

非均質な制御に基づいた移動ロボット群の小プラトーン走行

星野智史 (宇都宮大学)

1. 序論

知的交通システム (ITS: Intelligent Transportation System) の分野では, 車の自動走行に関する制御の研究が行われ, 適応的走行制御手法 (ACC: Adaptive Cruise Control) により, 車が渋滞を形成することなく同一レーン (車線) 上を一列の塊となって走行することに成功した [1] [2]. 本論文では, 自律的な移動ロボットによる本走行形態のことをプラトーン走行と呼ぶ.

著者はこれまで, AGV のようなレーン上を自律移動するロボットの群れを対象に, それらが渋滞を形成することなく高速にプラトーン走行するための方法論について研究してきた [3]. また, レーンが交差・合流するシステムにおいて, ロボット群がプラトーンを複数のクラスタに局所分割し, その単位で小プラトーン走行する手法を提案した [4].

しかしながらこれら従来研究の多くは, 走行に関する全ての性能は同等であり, 一様な制御器が搭載されていることを前提としてきた. しかしながら現実には, 異なった制御器が搭載されていることもある. そこで本論文では, 移動ロボット群の制御系に関する非均質性を考慮した上で, 高速な小プラトーン走行を行うための方法論について述べる.

2. 非均質な制御に基づいた移動ロボット群

2.1 適応的走行制御手法 (ACC)

本研究では, 前述の ACC を適用することで, ロボット群によるプラトーン走行を可能とする. ロボット群に対して, 前から順に番号 n を割振ると, ACC システムの力学モデルは以下の式で表すことができる.

$$\tau \frac{dv_n(t)}{dt} + v_n(t) = V(\Delta x_n(t), \Delta v_n(t)) \quad (1)$$

$\Delta x_n(t) = x_{n-1}(t) - x_n(t)$ と $\Delta v_n(t) = v_{n-1}(t) - v_n(t)$ は, n 番目のロボットとその前のロボットとの相対距離ならびに速度を, τ は反応時間を示している.

ACC では, ロボットの相対速度を一定にし, ロボット間距離を維持するよう制御が行われる. そのため, 式 (1) における V は以下の式で表すことができる.

$$V = \frac{1}{h_d} \{ \Delta x_n(t) - L \} + \alpha \Delta v_n(t) \quad (2)$$

式 (2) において, h_d はロボットの間隔時間, L は最低安全距離, α は相対速度に対する係数のことである. このとき, $\alpha = \tau/h_d$ であれば, ロボット間の結合安定性 (String stability) が保証され [5], 渋滞が形成されないことも明らかにされている [6].

2.2 バンバン制御

本研究では, バンバン制御に基づいて走行するロボットが混入することを想定する. ロボットは, 進行方向

前方に最低安全距離 (L) と速度 v に基づく停止距離からなる制御対象領域を有している. そして, 前のロボットとの相対距離から自らの加減速度を決定する.

目標とするロボット間距離 L はあるものの, 式 (2) における目標速度 V は存在しない. そのため, 速度は式 (1) の左辺 $\tau dv(t)/dt + v(t)$ から天り的に計算される. このとき, ロボットの加減速度 $dv(t)/dt$ は, 前述の制御対象領域内に前のロボットが存在するか否かにより一意に決定される.

前のロボットが制御対象領域内に存在した場合, 最大減速し, 外に存在した場合は最大加速する. したがって, バンバン制御によりロボットは, 前のロボットとの距離を最短の L に保つよう走行することができるものの, 制御の特性から, 発進 (最大加速) と停止 (最大減速) を繰り返すこととなる.

3. クラスタを単位としたプラトーン走行

ACC に基づきロボット群が走行する場合, プラトーンのサイズは投入台数に応じて増大してしまう. そこで, プラトーン内のロボット群が複数台でクラスタを構成し, これを単位としたプラトーン走行を行うことによりサイズを小さくする.

