2112 普通車及び大型車が混在する交通流における車速制御アルゴリズムの研究

A Study on Automatic Speed Control Algorithms Based-on Mixed Traffic Flow of Cars and Trucks

○学 パニティ・ダンシュー (防衛大) 正 原田 正範 (防衛大) 正 吉本 堅一 (防衛大)

Panithi Dangchoo

Masanori Harada

Ken-ichi Yoshimoto

National Defense Academy, 1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka-shi, Kanagawa-ken 239-8686

In late years, a problem of a traffic jam becomes a beginning social problem by increase of traffic volume on a town area and a highway. Technical introduction of ITS is expected to solve this problem. This study examines speed control algorithm of a vehicle in the traffic flow simulation that tracks mixes with cars aiming at increase of traffic volume. And in consideration of a human characteristic, we examine the influence that automatic driving and driving to be worked by hand give to traffic flow.

Key Words : Mixed Traffic Flow, Simulation, Automatic Speed Control Algorithm

1 序論

近年, 市街地や高速道路での交通量の増加により, 交通渋滞を代表とした様々な交通問題が起こり, 社会問題化している. 交通流の円滑化が環境面から求められ, これを解決する為に幾つかの ITS システムが提案されている. 本研究は, 交通量の増大と言う効果を目指して車群や車両単独の挙動が安定となるような車速制御アルゴリズムを開発する. 小久保ら [2, 3] は, 通行車両が一種類の場合について, 車速制御アルゴリズムの交通流に与える影響を調べたが, 本研究はこれに基づいて車両二種類の場合を検討する.

具体的には, 簡単な制御システムを用いて車群及び車両単独の安定性を考慮し, 普通車・大型車が混合した時の交通流シミュレーションを行い, 自動又は手動運転時における交通流が交通量や交通密度に及ぼす影響について比較・検討を行う.

2 車速制御アルゴリズム及び交通量

2.1 交通流の性質に記述する状態量 [1]

交通流を評価する尺度として最も一般的に用いられるのは, 交通量及び交通密度がある. その関係は以下の通りなる.

$$Q = K \cdot \bar{v}_s \quad (1)$$

但し, Q [台/h] は車両の交通量, K [台/km] は車両の交通密度, $\bar{v}_s$ [km/h] は車両全体の空間平均速度である.

2.2 車間時間一定制御

従来の研究において速度制御の方法としては, 車間時間一定制御及び車間距離一定制御がある. 車間時間一定制御は, 目標車間距離を速度に比例させ, 目標車間時間が一定とするような速度で走行する.

Fig. 1: 追従走行モデル

まず, Fig.1 により, 大型車両と普通車両の割合が $\gamma : 1-\gamma$ と言う仮定からの平均車間距離 $\bar{d}$ [km] は次のようになる.

$$\bar{d} = \frac{1 - (l_c(1-\gamma) \cdot K + l_t\gamma \cdot K)}{K} \quad (2)$$

また, 自由走行状態では最高速度 $v_{max} = 30[m/s]$, 追従走行状態では平均車間距離が $\bar{d}$ となるので, 速度と交通量は

$$\bar{v} = \min(v_{max}, \frac{1 - (l_c(1-\gamma) \cdot K + l_t\gamma \cdot K)}{K \cdot T_m}) \quad (3)$$

$$Q = K \cdot \bar{v} = \min(K \cdot v_{max}, \frac{1 - (l_c(1-\gamma) \cdot K + l_t\gamma \cdot K)}{T_m}) \quad (4)$$

となる. Fig.2(a) は, 普通車両と大型車両が混合した時の K - Q グラフを示す. 車間時間 $T_m = 1.0[s]$, 大型車両の存

在率を0, 10, 20, 30, 40, 50%と設定した。図により、各車両は最高速で走っている状態（自由走行状態）では、交通密度と共に交通量が増加しており、追従走行状態に入った途端に交通量は飽和してしまう。更に、大型車の割合が多い程、交通量が低下し、臨界密度が低くなり、追従走行状態への遷移は早い段階となっている。

