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—

星 野 智 史^{*1} 関 宏 也^{*1} 太 田 順^{*2}

Coordination of Multiple Mobile Robots based on Adaptive Cruise Control

— In Congested Systems with Bottlenecks —

Satoshi Hoshino^{*1}, Hiroya Seki^{*1} and Jun Ota^{*2}

In this paper, we focus on a control technique which has been proposed in the field of intelligent transportation systems, ITS, for vehicle platooning. This control technique, termed adaptive cruise control (ACC), is basically used for coordination of multiple mobile robots. In order for robots to move more efficiently in congested systems with bottlenecks, a robot behavior control and environmental rule proposed by the authors are appended to ACC and applied to robots. However, a robot is required to acquire position and velocity information of all the robots in the moving direction. In terms of communication, therefore we propose a simple method for organizing clusters among the preceding and following robots. Unlike the two approaches above, this method requires position and velocity information of only adjacent robots. In the simulation experiment, a limitation of ACC in congested systems with bottlenecks is shown by comparing to a result of ACC with the behavior control and environmental rule. Moreover, these results are compared to results of ACC with the clustering method. As a result, the effectiveness of the behavior control and environmental rule in conjunction with ACC is shown. And finally, the superiority of the ACC and clustering method compared to the behavior control and environmental rule for the efficient coordination is shown.

Key Words: Multiple Mobile Robots, Coordination, Adaptive Cruise Control, Platooning, Clustering

1. は じ め に

人や車が運転する車は、周囲の状況を判断しながら自ら行動の意思決定を行う。このとき、自身の周りに人や車がなければそれらからの干渉がないため、意図したとおりに行動することができる。一方、周りに人や車が多く存在する場合、それらとの干渉が生じるため、行動の結果に違いが見られるようになる。例えば、人通りや車の交通量が少ない時間帯では、人や車はスムーズかつ素早く移動することができる。ここで、スムーズな動きとは、速度の高低ではなくその変化量が少ないことを意味する。その後、歩道も車道も混雑してくると、渋滞が発生したりあるいはそうでなくとも人や車の流れが悪くなる。一般的に、ある容量の空間や場所に対して、その容量を上回る流入があった際、流れに停滞が生じ、これが渋滞となる。

人も車も自律移動ロボットも、行動の意思決定を自らが下すため、自己駆動粒子 (Self-Driven Particles) の一種であると

考えることができる。自己駆動粒子が群れとして一方向に動くとき、群れの移動や流れの妨げとなる要因 (ボトルネック) が存在しなくとも、群れの数が増えシステムが混雑するにつれて渋滞が形成される [1] [2]。複数台の車をを用いた周回走行実験により、自然渋滞が形成されることも示されている [3]。本研究では、自己駆動粒子として、自律移動ロボットを対象とする。

複数台の自律ロボットが定められた方向へ移動する一例として、材料搬送プラントや港湾自動コンテナターミナルが上げられる [4] [5]。ここでは、ロボットが材料やコンテナ搬送のため、経路上を同一の方向へ移動している。当該システムには、搬送物の荷下ろし／上げ場所や経路の交差・合流する場所があるため、これらボトルネックが原因となり、混雑度合いに応じて渋滞がより顕著に形成される。そしてその結果、ロボット群の移動効率に深刻な影響を及ぼすこととなる。

そこで本研究では、ロボットで混雑し、さらにボトルネックが存在するシステムを対象に、ここでのロボット群の効果的、すなわち、スムーズで素早い移動を実現することを目的とする。ただし、以下の行動制約を前提条件とする。ロボットは1本のレーン (経路) 上を同一方向に移動するものとし、歩行者のように同一レーン (歩道) 上を双方向に入り乱れながら往来することはできない。また、後ろのロボットが前のロボットを超越

原稿受付 2011 年 12 月 9 日

^{*1}東京工業大学

^{*2}東京大学

^{*1}Tokyo Institute of Technology

^{*2}The University of Tokyo

■ 本論文は有用性で評価されました。

することもできない。

知的交通システム (ITS: Intelligent Transportation Systems) の研究分野では、車の自動走行を目的に、適応的走行制御 (ACC: Adaptive Cruise Control) に関する研究が行われている [6]。ACC を搭載した車は、「車間一定方策 (Constant-Headway Policy)」に従って、あらかじめ与えられた車間距離や時間を維持するよう自動で走行することができる。また、車が前の車を追従しながら衝突回避も同時に行えるよう、車列 (プラトーン) 走行に向けた研究もなされている。その結果、プラトーン内での個々の車の速度変化は、プラトーン自体の結合安定性 (String Stability) が保証されていれば後方に向かって拡大・伝播することではなく、したがって渋滞は形成されることが示されている [7]。そこで本研究では、車の自動走行のために開発された適応的走行制御を、ロボット群の移動へ応用する。

筆者らは従来研究にて、ボトルネックの有無に関係なく形成される渋滞を解決するための方法論を提案してきた [8] [9]。ここでは、(I) ロボットの行動が原因となって形成される渋滞に対して、行動そのものを制御するために仮想ダンパを用いた制御手法を構築し、さらに、(II) ロボットが存在する環境 (システム) 側の原因によって形成される渋滞に対しては、そこへルールを設けることで外的にロボットの動きを規制するといった二つのアプローチを採用した。そこで本研究では、これら二つのアプローチを ACC に付加し組み合わせてロボットへ適用する。

上記二つのアプローチを適用するためには、ロボットが自らの進行方向に存在する全ロボットの情報を把握しておく必要がある。そのため、対象となるシステムが大規模になりロボットの台数も膨大となれば、適用が困難となる。また、環境ルールを変化に応じてオンラインに設けることはできない。そこで本研究では、各ロボットが前後のロボットの情報のみからクラスタをリアクティブに構成し、クラスタを単位としたロボット群の移動法を提案する。

