な加減速の振幅を減衰したい高速域でのCDGは、その要求を全く満たさないが、前走車との車間距離を拡げたくない低速域でのCTGは理想的である。ここで、高速域での短いCDGは、前走車のスリップストリームに入ることができ、エネルギー削減効果があることが多く報告されていることに注意したい。ただしスリップストリームの恩恵を受ける車両は、車群の後続車両に限られる。また、十分なエネルギー削減効果を得るために必要な高速かつ極めて短い車間距離で故障時の安全を確保する必要があるなど、高速域でのCDG特有の課題を克服する必要がある。

本研究では上記を考慮して、全車速域の制御設計において、低速域はCDG、高速域ではCTGとなることが理想的であると仮定した。ただし、CDGとCTGを切り替えは、切り替え地点における制御安定性が損なわれる。そこで、本研究で提案する制御設計では車間距離が速度のべき乗に比例させる。以下ではEDG(Exponentiated Distance Gap)と呼ぶ。図3はCDG、CTG、EDGの特徴を示す。図のように、EDGは、より低速ほどCDGの性質を持ち、より高速ほどCTGの性質を持つ。制御設計の性質の変化は連続的なため、制御設計の切り替えによる制御の不安定化は起きない。EDGは速度の乗数や係数が、制御設計の性質を変化させるパラメータとなる。

提案するEDGによるACCの実現については様々な検証を必要とする。そこで本研究では、車間距離が速度の2乗に比例するEDGを例に、後方交通流に対する影響を、CDGとCTGとの比較によって評価することに焦点を当てた。

4. 研究成果

まず本研究での成果の一部として、EDGの制御設計で走行する車両のモデルを説明する。また、提案するEDGの制御設計が後方交通流に与える影響を評価するために行ったシミュレーション評価について報告する。

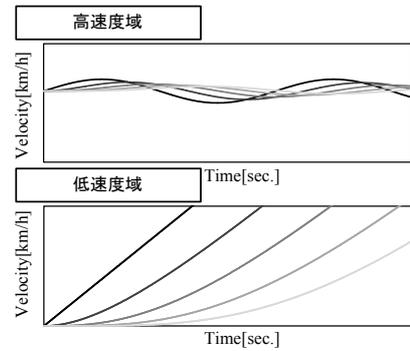


図1 CTGの挙動特徴

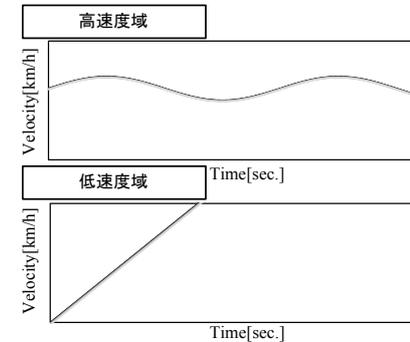


図2 CDGの挙動特徴

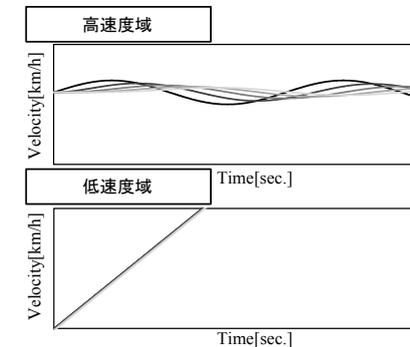


図3 EDGの挙動特徴

(1) 車両モデル

本研究では、CDG、CTG、EDG の三つの目標車間距離設計によって走行する車両モデルを設計した。まず、CDG で走行する時刻 t における i 番目の車両の時刻 $t+dT$ の速度 V_i を求める式を以下に示す。