図 1 が示すように, ロボット (R_h) は, 前 (R_p) 後 (R_f) で隣接するロボットのいずれかとクラスタを構成する. その際, R_h は R_f および R_p との相対的な距離 ($\Delta x_f, \Delta x_p$) ならびに速度 (v_{R_f}, v_{R_p}) のみの情報に基づいた意思決定を行う.

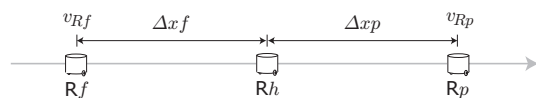


図 1 前後で隣接するロボットの相対距離ならびに速度情報

R_h は基本, 距離情報に基づき近い方のロボットとクラスタを構成する. ただし, 交差や合流によってプラトーンが停止した際には, 距離に加え速度情報も考慮し, R_f と R_p で速度の速い方とクラスタを構成する.

1 つの大きなプラトーンから複数の小さなクラスタが分離するため, 各クラスタの先頭ロボットが速度を決定する. そのため先頭ロボットには, 前のロボットより速く走行していた場合に仮想ダンバが挿入され, $D\Delta v$ の相互外力が作用する. D は粘性係数で $D = \text{単位速度}/\Delta x_n$ である. 図 2 に, 相互外力によってロボット群が小プラトーン走行している様子を示す.

ACC に基づいたクラスタ内追従ロボットの目標速度は, 式 (2) から算出される. 一方, 先頭ロボットの目標速度は式 (3) から算出される. 各ロボットの加速度は, 目標速度に基づき式 (1) から決定される.

$$V = \frac{1}{h_d} \{ \Delta x_n(t) - L \} + \alpha \Delta v_n(t) + D \Delta v_n(t) \tau \quad (3)$$

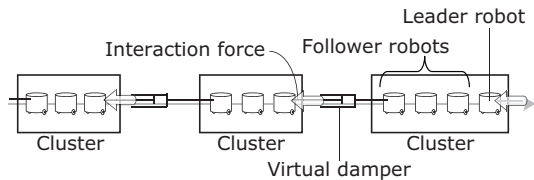


図2 各クラスタの先頭ロボットに作用する相互外力

4. 問題解決のためのアプローチ

図3では、2台のロボットが走行する前方にあるロボットが停止している。走行中の2台のうち、前のロボット (R_p) にはバンバン制御 (BBC) が、後ろのロボット (R_f) にはACCが、それぞれ搭載されている。なお、2台のロボットの速度は、 v_p および v_f とする。

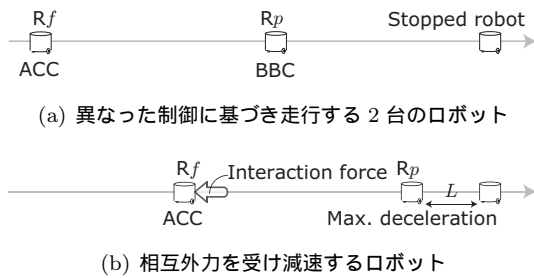


図3 非均質な制御に基づいたプラトゥーン走行の問題

R_p は、前方に停止ロボットがいるものの (図3(a))、バンバン制御によって減速することなく走行し、最低安全距離 L に達したことで停止する (図3(b))。このとき、 $v_f \leq v_p$ の限り、 R_f はACCに基づいて走行するが、 $v_f > v_p$ では、ACCのモデルに加え、 R_f からの相互外力を受け減速する。そのため、 R_f が R_p のはるか後方、かつ混雑していないレーン上を走行していたとしても、 R_p の影響を受け減速しなくてはならない。

そこで本研究では、ロボット間の相対速度に加え、レーン上におけるロボット群の走行速度の分布に注目する。ロボット群が高速に走行するレーンでは分布が高くなり、一方、混雑により低速走行するレーンでは分布が低くなる。したがってこの速度分布に基づき、各ロボットは現在の位置が混雑しているかどうか判断する。混雑していれば、ACCモデルにおけるパラメータを調整し、混雑の度合いに応じた速度を決定する。