本論文の構成は次のとおりである。第 2 章では、ロボットが群移動する基礎制御システムとなる ACC の制御モデルやそれに基づいたロボット群の挙動について述べる。第 3 章では、筆者らが従来研究にて提案した行動制御手法と環境ルールを、ACC と組み合わせてロボットへ適用する方法について述べる。第 4 章では、ロボット群のクラスタ構成法を提案し、各ロボットが前後のロボットのみの情報に基づきリアクティブにクラスタを構成するプロセスについて述べる。第 5 章では、ロボットで混雑し、ボトルネックの存在するシステムを対象としたシミュレーション実験を行う。そして ACC をロボットへ適用し、本システムにおける ACC の有効性について言及する。さらに、行動制御手法と環境ルール、ロボット群クラスタ法を ACC と組み合わせてロボットへ適用し、ロボット群の効果的な移動に向けた有効性を比較ならびに評価する。最後に第 6 章では、本論文の結論について述べる。

Fig. 1 Numbered robots for applying ACC

2. 適応的走行制御手法 (Adaptive Cruise Control)

2.1 ACC モデル

従来、車の自動走行モデルの多くは、前後 2 台に着目し、それらの間隔 (h) と速度 (v) には、一意に決まる関係性 ($v = f(h)$) があると仮定している。Kesting らは、個々のドライバの乗り心地を向上するための知的運転者モデル (IDM: Intelligent Driver Model) を提案している [10]。しかしながら、IDM ではボトルネックがなくとも渋滞が形成されてしまう。一方で、車両群が渋滞を形成しないようプラトーン走行するための制御手法として、ACC が提案されている [6] [7]。本研究では、ITS の研究分野で提案されてきた ACC を、ロボット群の移動へ応用する。

まず、車のプラトーンでなくロボット群を想定し、これらの先頭から n を割り当てる。Fig. 1 に、ACC を適用するために番号が割り当てられたロボット群を示す。なお、ここでは説明の都合上先頭のロボットには $n-2$ が割り当てられている。このとき、理想的な ACC システムにおけるダイナミクスは、式 (1) によって表すことができる。

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

ここで、 n 番めのロボットとその前のロボット $n-1$ の相対距離 ($\Delta x_n(t)$) と相対速度 ($\Delta v_n(t)$) を、それぞれ $\Delta x_n(t) = x_{n-1}(t) - x_n(t)$ と $\Delta v_n(t) = v_{n-1}(t) - v_n(t)$ と定義する。 τ は時定数のことであり、本 ACC システムは一次遅れとなる。

式 (1) は、ロボットの間隔を一定にする方策を意味しており、右辺の $V(\cdot)$ はロボット n の目標速度のことである。すなわち ACC では、あらかじめ定められたロボット間隔を維持するよう、速度と加速度を前のロボットに合わせて適応的に決定することを制御目的としている。これを具体的に定式化すると式 (2) となり、時刻 t でのロボットの目標速度が決定される。また、この速度に基づき、加速度が式 (1) より算出される。

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

ここで、 h_d と L は、それぞれ間隔時間[†]と固定の最小ロボット間距離のことである。 α は、相対速度の変化が目標速度に与える影響の大きさを決める係数のことである。

Liang と Peng は、ACC を車の自動プラトーン走行に適用した際の結合安定性について言及している [11] [12]。そして、ある条件下では Δx_n と Δx_{n-1} に関する伝達関数の絶対値が 1 以下となり、前のロボットの位置 (速度) 変化が後方のロボットに増幅して伝達されず、結合安定性が保証されることを示している。さらに Davis は、係数 α が $\alpha = \tau/h_d$ と与えられた場合、いかなる τ と h_d に対しても、正の値であればこの条件が満たされることについて指摘している [13]。

[†]前後 2 台のロボットで、ある時刻における後ろのロボットの首部が、その時点での前のロボットの尾部の位置に到達するまでの時間のこと。

Fig. 2 Velocity of robots following the leader robot when ACC was applied

2.2 ACCによる追従ロボット群の挙動

ACCの有効性を検証するため、ボトルネックのない直線レーン上におけるロボット群の移動実験を行った。ロボットを13台投入し、ある時刻に先頭のロボットを減速・停止させ、その後再び最大速度まで加速させた。Fig. 2に、三つの間隔時間に対する先頭ロボットとそれに追従するロボット群の速度を示す。

この結果から、結合安定性が保証されていれば、先頭ロボットの速度変化が追従ロボット群に対して増幅して伝わることはなく、また、追従ロボットの速度が大きく反復しなかったことが分かる。すなわち、 $\alpha = \tau/h_d$ で係数が与えられると、先頭ロボットの速度変化は後方ロボットに伝播する過程で徐々に減少し渋滞は形成されず、最終的に全ロボットが最高速度で移動することができた。

以上、混雑していてもボトルネックの存在しないシステムでは、ACCの有効性を確認することができる。ただし h_d の値によって、短い間隔時間の場合では、全ロボットが最高速度に到達・収束するまでの時間が短くなり (Fig. 2(a) と Fig. 2(b) 参照)、その一方で間隔時間が長くなるにつれて、追従ロボット群の速度変化量が小さくなる結果となった (Fig. 2(c) 参照)。これは、 h_d が移動のスムーズさと素早さを決定しているパラメータであることを示している。