$$v_i(t+\Delta t) = v_{i-1}(t) \quad (1)$$

ここで $i-1$ とは直前車を示す。

次に、CTG の目標車間距離設計で走行する時刻 t における i 番目の車両の時刻 $t+dT$ の速度 V_i を求める式を以下に示す。

$$v_i(t+\Delta t) = \lambda(t)v_{i-1}(t) + (1-\lambda(t))v_i(t) \quad (2)$$

$$\lambda(t) = 1 - e^{(-\Delta t/\tau)} \quad (3)$$

ここで τ は設定する目標車間時間である。

次に、EDG の目標車間距離設計で走行する i 番目の車両の速度 V_i を求める式を以下に示す。

$$v_i(t+\Delta t) = \lambda(t)v_{i-1}(t) + (1-\lambda(t))v_i(t) \quad (4)$$

$$\lambda(t) = 1 - e^{(-\Delta t/\kappa v_i(t))} \quad (5)$$

ここで κ は、速度に対する目標車間距離の変化量を調整する係数である。

上記のいずれかで求めた i 番目の車両の時刻 $t+dT$ の速度 V_i から位置 x_i と直前車との車間距離 d_i を求める式を以下にそれぞれ示す。

$$x(t+\Delta t) = x(t) + v(t)\Delta t \quad (6)$$

$$d_i(t+\Delta t) = x_{i-1}(t+\Delta t) - x_i(t+\Delta t) \quad (7)$$

このシミュレーションでは車両の長さや制御遅れは考慮しない。また、シミュレーション開始時に設定する最低車間距離を保ったまま停止しているものとする。

また、この交通流シミュレーションでは、提案する ECG が交通流にもたらす省エネ効果の評価を行うために、走行するすべての車両のエネルギー消費量を記録する必要がある。本論文では、得られるエネルギー消費量の結果を一般化するために、以下の式を用いる。

$$J_k(t+\Delta t) = \begin{cases} 0 & (v(t+\Delta t) - v(t) \geq 0) \\ m\{v(t+\Delta t) - v(t)\}^2 & (v(t+\Delta t) - v(t) < 0) \end{cases} \quad (8)$$

$$J_R(t+\Delta t) = \{C_{rr}mg + \rho C_D S v(t+\Delta t)^2\} v(t+\Delta t) \Delta t \quad (9)$$

$$J_{total}(t+\Delta t) = J_{total}(t) + J_k(t+\Delta t) + J_R(t+\Delta t) \quad (10)$$

ここで、 m はエネルギー消費量を算出する車両の重量、 C_{rr} は転がり抵抗係数、 C_D は空気抵抗係数、 S は全面投影面積、 g は重力加速度、 ρ は空気密度である。評価では J_{total} を評価終了後の車両の総エネルギー消費量とする。

(2) 評価条件

この評価実験では平坦な一車線の道路の 100 台分の車両モデルを算出する。実験開始時にはすべての車が 4m の車間距離を保って停止している。実験で車両モデルを計算する周期は 200Hz である。先頭車のみ日本の燃費測定に用いられる車両走行パターンである JC08 に合わせて走行する。JC08 の走行パターンを図 4 に示す。上記の条件で、残りのすべての車両を CDG、CTG、EDG のいずれかの Control strategy で走行させて評価を行った。車両 s の状態量データの記録は 10Hz で行った。図 5 に各 control strategy の速度毎の目標車間距離を示す。

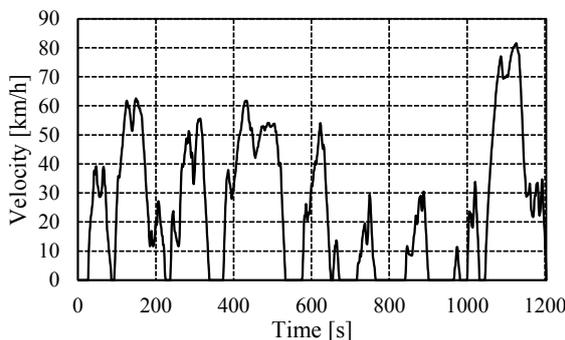


図 4 JC08 モード速度パターン

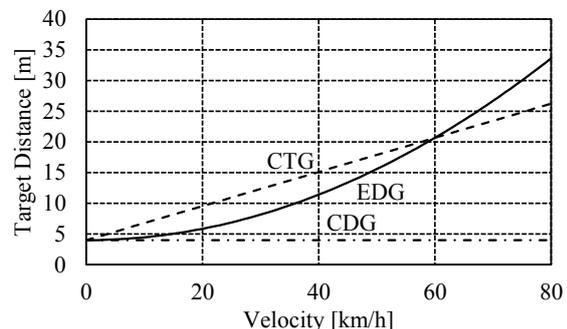


図 5 各設計と目標車間距離の関係

(3) 評価結果

図6は、先頭車を除く全車両がCTGで走行する場合における、時刻毎の先頭車を除く全車両の最高、最低、平均速度を示す。これを見ると、先頭車のJC08の走行パターンに対して、それ以外の車両の走行パターンは平滑化されていることが分かる。また、先頭車が停止からの発進をした際、最低速度がしばらくゼロを維持していることが見て取れる。これはCTGがショックウェーブを発生させて、後続の交通流に対して悪影響を及ぼしているためである。