ACCでは、間隔時間 h_d が大きくなるにつれ、より安定したプラトゥーン走行を行うことができる。これは、間隔時間 h_d を大きくすることでロボット群は距離をあけて走行し、前のロボットの速度変化の影響を受けにくくなったためである。そこで、ACCにおけるパラメータとして間隔時間 h_d に焦点をあてる。

Dianaらは、 h_d を前後車両の相対速度に応じて動的に変化させることの有効性について述べている [7]。本研究においても、この変動間隔時間を採用する。ただし、上述したように異なった制御器を搭載したロボット群に対しては、相対速度のみに基づいて h_d を調整しては不十分である。そのため、クラスタの先頭ロボットは、レーン上における速度分布に基づき h_d を調整し、混雑している場所ではロボット間距離を長く保つようプラトゥーンの速度を決定する。

5. 小プラトゥーン走行

5.1 速度分布

図4に、ロボット群の走行速度の分布に基づいて、レーン上に間隔時間のプロファイルが設けられる概念図を示す。上図のレーン上にて太線で示された区間では、レーンの交差によりロボット群の渋滞が形成される。下図では、レーン上の位置 x に対応した速度データ \hat{v} が分布形式で示されている。ロボットは、自らがクラスタの先頭であり、かつ前のロボットより速く走行していれば、本レーンにて生成された速度プロファイルに従い間隔時間を調整し、式(2)より目標速度を、式(1)より加速度を決定する。

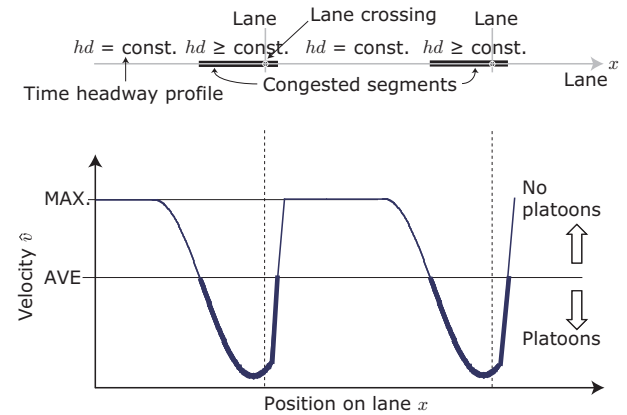


図4 速度分布に基づき生成される間隔時間のプロファイル

各ロボットは、自らの速度情報 v をレーン上に書き込みながら、同時に、累積された速度情報を読み込む。そのため、累積された速度情報から、その位置における速度データ \hat{v} が見積もられる。そして、 \hat{v} が連なったものが、レーン上におけるロボット群の走行速度の分布となる。したがってロボットは、自身が走行するレーン上の速度分布からその平均値 (AVE) を計算し、 \hat{v} がこの AVE を下回る太線で示された区間を、レーン上における混雑区間 (Congested segment) と認識する。

5.2 変動間隔時間

ロボットは、速度データとその分布から、レーン上における混雑の度合いを判断する。したがって、ACCモデルにおける間隔時間 h_d のプロファイルは、この混雑区間の有無により、以下のように設けられる。

$$h_d = \begin{cases} \text{const} & (\hat{v} \geq v_{AVE}) \\ \text{const} - h_0 & \frac{\hat{v} - v_{AVE}}{v_{AVE}} \cdot \hat{v} + h_0 \quad (\text{otherwise}). \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 v_{AVE} と h_0 はレーン上における速度分布の平均値および単調減少関数の切片係数のことである。 \hat{v} は、ロボットの現在位置にて累積された速度情報から、単純移動平均法に基づき計算される。

クラスタの先頭ロボットは、現在位置での速度データ \hat{v} が速度分布の平均値 v_{AVE} 以上であれば、間隔時間を一定として走行する。すなわち、混雑していない区間においては、他のロボットと同様の h_d で式(2)に基づき速度を決定し減速するため、大きなプラトゥー