2.3 混雑しボトルネックの存在するシステムにおける ACC

Kerner は、混雑した交通システムにおいては同期流 (Synchronized Flow) と広域移動渋滞 (Wide Moving Jam) の二つの現象が見られることについて述べている [14]。渋滞は、それ自身が交通流や移動効率に大きな影響を及ぼす。ACCを適用することで、最も深刻な現象である広域移動渋滞は回避することができる。しかしながら、Fig. 2の結果からも分かるように、ACCをロボットに適用すると、ロボットは前のロボットの影響を受けながら移動する。そのため、混雑したシステムでは、ロボット群の移動が同期流となり、広域移動渋滞ほどでないにせよ、ロボット群の移動効率低下につながる可能性がある。

式 (2) で表されるように、ACCに基づいて移動するロボットは、前のロボットの影響を受け、常に Δx と Δv より自らの速度と加速度を決定する。このとき、Fig. 2(c) が示すように、ロボット群は間隔時間が長いほど、よりスムーズに移動する。すなわち、混雑したシステムでACCを適用すると、渋滞を形成しないよう、ロボットは群移動の速度を落とす行動をとる。こ

れは、間隔時間によるロボット群全体の移動のスムーズさと各ロボットの移動速度 (素早さ) がトレードオフの関係にあることを意味している。さらに、混雑に加えボトルネックの存在するシステムでは、ロボットはこのボトルネックにより頻繁に停止することを余儀なくされる。その結果、渋滞が形成されないにせよ、ボトルネック周辺にて低速で移動するロボットがロボット群全体の移動効率を低下させてしまう可能性がある。

上述した懸念事項に対して、本研究では、シミュレーション実験により混雑しボトルネックが存在するシステムにおけるACCの有効性を検証する。その際、後述するロボット行動制御手法、環境ルール、ロボット群クラスタ構成法をACCと組み合わせ、ロボットへ適用する。ただし、間隔時間によりスムーズさと速度のいずれかが欠けても、移動に要する時間がかかってしまい効果的とはならなくなる。そこで、この移動時間を検証の際の比較・評価指標とする。

3. 行動制御手法と環境ルール

3.1 行動制御手法

筆者らはこれまでに、渋滞が発生した際、後方を移動中のロボットがこの渋滞に巻き込まれるのを避けるよう行動することを目的とした制御手法の研究を行ってきた [8] [9]。そして、進行方向に停止ロボットが存在した際、その後方すべてのロボット間に仮想的なダンパを挿入し、ダンパからの制動力によって各ロボットが減速する制御シナリオを提案した。

しかしながら、本行動制御手法を適用するためには、ロボットが自らの進行方向に存在するすべてのロボットに対して、それらの位置と速度に関する情報を取得しなくてはならない。これにより、停止ロボットの有無とその位置ならびに前のロボットとの相対的な位置関係および距離を把握する。そして、停止ロボットがいればその後方で移動中のすべてのロボットに対して、それぞれ前のロボットとの間に仮想ダンパが挿入される。

Fig. 3は3台のロボット (R 2, R 3, R 4) が右方向へ移動している最中に、先頭のロボット (R 1) が停止した様子を示している。停止したR 1により、その後方のR 2, R 3, R 4の間には仮想ダンパが挿入されるため、3台のロボットに対してそれぞれ制動力が作用している。ただし、ダンパが挿入される条件を $v_{R_f} \geq v_{R_p}$ とする。ここで、 R_p と R_f は連続した前後2台のロボット、 v はそれらロボットの速度のことである。

Fig. 3 Damping force exerted against all the robots behind a stopped robot

(a) Virtual dampers inserted between both stopped and following robots at a given time t

(b) Decelerating robots due to damping force

Fig. 4 Scenario with virtual damper for robot behavior control

したがって、ある2台のロボットの進行方向前方に停止ロボットが存在しても、2台のロボットのうち前のロボットが後ろのロボットより高速で移動している限り、仮想ダンパは当該ロボット間には挿入されず、後ろのロボットが制動力を受けて減速することもない。**Fig. 4**は、本制御シナリオに基づき挿入された仮想ダンパから生成された制動力が、停止ロボット(R1)の後方のロボットに作用している様子を示している。

時刻 t にて R1 が停止した直後、仮想ダンパが R1 と R2、R2 と R3 の間に $v_{R3} \geq v_{R2} \geq v_{R1}$ の条件の下挿入される(**Fig. 4(a)** 参照)。その結果、R2 と R3 の速度 (v_{R2} , v_{R3}) は、制動力 ($D(v_{R2}(t) - v_{R1}(t))$, $D(v_{R3}(t) - v_{R2}(t))$) が作用した分だけ減速することとなる(**Fig. 4(b)** 参照)。なお、 $v_{R1}(t)$, $v_{R2}(t)$, $v_{R3}(t)$ は、それぞれロボット R1, R2, R3 の時刻 t での速度のことである。ただし、R1 は停止中のため $v_{R1}(t) = 0$ となり、R2 は $Dv_{R2}(t)$ の制動力を受けて減速する。

本行動制御手法は、ロボットの位置と速度情報に基づき仮想的なダンパを使用する。そのため、これらの情報を取得すると、基礎となるロボットの制御システムに依存することなく、それに付加する形で組み合わせてロボットに適用することができる。したがって、ACC に対しても仮想ダンパを挿入し、ロボットの目標速度を低く設定することができる。

ACC に基づいて移動中のロボットは、進行方向前方に存在する全ロボットの位置と速度情報を取得し、停止ロボットの有無やその位置を把握する。そして、停止ロボットが存在した際には、 $v_{R_f} \geq v_{R_p}$ である条件の下、前のロボットとの間に仮想ダンパを挿入し、制動力を生成、自らに作用させる。このときの ACC システムにおけるロボットの目標速度は、式 (2) に対し