Fig. 2: 混合交通流の場合の K-Q の関係

2.3 制動距離確保制御

Fig.2(a) において高交通密度では交通量が減少してしまうと言う渋滞の現象が想定できる。このような現象を抑制する為に、追突防止システムを利用した制動距離確保制御が必要である。そこで、車重 M の車両を速度 v で走行中の状態から急ブレーキをかけて完全に停止するまでの距離を算出する。路面の動摩擦係数 μ とおくと

$$d_{stop} = v \cdot T_d + \frac{v^2}{2\mu g} \quad (5)$$

T_d はブレーキを踏むと判断してから実際にブレーキが効き始めるまでの時間遅れを意味する。また、自車の速度から定まる制動距離は目標車間距離と等しいので、平均速度 $\bar{v}$ と交通量 Q は次のようになる。

$$\bar{v} = \sqrt{(\mu g T_d)^2 + 2\mu g \frac{1 - (l_m(1-\gamma) \cdot K + l_n \gamma \cdot K)}{\mu g T_d}} \quad (6)$$

$$Q = \min(K \cdot v_{max}, K \cdot \bar{v}) \quad (7)$$

Fig.2(b) は、路面摩擦係数 0.8, 反応時間 0.1[s] とした場合の交通流である。グラフは車間時間一定制御を比べて追従走行状態への遷移が早くなっているが、交通量が飽和せず、更に増加し、臨界密度は車間時間一定制御と比べてより高くなっている。そして、反応時間が大きくなると交通量が全体的に低下しているが、高交通密度での交通量の落ち込みが顕著であり、臨界密度も大きく低下する。また、大型車の存在する比率が多い程交通量が低下してしまうということが分かった。

3 車群全体及び車両個々の挙動の安定性

3.1 車間時間一定制御

Fig. 3: 車間時間一定制御の模式図

Fig.3 より車両が一列になって走行している時、先行車 $k-1$, 後方車 k 番目の車両の時刻 t における加速度は以下ようになる。

$$\ddot{x}_k(t + T_d) = G\{x_{k-1}(t) - x_k(t) - T_m \cdot \dot{x}_k(t)\} \quad (8)$$

アルゴリズムは、先行車と自車との実際の車間距離 ($d_k = x_{k-1} - x_k$) 及び目標車間距離 ($d_k^* = T_m \cdot \dot{x}_k$) との差にフィードバックゲイン G をかけると自車の加速度になる。尚、このフィードバックループには無駄時間 T_d だけ存在する。先行車の位置を入力、自車の位置を出力とすると式 8 により、伝達関数は

$$H(s) = \frac{G}{e^{T_d \cdot s} \cdot s^2 + T_m G \cdot s + G} \quad (9)$$

また、この式 9 により、先行車の速度が後続車の速度へ増幅して伝播しない (String Stability) ためには、周波数応答のゲインが任意の周波数に対して 1 以下であると設定すると以下の関係が分かる。

$$T_m^2 G > \frac{2}{\cos \omega T_d} \quad (10)$$

以上により、車群を安定する為には、 T_m と G を大きく、 T_d を小さく設定することが望ましいと言える。

3.2 制動距離確保制御

前節と同様に次のようなフィードバック制御によって車両の速度を制御するものとする。

$$\ddot{x}_k(t + T_d) = G\{x_{k-1}(t) - x_k(t) - [\frac{1}{\mu g} \bar{v}_k + T_d] \dot{x}_k(t)\} \quad (11)$$

ここで、式 10 により、自動運転システムの場合を想定して制御系の無駄時間を無視できると仮定すると式 11 の第二項の部分は

$$T_m = \frac{\bar{v}_k}{\mu g} + T_d, \quad \left(\frac{\bar{v}_k}{\mu g} + T_d\right)^2 G > 2 \quad (12)$$

となる。よって、式 12 より、平均速度が小さい程 (目標車間距離 → 短) 条件を満たすのに困難であり、車群が不安定になりがちである。また、無駄時間を長くすると交通量が大幅に低下してしまう。従って、本研究の目的である交通量の増大と言う効果を失うことなく車群が安定のまま実現することがほぼ不可能であると言える。これに対応できるような工夫を考えなければならない。

3.3 微分動作の導入

これは、3.1, 3.2 節で検討したように交通量を増大しつつ車群を安定する為に、先行車の速度が車間距離の変化などからある程度知ることができると仮定する。つまり、予測時間 T_p 秒後の車間距離を予測し、目標車間距離との誤差をフィードバックするものとし、以下のような加速制御を求められる。

$$\ddot{x}_k(t + T_d) = G\{x_{k-1}(t) - x_k(t) + T_p[\dot{x}_{k-1}(t) - \dot{x}_k(t)] - T_m \cdot \dot{x}_k(t)\} \quad (13)$$

$$\ddot{x}_k(t + T_d) = G\{x_{k-1}(t) - x_k(t) + T_p[\dot{x}_{k-1}(t) - \dot{x}_k(t)] - \left[\frac{1}{\mu g} \bar{v}_k + T_d\right] \dot{x}_k(t)\} \quad (14)$$