ンで走行することとなる．一方， $\hat{v} < v_{AVE}$ の場合， \hat{v} が下がるにつれて h_d が増大する．これは，混雑区間において，レーン上におけるその位置の混雑度，すなわち \hat{v} によって h_d を調整することを意味している．その結果，混雑区間においては， \hat{v} に応じた小プラトーン走行が行われることとなる．

5.3 動的な環境ルール

ロボット群は，速度情報をレーン上に書き込みながら走行するため，速度データならびに速度分布は，その時点でのレーンの状況を反映したものととなる．そのため，ロボット群が最も低速走行しているレーンをオンラインで認識し，そこに対して環境ルールを動的に設けることが可能となる．なお，本研究では，混雑や渋滞によりロボット群が最も低速走行しているレーンのことを，ボトルネックレーンと呼ぶ．

ロボットは，現在走行中のレーンに対して，そこでの速度分布から平均値を見積もることができる．同様にしてその他のレーン上における速度分布の平均値も見積り，現在のレーンにおける平均値が最も低い場合，そこをボトルネックレーンと認識し環境ルールを設ける．

本環境ルールは，ロボット群で最も混雑するレーンにおいては，よりプラトーン間の距離をあけるためクラスタの先頭ロボットを減速させることを目的としている．したがって，ロボット群がボトルネックレーン上の混雑区間 ($\hat{v} < v_{AVE}$) を小プラトーン走行する際には，クラスタの先頭ロボットのの間隔時間がこの環境ルールによって $h_d \times \beta$ だけ増大されることとなる．

5.4 ロボット群の非均質性を考慮したクラスタ化

ロボットは，距離と速度に加え，前後ロボットの制御情報に基づきクラスタ構成の意思決定を行う．距離と速度に基づき決定された対象のロボットが，自身と異なりバンバン制御で走行していた場合，もう一方のロボットとクラスタを構成する．また，前後両方のロボットと制御器が異なる場合，クラスタは構成しない．

図 1 に示した前後ロボットとの相対距離ならびに速度情報に基づき，それらの制御器の非均質性を考慮した上で，図 5 ではロボットがクラスタ構成の意思決定を行っている．なお，バンバン制御が搭載されたロボットは“Poor robot”と表されている．

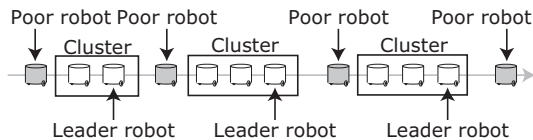


図 5 非均質性を考慮したクラスタ構成のための意思決定

ロボットは，本来距離が近く速度も速いロボットとクラスタ構成のための意思決定を行うところが，当該ロボットが Poor ロボットの場合，もう一方のロボットとクラスタを構成する．したがって，ロボット群の非均質性を考慮すると，Poor ロボット以外の ACC を搭載したロボット群でクラスタを構成し，その単位で小プラトーン走行することとなる．

6. シミュレーション実験

6.1 実験条件

図 6 が示す 3 つの単一レーンサーキットが交差・合流するシステムを対象とする．ACC とバンバン制御いずれかを搭載した移動ロボット群を 35 台投入する．1 台のロボットはサーキット 3 を，残り 17 台ずつがそれぞれサーキット 1 と 2 を右回りに走行する．