Fig. 5 Schematic example of jams of robots due to bottlenecks

て制動力の項を追加することにより、式 (3) となる。

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

仮想ダンパが挿入されると、生成された制動力はロボットの進行方向とは逆方向に作用する。しかしながら、式 (3) では制動力の第3項が加えられている。これは、2.1節で述べているように、ACC における相対速度が $\Delta v_n(t) = v_{n-1}(t) - v_n(t)$ と定義されているためである。また、右辺第2項と第3項は $(\alpha + D\tau) \Delta v_n(t)$ と書き換えることができ、これは、ACC システムに仮想ダンパを付加することが、式 (2) における $\Delta v_n(t)$ の係数 α を変化させることを意味している。ダンパの粘性係数は $D = \text{単位速度} / \Delta x_n$ として与え、ロボット間距離と相対速度に応じた制動力 ($D \Delta v_n(t)$) が、ACC に基づいて移動中の後ろのロボットへ作用する。なお、単位速度は $1.0 [\text{m/s}]$ とした。

3.2 環境ルール

混雑したシステムでは、ボトルネックがなくともロボットの行動が原因となって渋滞が形成されることがある。一方で、交差や合流などといったボトルネックがあると、これが原因となり、渋滞はより一層形成されやすくなる。**Fig. 5** に、あるレーンネットワーク上の2点間(P1とP2)を往来するロボット群を示す。各ロボットの進行方向は矢印で示されている。

本レーンネットワーク上には、往路と復路のレーンが交差する地点が2箇所ある。そのため、この交差がボトルネックとなり、ここを先頭に灰色が示すレーン上にて渋滞が発生し、ロボットが低速で移動することとなる。渋滞や低速移動するロボットは、それ自身がロボット群全体の移動効率を左右する。なお、この灰色部分は、ロボット群の台数によって短くも長くもなる。

このように環境が原因となって形成される渋滞に対して、筆者らは、ロボットの行動を外的に規制するためのルールを環境側に設ける提案をしてきた[9]。本環境ルールは、ボトルネック部周辺で発生した渋滞により高くなったロボットの占有密度を低下させる働きをする。そこでまず、**Fig. 5**の灰色部分が示すような、ボトルネックによってロボットが低速移動する渋滞レーンを判別する必要がある。そのため、各レーン上におけるロボット群の平均速度を算出する。ボトルネックにより渋滞が形成されれば、そのなかでロボット群は“stop-and-go”，すなわち停止

Fig. 6 Different damping force by environmental rule β depending on congested and non-congested lanes

と発進（のろのろ移動）を繰り返す。したがって、(i) ボトルネックへと向かってつながり、(ii) 移動速度が最も低くなるレーンを渋滞レーンと定義した。

渋滞レーンを判別すると、ボトルネックに次々とロボットが到達するのを防ぐため、その他のレーンに比べ、渋滞レーン上ではロボット群がさらに低速で移動するよう環境ルールが設けられる。これにより、渋滞レーンを通過する際のロボットは、この環境ルールに従って移動するよう規制される。すなわち、本環境ルールによって、渋滞レーンに存在するロボット群の移動速度が規制され占有密度は低くなり、その結果、渋滞が解決されそこでの移動効率も向上することとなる。

環境ルールは、行動制御手法の条件下、ロボットに作用する制動力を増大するよう設計され、渋滞レーンへ設けられる。Fig. 6は、ACCと行動制御手法に基づき、渋滞レーンとそうでないレーン上を移動中の2台のロボットを示している。2台とも前方に停止ロボットがいるため、仮想ダンパからの制動力が作用している。このとき、渋滞レーン上か否かにより制動力は異なる。

ロボットが渋滞レーンを移動する際、式(3)における制動力 $D\Delta v_n(t)$ は、係数 β と掛け合わされる。これにより、渋滞レーン上のロボットに作用する制動力は増大され $\beta D\Delta v_n(t)$ となり、式(4)がロボットの新たな目標速度となる。すなわち、係数 β が渋滞レーンに設けられる環境ルールとなる。ただし、ロボットが制動力により逆方向へ移動しないよう、また、加減速度に関する限界を考慮し、制動力が増大しても、 $0 \leq v_R(t)$ であり、式(1)では $|dv_n(t)/dt| \leq |\text{最大減速度}|$ であることとした。

$$V = \frac{1}{h_d} \{ \Delta x_n(t) - L \} + \alpha \Delta v_n(t) + \beta D\Delta v_n(t) \tau \quad (4)$$

以上、ACCに行動制御手法と環境ルールを付加すると、渋滞レーンでなければ式(3)が、渋滞レーンではさらに低速で移動するよう式(4)が、それぞれロボットの目標速度となる。

4. ロボット群クラスタ構成法

4.1 隣接するロボット間でのクラスタ構成

3.1節で述べた行動制御手法をロボットに適用するためには、進行方向に存在するすべてのロボットの位置ならびに速度情報を把握しておく必要がある。また、3.2節の環境ルールは、あらかじめ各レーンにおける平均速度を求めておかななくてはならず、オンラインで渋滞レーンを判断しそこへ動的に設けることが困難となる。そこで本章では、ACCと仮想ダンパによる制動力を組み合わせることで、複数台のロボット群から構成されるクラスタを単位とした移動手法を提案する。