4 シミュレーションによる検証

4.1 シミュレーションの概要

最大速度	v_{max}	30	[m/s]
最低速度	v_{min}	0	[m/s]
常用最大加速度	a_{max}	2	[m/s ²]
常用最大減速度	a_{min}	-2	[m/s ²]
普通車の摩擦係数	μ_c	0.80	—
大型車の摩擦係数	μ_t	0.64	—
普通車長	l_c	5	[m]
大型車長	l_t	10	[m]
サンプリングタイム	dt	0.1	[s]
無駄時間 (自動運転)	T_d	0.1	[s]
無駄時間 (手動運転)	T_d	1.0	[s]
予測時間	T_p	1.0	[s]

Table.1 車両性能のパラメータ

本節は、車速制御アルゴリズムと交通流の関係から求めた理論値を車群の安定性を考慮しながら、Table.1 のような車両性能パラメータを用いてシミュレーション実験で検証する。

4.2 車間時間一定制御のシミュレーション検証

まず、自動運転システムを想定して遅れ時間 $T_d = 0.1[s]$, $T_m = 1.0[s]$ の場合を考える。Fig.4 により、高密度時の車群の挙動の安定性が茶色左右されるが、2.2 節で検討したシミュレーションと比較してほぼ一致していることが分かった。しかし、Fig.5 のように人間が運転すると想定をした場合 $T_d = 1.0[s]$ については、車群の安定性が満たして自由走行状態において各車の挙動は影響がないが、追従走行状態に入った途端車群が不安定になり、パニックブレーキが頻発に行われており、その影響に交通量が激減してしまうという現象が観測される。

Fig. 4: 車間時間一定制御における自動運転

Fig. 5: 車間時間一定制御における手動運転

4.3 制動距離確保制御のシミュレーション検証

Fig.6 により, 無駄時間 $T_d = 0.1[s]$ の自動運転システムの場合は, 理論値とほぼ同じであるが, 高交通密度領域では平均速度が低い為, 車群が不安定となり, その影響で交通量が減少してしまう. 特に大型車が多くなると臨界密度が低くなり, 不安定となる時期 (交通量が急激に低下する) が早くなっていることが分かった. また, 無駄時間 $T_d = 1.0[s]$ の手動運転の場合については, 最初は自由走行状態でスムーズに流し得るが, 高交通密度となると車群安定であるものの, 車両挙動がやや変化する為, Fig.7 のように交通量が増減することが観測される. しかし, Fig.8 のように相対速度の変化を予測することによる微分動作の導入によって, パニックブレーキの頻度が減り, 車群が安定となる為, 交通量の激減を抑制することができる.

5 結論

この車速制御アルゴリズムが交通流に与える影響については以下のように述べられる.

- i. 目標車間時間が短い程, 交通量は増大するが, 車群の安定性に損なわれる.
- ii. 制御系の無駄時間が小さい程, 車群は安定である.
- iii. 自車の加速度を決定するゲインは大きいほど車群安定であるが, ゲインを大きくしすぎると車両個々の挙動に影響されやすくなる.
- iv. 車速制御アルゴリズム及び安定性解析の結果より, この交通流シミュレーションが妥当であることが検証できた.

参考文献

- [1] P.S.Fancher, Z.Bareket, The Influence of Intelligent Cruise Control System on Traffic Flow, Proceedings of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 1994, pp.402-407, 1994
- [2] 小久保哲志, 吉本堅一, 自動運転アルゴリズムの交通流に与える影響, 自動車技術会学術講演会前刷集 964, pp.53-56, 1996
- [3] 吉本堅一, 小久保哲志, 交通流に注目した車速制御アルゴリズムの開発, 自動車技術学会論文集, vol.29, No.4, pp.147-152, 1998

Fig. 6: 自動運転時の制動距離確保制御のシミュレーション

Fig. 7: 手動運転時の制動距離確保制御のシミュレーション

Fig. 8: 微分動作導入時の K-Q シミュレーション