図7は、先頭車を除く全車両がCDGで走行する場合における、時刻毎の先頭車を除く全車両の最高、最低、平均速度を示す。結果を見ると、全ての車両が先頭車のJC08の走行パターンと同じ走行パターンであることが分かる。また先頭車が停止からの発進をした際、トラフィックショックウェーブは全く発生していないため、CDGが低速度域で後続の交通流に対して悪影響を及ぼすことはない。一方で、高速度域で先頭車が細かな加減速を行った場合でも、全ての後続車が同じ走行パターンであるため、無駄な加減速が後方に伝搬するCDGの特徴も明らかである。

図8は、先頭車を除く全車両が提案するEDGで走行する場合における、時刻毎の先頭車を除く全車両の最高、最低、平均速度を示す。結果を見ると、先頭車が停止からの発進をした際、EDGはCTGに比べて最低速度の上昇が早いことが分かる。これはEDGが低速度域ではCDGの性質を持ち、後方へのショックウェーブを軽減しているためである。一方高速度域では、先頭車のJC08の走行パターンに対して、それ以外の車両の走行パターンは平滑化されていることが分かる。これは、これはEDGが高速度域ではCTGの性質を持ち、前走車の無駄な加減速を後方に減衰して伝搬するためである。

図9は、CTG、CDG、EDGの各車両の燃料消費を比較している。先頭車両の燃料消費を100%として示している。これを見るとCDGはすべての車両が同じ燃料消費量である一方で、CTG、EDGは後方の車両ほど燃料消費が少なくなることが見て取れる。EDGはその中でも燃料消費が最も少なくなる傾向があることがわかる。

以上により、本研究で提案するEDGの交通流の円滑化に効果があることが証明された。

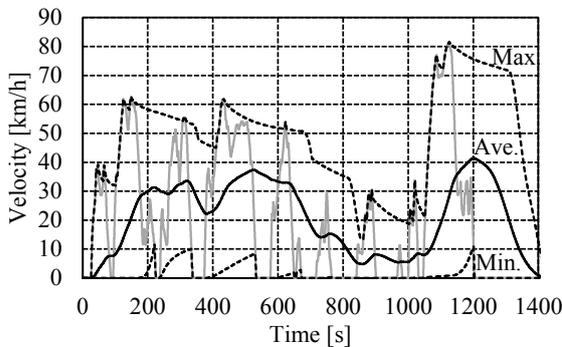


図6 CTGの時間毎の速度の統計

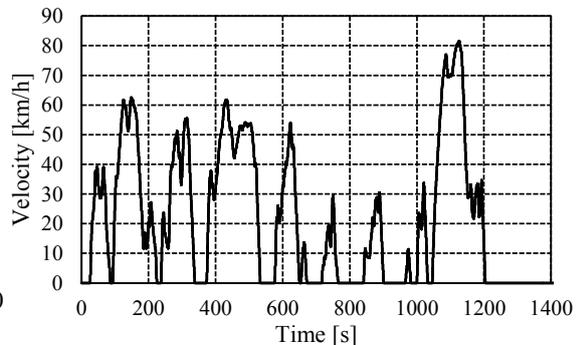


図7 CDGの時間毎の速度の統計

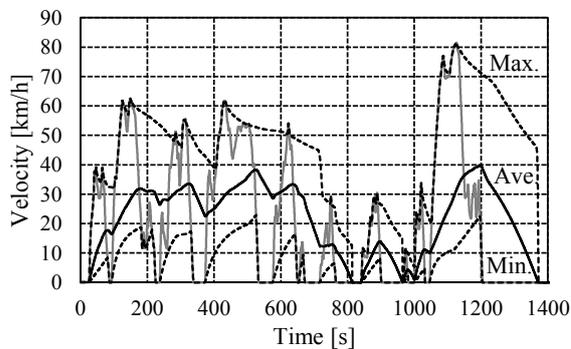


図8 EDGの時間毎の速度の統計

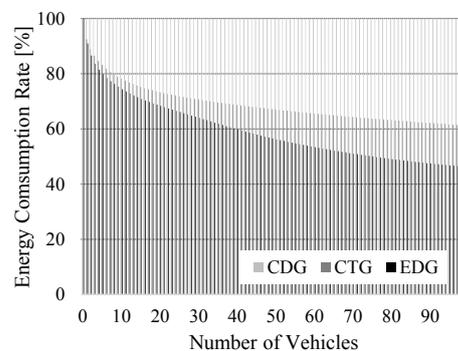


図9 各目標車間距離設計における燃費

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計0件)

〔学会発表〕 (計0件)

〔図書〕 (計0件)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。