(a) Inter-robot distance and velocity information

(b) $\Delta x_f \geq \Delta x_p$

(c) $\Delta x_f < \Delta x_p$

(d) $\Delta x_f < \Delta x_p$ and $v_{Rf} \leq v_{Rp}$

Fig. 7 Decision of cluster organization among adjacent robots

Fig. 7に、あるロボットが、その前後で隣接するロボットの位置と速度情報に基づいてクラスタを構成する様子を示す。Fig. 7(a)の中央に位置するロボット (R_h) は、その前後のロボットいずれかとクラスタを構成するため、それぞれのロボットとの距離 (Δx_f と Δx_p) ならびに速度 (v_{Rf} と v_{Rp}) のみの情報に基づいたりアクティブな意思決定を行う。これによりロボットは、進行方向に存在するすべてのロボットの位置ならびに速度情報を把握する必要がなくなる。

Fig. 7(b)とFig. 7(c)が示すように、ロボット (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、距離に基づいたクラスタを構成しては、環境要因であるボトルネックによって渋滞が形成された際に、渋滞の中で構成されたクラスタの先頭ロボットが渋滞あるいはボトルネックを抜け出そうとしても、後ろのロボットとのクラスタを解消することができず、ここでの移動効率が悪化してしまう恐れがある。そこで、ボトルネックで停止した際には、クラスタの先頭ロボットが前のロボットとクラスタを構成しやすいよう、以下の速度に関するヒューリスティクスを導入する。

- $\Delta x_f < \Delta x_p$ でも $v_{Rf} \leq v_{Rp}$ なら、 R_h は R_f ではなく R_p とクラスタを構成

その結果、Fig. 7(d)が示すようにロボット (R_h) は、後ろのロボット (R_f) と距離が近くても速度情報に基づいて前のロボット (R_p) とクラスタを構成することができる。これによりロボットは、ボトルネックに対しても環境ルールを設けることなく、オンラインで渋滞に応じた移動が可能となる。

Fig. 8に、Fig. 7を一般化したクラスタの構成フローを示す。 i はロボット (R) のID、 $C(\cdot)$ は R が構成し所属するクラスタ番号、CPは $R(i)$ がクラスタを構成する前後いずれかで隣接する相手ロボット (Clustering Partner) を示している。なお、クラスタの構成はシミュレーションの1ステップごとに行われ、その都度、全ロボットに対して、それらが所属するクラスタの番号を0へとリセットする。そして、IDの順で各ロボットの意

Fig. 8 Clustering flow in each simulation step

Fig. 9 Moving robots while organizing clusters

思決定が行われ、クラスタ 0 に属している ($C(R(i)) = 0$ 、すなわちいずれのクラスタにも属していない) ロボットのみがクラスタを構成する。

いずれのクラスタにも属していないロボット ($R(i)$) は、距離と速度に関するヒューリスティクスによってクラスタを構成するロボット (CP) を決定する。その際、CP がすでにあるクラスタ ($C(R(CP)) = n$) に属していた場合、自分も同じクラスタ n に属するよう $C(R(i)) = n$ とする。一方、CP もクラスタに属していない場合、新たなクラスタ $n+1$ を構成し、これに両ロボットは所属する ($C(R(i)) = n+1$, $C(R(CP)) = n+1$)。なお、これにより CP はクラスタ構成のための意思決定を行えなくなる。以上の手順を経ることで、全ロボットはいずれかのクラスタに所属することになる。そして、前のロボットと自分のクラスタ番号から、両者が同じであれば追従ロボットであり、異なれば先頭ロボットであると認識する。

Fig. 9 に、Fig. 8 の手順で構成された複数のクラスタを示す。ロボット群は、クラスタを単位としながら右方向へ移動している。なお、各クラスタは、先頭でクラスタの移動速度を制御するロボットと、それに追従するロボット群から構成されている。

先頭と追従いずれのロボットに対しても ACC が搭載されている。そのため、クラスタ内での追従と衝突回避ならびに、クラスタの先頭ロボットによる前方ロボットへの追従と衝突回避が可能となる。このとき、追従ロボットの目標速度は式 (2) から決定される。クラスタの先頭ロボット (R) に対しては、 $v_R \geq v_{Rp}$ の条件で、進行方向前方に停止ロボットが存在するかしな

Fig. 10 Clusters coupling process

に関係なく、前のロボット (R_p) との間に仮想ダンパが挿入され、前のロボットとの距離ならびに相対速度に基づいた制動力が作用して減速するよう、式 (3) から目標速度を決定する。

4.2 クラスタの結合

Fig. 10 に、Fig. 8 を通じて構成された二つのクラスタを結合する様子を示す。Fig. 10 (a) における i から $i+4$ がロボットの ID であり、この順番でクラスタ構成の意思決定が行われる。そのため、 $R(i)$ が $R(i+4)$ とクラスタ n を構成し、続いて $R(i+1)$ が $R(i+2)$ とクラスタ $n+1$ を構成、さらに $R(i+3)$ がクラスタ $n+1$ に加わる。なお、ロボットの ID と ACC を適用するためにロボットへ割り当てられた番号は、それぞれ異なることに注意されたい。

しかしながら、Fig. 10 (b) における $R(i+4)$ に関して、前後ロボットとの位置関係が $\Delta x_f < \Delta x_p$ であり、かつそれらの速度関係が $v_f > v_p$ の場合、本来なら $R(i+4)$ は $R(i+1)$ とクラスタを構成するにもかかわらず、 $R(i)$ によって $R(i)$ のみとクラスタ n を構成してしまうといった矛盾が生じてしまう。これは、各ロボットがその前後のロボットの情報のみに基づいて自律かつ分散的な意思決定を行う限り避けることができない。そして、これによって二つに分割されたクラスタが複数構成されると、必要以上のクラスタが存在することになり、仮想ダンパから制動力を受ける先頭ロボットの台数が増え、ロボット群の移動効率に悪影響を及ぼす可能性がある。