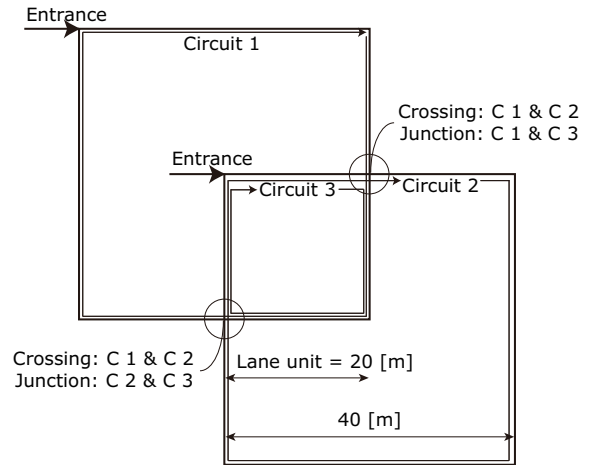


図 6 サーキットが交差・合流するシステム

式 (2) において，ACC が搭載されたロボットの時定数 τ と最低安全距離 L は，それぞれ $\tau = 1.0$ [s]， $L = 3.0$ [m]，間隔時間は $h_d = 2.0$ ，係数 α は $\alpha = \tau/h_d = 0.5$ とした．相互外力を作用させるための仮想ダンパは，粘性係数 D の単位速度を 1.0 [m/s] とした．なお，バンバン制御においても最低安全距離は $L = 3.0$ [m] とした．

6.2 プラトーン走行シナリオ

ACC のみの均質なロボット群，ならびにバンバン制御の Poor ロボットを 4, 6, 8, 10 台と投入し，非均質なロボット群に対する有効性の比較・評価，ならびに結果の考察を行う．小プラトーン走行のシナリオは，以下の (a) ~ (e) とする．

- (a) ACC のみによる大きなプラトーン走行
- (b) 従来の相互外力を付加した小プラトーン走行
- (c) 混雑区間では $h_d = 5.0$ にして小プラトーン走行
- (d) 混雑区間では h_d を式 (4) とし小プラトーン走行
- (e) (d) + ボトルネックレーンに対する動的環境ルール

シナリオ (c) ~ (e) では，最近の 200 台が通過した際の速度情報の平均値をその位置の速度データ \hat{v} とする．また， $h_d = 2.0$ であるため，式 (4) においても $\text{const} = 2.0$ ，切片係数は $h_0 = 90$ とした．さらに，シナリオ (e) における動的環境ルールは $\beta = 2.0$ とした．

6.3 実験結果と有効性の比較・評価

図 7 に，ACC のみを搭載したロボット群に対するシナリオ (a) ~ (e) の結果として，17 台のロボットがサーキット 1 と 2 を 200 周走行するのに要した時間を示す．

シナリオ (a) と (b) を比較すると，走行時間が 3 時間以上も短縮されている．この結果は，レーンが交差・合流するシステムに対しては，クラスタを単位としてロボット群が小プラトーン走行することの有効性

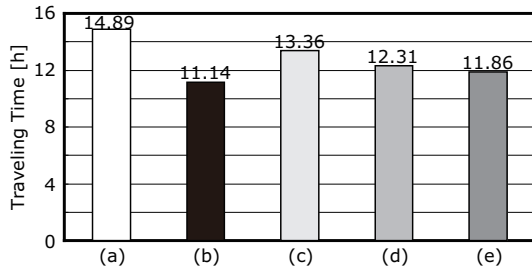


図7 均質なロボット群による走行時間の比較

を示している．同様に (c) から (e) のシナリオにおいても，(a) に比べ走行時間が短縮される結果となった．さらに， $\hat{v} < v_{AVE}$ の混雑区間では，固定の $h_d (= 5.0)$ を与えるよりも，混雑度 \hat{v} に応じて h_d を調整すること，ならびに，ボトルネックレーンに対して動的環境ルールを設けることの有効性が示されている．これらの結果に基づき，非均質なロボット群がシナリオ (b) と (e) による小プラトーン走行時間を図 8 に示す．

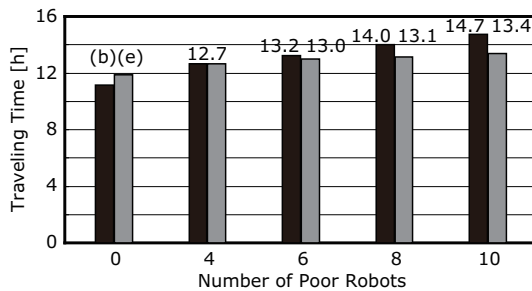


図8 非均質なロボット群による走行時間の比較

Poor ロボットの投入台数が増えるにしたがって，シナリオ (b) と (e) いずれも走行時間がかかる結果となった．これは，バンバン制御に基づいて独走する Poor ロボットの存在が，小プラトーン走行に影響を及ぼしたためである．ただし，Poor ロボットの投入台数で比較すると，シナリオ (e) における走行時間が短くなり，速度分布に基づいた変動間隔時間と動的環境ルールによる小プラトーン走行の有効性が示される結果となった．