そこで本研究では、この不必要なクラスタの分割を避けるため、Fig. 8 の示す手順で各ロボットがクラスタを構成し終えたら、再度、クラスタの先頭と後尾のロボットに関してそれらの前後のロボットの位置・速度情報に基づいて、クラスタを構成する際の矛盾を判定する。そして、矛盾が見つかる限り、それによって分割されたクラスタの結合プロセスを繰り返す。これにより、Fig. 10 (c) が示すように、 i から $i+4$ のロボット群が同一のクラスタ $n+2$ を構成しこれに属することとなる。

5. シミュレーション実験

5.1 実験条件

5.1.1 システムレイアウト

ACC に関する従来研究や車を用いた実験では直線レーン [7] やサーキット [3] が、ロボティクスの分野では交差・合流する

Fig. 11 System layout consisting of three circuits

レーン [15] [16] が、それぞれ対象システムとされてきた。そこで本シミュレーション実験においても、Fig. 11 が示すように、直線レーンから構成される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。なお、サーキット 3 を構成するレーンの一部は、サーキット 1 と 2 で共有されている。

サーキット 1 とサーキット 2, 3 へは、それぞれ隣接する入り口からロボット群は進入し、各サーキットを右回りに移動する。図において円で示した部分 (○) が半径 2.25 [m] の交差・合流エリアとなり、先にこのエリアに進入したロボットが優先的に通過することができる。なお、レーン 1 本あたりの長さは 20 [m] とする。そのため、サーキット 3 は一辺が 1 レーンで合計が 4 レーン (80 [m]) から、サーキット 1 と 2 の一辺は 2 レーンで合計が 8 レーン (160 [m]) から構成されている。各レーンには、環境ルールを設ける説明の都合上、それぞれ識別番号が記されている。

5.1.2 移動ロボット群

混雑したシステムとなるよう車輪型の自律移動ロボットを 35 台投入する。これらは各サーキットを右方向へ周回移動する。1 台のロボットはサーキット 3 を移動し、残り 34 台のうち 17 台ずつがそれぞれサーキット 1 と 2 を移動する。

ロボットの最高速度は 1.5 [m/s]、最大加速度は速度に応じて 0.05 [m/s²] (～0.5 [m/s])、0.08 [m/s²] (0.5～1.0 [m/s])、0.12 [m/s²] (1.0～1.5 [m/s])、最大減速度は 0.5 [m/s²] とした。したがって、式 (1)～(4) からこれら移動性能を超えた値が計算されても、それらは性能の上下限値で与えられる。

5.1.3 ACC, 行動制御手法, 環境ルール, クラスタ構成法

第 2 章の ACC を基礎制御システムとし、これに第 3 章で述べた行動制御手法と環境ルール、第 4 章で提案したクラスタ構成法を組み合わせて適用し、移動に要した時間に基づき有効性を比較・評価する。ACC に関しては、Fig. 2 の 3 種類の間隔時間に基づき、5.1.1 項と 5.1.2 項の条件の下、17 台ずつのロボット群がサーキット 1 と 2 を 200 周し、その間 1 台のロボットはサーキット 3 を周回し続ける実験を行い、Fig. 12 の結果から、移動時間が最も短くなった $h_d = 2$ の結果を対象とする。時定数と最小ロボット間距離は、それぞれ $\tau = 1.0$, $L = 3.0$ とした。

Fig. 12 Traveling time of robots based on ACC with different time headway h_d

Table 1 Average velocity [m/s] on lanes with ACC and behavior control

Lane #	1	2	3	4	5	6	7	8
Velocity	0.84	0.58	0.54	0.86	0.81	1.40	1.48	1.28
Lane #	9	10	11	12	13	14	15	16
Velocity	0.78	1.39	1.48	1.30	0.90	0.62	0.55	0.84

その他の比較・評価対象として、以下の (a)～(e) をロボットへ適用する。なお、これらにおいても ACC の制御パラメータ (h_d , τ , L) は同じ設定とした。また、式 (4) における環境ルール β は、ロボット群の混雑度、すなわち、レーンが長くロボットの台数が少なくなるほど緩くなり、一方で、レーンが短くロボットの台数が多くなるほど厳しくなる。そのため、本条件下で行った予備実験から、試行錯誤的に $\beta = 10$ とした。

- (a) ACC + 行動制御手法 + 環境ルール
- (b) ACC + 各ロボットが 1 台のクラスタを構成 (35 クラスタ)
- (c) ACC + 距離のみに基づいたクラスタ構成
- (d) ACC + 距離と速度に基づいたクラスタ構成
- (e) ACC + 距離と速度に基づいたクラスタ構成 + クラスタ結合

5.2 渋滞レーンの判別

5.1.3 項の (a)、すなわち、ACC に行動制御手法と環境ルールを組み合わせて適用するためには、あらかじめ環境ルールを設けるための渋滞レーンを判別する必要がある。そのため、ロボットに ACC と行動制御手法を適用した際の 1～16 の各レーン上における平均速度を算出した。Table 1 にその値を示す。

この結果から、ロボット群は交差・合流を通過したのち、サーキット 1 と 2 では安定した速度で高速に移動しているが、その後、再びこのボトルネックに近づくにつれ、レーン 2 と 3, 14 と 15 上にて低速移動したことが分かる。また、サーキット 3 と共有するレーンでも、その先のボトルネックが影響し、レーン 5 と 9 にて、低速移動することとなった。そこで、3.2 節で述べた二つの定義より、レーン 3 と 15 を渋滞レーンとし、ここではロボットに対してより大きな減速制動力が作用するよう環境ルールを設けた。

Fig. 13 に、ACC のみをロボットに適用した結果と、ACC に行動制御手法と環境ルールを付加した際の速度分布に関する結果を示す。なお、後者の速度分布は ACC+BC (Behavior Control) +ER (Environmental Rule) で表されている。

ACC のみを適用した際の結果と比べ、ACC+BC+ER の結果では、特に、環境ルールを設けた渋滞レーン (3, 15) での速

Fig. 13 Velocity distribution of robots with ACC, behavior control (BC), and environmental rule (ER)

Fig. 15 Velocity distribution of robots when (e) was applied

Fig. 14 Comparison of traveling time

度が高くなり、さらにこの影響がボトルネックに連なるレーン (4, 5, 9, 16) にも及び、そこでの速度も高くなったことが分かる。一方、ACC のみでも高速に移動できたその他のレーン上では、行動制御手法と環境ルール適用後もロボットは高速に移動できている。

5.3 実験結果と有効性の検証

Fig. 14 に、ACC のみと 5.1.3 項の (a) から (e) をロボットに適用した結果として、17 台ずつのロボットがサーキット 1 と 2 を 200 周移動するのにかった時間を示す。なお、1 台のロボットはサーキット 3 を周回し続けた。

ACC のみの結果 (14.89 [h]) と (a) の結果 (11.54 [h]) を比較すると、5.2 節で述べたとおり、行動制御手法と環境ルールが有効に機能したため、移動時間が 3 時間以上も短縮されていることが分かる。この結果は、混雑しボトルネックの存在するシステムでは、ACC によりロボット群の渋滞は形成されないものの、移動効率の観点からは、必ずしも有効であるとはかぎらないことを示している。またその一方で、行動制御手法と環境ルールを ACC に付加することの有効性も示している。

(b) から (d) までの、ロボット群のリアクティブなクラスタ構成法を適用した結果 (17.16 [h], 13.02 [h], 12.31 [h]) では、(b) により全ロボットが 1 台のクラスタを構成し、これらに対して仮想ダンパを挿入し減速行動をとらせると、ACC 同様渋滞は形成されないもののロボット群全体の移動効率は低下し、ACC のみによるロボット群移動よりも時間がかかってしまっていることが分かる。一方 (c) では、距離のみに基づいてロボットがクラスタを構成することで、移動時間が 4 時間以上短縮される

結果となった。また、ACC のみの結果と比べても約 2 時間、短時間で移動した。さらに、(d) では距離に加え速度を考慮したヒューリスティクスに基づきクラスタを構成することで、(c) よりもさらに 0.7 時間ほど移動時間が短縮されたことが分かる。

(b) から (d) の結果より、各ロボットが単体ではなく、リアクティブに前後いずれかのロボットとクラスタを構成し、さらに、ボトルネックでの渋滞に対しては速度を考慮したヒューリスティクスを導入することの有効性が明らかになった。さらに、(e) の結果では、リアクティブに構成されたクラスタを結合することで移動時間が 11.14 [h] となった。したがって、(a) の結果と比べ、0.4 時間と若干ではあるものの、移動時間が短縮された。この結果を考察するため、(e) をロボット群に適用した際のレーン上におけるロボット群の移動速度分布を **Fig. 15** に示す。

Fig. 13 における (a) の結果、ACC+BC+ER の速度分布と比べると、**Fig. 15** では、速度の変動が少ないことが見てとれる。これは、(a) ではロボット群が ACC に基づき一つの長いプラトゥーンを構成し、さらに行動制御手法と環境ルールによって一定の間隔でボトルネックに到達したためである。その結果、ロボット群の交差と合流がスムーズに行われず、速度分布も変動することとなった。一方 (e) では、ロボット群が (a) のプラトゥーンに比べ、短いクラスタを複数構成し、これらを単位とした移動を行った。そのため、各クラスタごとにロボット群が交差・合流し、移動がスムーズになった。なお、速度分布の標準偏差は、(a) では 0.353、(e) では 0.269 となった。

Fig. 13 においてロボット群が高速移動したレーン (8 や 12) は、**Fig. 15** では速度が低下していることが見てとれる。しかし、ここでの速度分布は交差・合流手前の速度分布より高く、当該レーンでの速度が全体の移動効率を左右することにはならなかった。なお、**Fig. 15** におけるレーン 7 と 11 ではロボット群が **Fig. 13** と同様に高速移動したことから、レーン 8 と 12 が長くなったとしても、それらの影響が拡大することはない、実験結果を左右することはない。

以上のことから、混雑しボトルネックが存在するシステムでは、隣接する前後のロボットのみの位置と速度情報といった限られた情報だけでも、提案するクラスタ構成法がロボット群の効果的な移動に対して、(a) のような膨大な情報を扱わずとも同程度かそれ以上に有効であることが分かった。

6. お わ り に

本論文では、ロボットで混雑し、移動の妨げとなるボトルネックが存在するシステムを対象に、ロボット群の効果的な移動を実現するための方法論について述べた。そのため、まず、知的交通システム (ITS) の分野で提案されている車のプラトーンが渋滞を形成せずに自動走行するための適応的走行制御手法 (ACC) に注目し、これをロボット群の移動のための基礎制御システムとして応用した。続いて、筆者らが従来研究で提案した行動制御手法と環境ルールを ACC へ付加し、それらを組み合わせることでロボットへ適用する方法について述べた。さらに、行動制御や環境ルールのように、膨大な数のロボットの情報を扱わずとも、各ロボットが隣接する前後のロボット情報のみからでも、リアクティブにオンラインでロボット群のクラスタを構成し、この単位で移動するための手法を提案した。