6.4 小プラトーン走行の有効性に関する考察

非均質な制御に基づいたロボット群によるクラスタ構成が行われると，図 5 が示すように，クラスタの先頭ロボット (R_l) の前には必ず Poor ロボット (R_p) が存在することとなる．そこで， R_p に対する R_l の挙動として相対速度 $|\Delta v|$ に着目した．なお， $\Delta v = v_p - v_l$ である．これは，第 4. 章の問題が，どれだけ解決されたかを評価する指標となる．表 1 に，シナリオ (b) ならびに (e) における $|\Delta v|$ の平均値を示す．

Scenario	4	6	8	10
(b)	0.083	0.095	0.088	0.086
(e)	0.102	0.117	0.116	0.117

いずれの Poor ロボット投入台数に対しても，シナリオ (b) の方が小さい値となった．この結果は，シナリ

オ (b) では，(e) に比べ， R_l が R_p と類似した挙動をとり，小プラトーン走行が十分に行えなかったことを意味している．このときの Δx の平均値を表 2 に示す．

Scenario	4	6	8	10
(b)	12.11	12.43	12.31	11.67
(e)	8.10	7.83	7.98	8.15

シナリオ (b) では，(e) の結果と比べ，その平均値が大きくなっていることが分かる．これは， R_l が，どのレーン上においても $v_l > v_p$ であれば相互外力により減速し，ロボット間距離を必要以上に保ってしまったことを意味している．一方シナリオ (e) では， $v_l > v_p$ であっても混雑していない $\hat{v} \geq v_{AVE}$ の区間であれば， R_l は $h_d = 2.0$ のままで R_p に追従しようとしたため，両者の相対距離は短くなったことを示している．以上のことから，ロボット群の非均質性が高まるにつれ，提案する小プラトーン走行が有効な結果となった．

7. 結論

本論文では，非均質な制御に基づいて走行する移動ロボット群を対象に，より高速な小プラトーン走行を行うための方法論について述べた．そして，ロボット群の速度分布に注目し，変動間隔時間と動的環境ルールを提案した．シミュレーション実験により，提案する小プラトーン走行の有効性を示した．

謝辞

本研究は日本学術振興会の科学研究費補助金（若手研究 (B) 24760199）の支援により実施された．

参考文献

- [1] A. Vahidi and A. Eskandarian: “Research Advances in Intelligent Collision Avoidance and Adaptive Cruise Control,” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 4, no. 3, pp. 143–153, 2003.
- [2] P. A. Ioannou and C. C. Chien: “Autonomous Intelligent Cruise Control,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 42, no. 4, pp. 657–672, 1993.
- [3] 星野智史, 関宏也, 太田順: “移動ロボット群により形成される渋滞解決のための一方法論 - 移動ロボット群に対する知的走行制御手法と行動ルールの提案 -”, 日本ロボット学会誌, vol. 29, no. 8, pp. 726–736, 2011.
- [4] 星野智史, 関宏也, 太田順: “適応的走行制御に基づいたロボット群の効果的な移動の実現 - ロボットで混雑しボトルネックの存在する環境を想定して -”, 日本ロボット学会誌, vol. 30, no. 8, pp. 788–796, 2012.
- [5] C.-Y. Liang and H. Peng: “Optimal Adaptive Cruise Control with Guaranteed String Stability,” Vehicle System Dynamics, vol. 31, pp. 313–330, 1999.
- [6] L. C. Davis: “Effect of Adaptive Cruise Control Systems on Traffic Flow,” Physical Review E, vol. 69, 066110, 2004.
- [7] D. Yanakiev and I. Kanellakopoulos: “Variable Time Headway for String Stability of Automated Heavy-Duty Vehicles,” IEEE International Conference on Decision and Control, pp. 4077–4081, 1995.