シミュレーション実験では、混雑しボトルネックの存在するシステムにおける ACC の限界が示された。ただし、ACC に行動制御手法と環境ルールを付加することで移動時間は短縮され、これら二つのアプローチの有効性が示された。また、ACC とロボット群クラスタ構成法を組み合わせる結果より、距離と速度のヒューリスティクスに基づき各ロボットが前後いずれかのロボットとリアクティブにクラスタを構成し、さらに、構成されたクラスタをロボット間での矛盾がなくなるまで結合することによって、行動ルールや環境ルールと同程度かそれ以上の有効性が示された。

参 考 文 献

- [1] B.S. Kerner and P. Konhäuser: "Cluster Effect in Initially Homogeneous Traffic Flow," *Physical Review E*, vol.48, no.4, pp.2335–2338, 1993.
- [2] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata and Y. Sugiyama: "Dynamical Model of Traffic Congestion and Numerical Simulation," *Physical Review E*, vol.51, no.2, pp.1035–1042, 1995.
- [3] Y. Sugiyama, M. Fukui, M. Kikuchi, K. Hasebe, A. Nakayama, K. Nishinari, S. Tadaki and S. Yukawa: "Traffic Jams without Bottlenecks — Experimental Evidence for the Physical Mechanism of the Formation of a Jam," *New Journal of Physics*, vol.10, 033001, 2008.
- [4] S. Hoshino, J. Ota, A. Shinozaki and H. Hashimoto: "Hybrid Design Methodology and Cost-Effectiveness Evaluation of AGV Transportation Systems," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol.4, no.3, pp.360–372, 2007.
- [5] S. Hoshino, H. Seki, Y. Naka and J. Ota: "Multi-Robot Coordination for Flexible Batch Manufacturing Systems Experiencing Bottlenecks," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol.7, no.4, pp.887–901, 2010.
- [6] 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.
- [7] P.A. Ioannou and C.C. Chien: "Autonomous Intelligent Cruise Control," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.42, no.4, pp.657–672, 1993.
- [8] 星野智史, 関宏也, 仲勇治, 太田順: "循環行動するロボット群の渋滞に効果的な知的走行制御手法の提案", *日本機械学会論文集 C 編*, vol.76, no.770, pp.2387–2395, 2010.
- [9] 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.

- [10] A. Kesting, M. Treiber, M. Schönhof and D. Helbing: "Adaptive Cruise Control Design for Active Congestion Avoidance," *Transportation Research Part C*, vol.16, no.6, pp.668–683, 2008.
- [11] C.-Y. Liang and H. Peng: "Optimal Adaptive Cruise Control with Guaranteed String Stability," *Vehicle System Dynamics*, vol.31, pp.313–330, 1999.
- [12] C.-Y. Liang and H. Peng: "String Stability Analysis of Adaptive Cruise Controlled Vehicles," *JSME International Journal Series C*, vol.43, no.3, pp.671–677, 2000.
- [13] L.C. Davis: "Effect of Adaptive Cruise Control Systems on Traffic Flow," *Physical Review E*, vol.69, 066110, 2004.
- [14] B.S. Kerner: "Empirical Macroscopic Features of Spatial-Temporal Traffic Patterns at Highway Bottlenecks," *Physical Review E*, vol.65, 046138, 2002.
- [15] A. Uno, T. Sakaguchi and S. Tsugawa: "A Merging Control Algorithm based on Inter-Vehicle Communication," *Proc. of IEEE/IEEEJ/JSAP International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp.783–787, 1999.
- [16] Y. Ikemoto, Y. Hasegawa, T. Fukuda and K. Matsuda: "Control of Vehicle Cooperative Behavior in Non-Signalized Intersection," *Distributed Autonomous Robotic Systems 6*, pp.421–430, 2007.

星野智史 (Satoshi Hoshino)

2006 年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。2006 年東京工業大学資源化学研究所助手。2007 年同助教。群ロボットによる港湾自動コンテナターミナル・多品種生産システムの開発、自律移動ロボット群の渋滞に対する行動制御・最適保全に関する研究に従事。2004 年日本機械学会第 13 回交通・物流部門大会優秀論文講演表彰受賞。2011 年日本ロボット学会研究奨励賞受賞。2012 年日本機械学会生産システム部門優秀講演論文表彰受賞。IEEE, 日本機械学会, 計測自動制御学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

関 宏也 (Hiroya Seki)

1986 年東京大学工学部機械工学科卒業。1988 年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了。同年三菱化成 (株) (現在三菱化学) 入社。この間、1995～1997 年スイス連邦工科大学自動制御研究室客員研究員。博士 (工学)。2005 年東京工業大学資源化学研究所准教授。プラントワイド制御、バッチプロセス制御の高度化などに関する研究に従事。2002 年 IFAC Control Engineering Practice Prize Paper Award, 2003 年計測自動制御学会論文賞武田賞。化学工学会, 計測自動制御学会の会員。

太田 順 (Jun Ota)

1987 年東京大学工学部精密機械工学科卒業。1989 年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了。同年新日本製鐵 (株) 入社。1991 年東京大学工学部助手。1994 年博士 (工学)。同講師。1996 年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻助教授。この間、1996～1997 年スタンフォード大学客員研究員、介護ロボットのインタフェースシステムの研究に従事。2007 年同准教授。2009 年より東京大学人工物工学研究センター教授。群ロボットの計画、制御、ロボットのための環境設計、群知能ロボットと移動知、大規模生産/搬送システムの設計、ヒューマンアナリス等の研究に従事。(日本ロボット学会正会員)