

ボトルネックの存在する混雑環境で形成される 移動ロボット群渋滞を解決するための行動制御手法と環境ルール

星野智史 (東京工業大学) 関宏也 (東京工業大学)

1. 序論

本稿では、自律移動ロボット群を研究の対象とする。これらロボット群は、一本のレーン上を同一方向へと移動し、さらにその際、前のロボットを超越することはできない。このような場合、各ロボットが自由な速度で行動していても、ロボットの台数増加に伴い渋滞の形成が不可避となる。そのためロボットに対しては、渋滞の形成を防ぐ、あるいはすでに形成された渋滞に対してはそれを解消するよう、群れとして効果的に移動することが求められる。

したがって本研究では、ボトルネックが存在し、かつ混雑した環境を想定の下、そこで形成される移動ロボット群の渋滞を解決するための方法論を提案する。これは、具体的に以下の2つから構成される。

1. 既に著者らが提案している行動制御手法のシナリオとモデルを改良し、より効果的な相互外力がロボット間で作用するようにする。
2. 渋滞レーンを移動中のロボットに対して、より大きな相互外力が作用するよう、環境ルールを設計し、レーン上に設ける。

シミュレーション実験では、改良されたロボット行動制御手法と環境ルールを実装する。環境ルールは、既定案の従来行動制御手法と共に実装される。また、ロボットの行動制御に用いられる仮想ダンパは、追従・衝突回避・渋滞解消を目的とした最適制御手法である適応的走行制御手法 (ACC: Adaptive Cruise Control) にも適用することができる。そのため、改良行動制御手法ならびに環境ルールを ACC に加えて実装する。そして、それぞれの結果に基づき、ボトルネックが存在した混雑環境下での渋滞に対する本方法論の有効性について議論する。

2. 適応的走行制御手法 (ACC)

知的交通システム (ITS) の研究分野では、車が最適に自動走行するための ACC が提案されている [1]。ACC をロボットに適用し、ロボット群の隊列に対して前から順に番号 n を割振る。先頭のロボットは $n = 0$ に相当し、その速度は v_0 となる。これにより、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 は反応時間を意味している。

式 (1) が示す ACC では、前後の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 の関数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 と L は前のロボットがいた位置に後ろのロボットが到達するまでの時間とロボット間の最低安全距離、 α は相対速度に対する係数のことである。Liang と Peng は、車列制御の安定性に関する結論として、結合安定性 (String Stability) について述べている [2] [3]。そして、 Δx_n と Δx_{n-1} に関する周波数伝達関数の絶対値が、ある条件の下で 1 以下となることについて言及している。さらに Davis は、 $\alpha = \tau/h_d$ であれば、この条件が満たされ、いかなる τ と h_d に対しても結合安定性が保証されることを示している [4]。結合安定性が保証されているシステムでは、車列制御を行うにあたって渋滞が形成されることはない。

ただし、ロボットがこの ACC に基づいて行動した場合、常に前のロボットの影響を受けることになる。そのため、前のロボットが頻りに停止することを余儀なくされるシステムでは、渋滞に対する有効性が定かではない。そこで、ボトルネックが存在し混雑したシステムにおける ACC の有効性を、シミュレーション実験により検証する。また、ACC に加えてロボット行動制御手法ならびに環境ルールも実装し、その効果についても明らかにする。

3. ロボットの行動制御手法

3.1 基礎となる制御システム

各ロボットが前のロボットに対して衝突回避しながら追従するため、バンバン制御 (BBC: Bang-Bang Control) を適用する。これによりロボットは、自らの速度 (加速度、減速度) を制御対象領域に基づき決定することができる。

ロボットは、前のロボットに応じて行動モードを切替えながら移動する。ロボットの進行方向に設けられた制御対象領域は、固定された最低安全ロボット間距離と停止距離 (空走距離と制動距離) から構成される。停止距離は $vt + \frac{v^2}{2a}$ から計算され、 v , t , a はそれぞれ、速度、反応時間、最大減速度のことである。

BBC に基づき、各ロボットは通信を介して前のロボットの位置情報を取得し、1) 最大減速と 2) 最大加速の2つの行動モードに切替える。例えば、あるロボット (R_f) は前のロボット (R_p) が制御対象領域内にいた場合、行動モードを 1 に切替え減速し、 R_p が領域外にいれば、行動モードを 2 に切替え加速する。

ただし、ロボットは制御対象領域外側のロボットに対しては減速しないため、停止ロボットや追従ロボッ

トより低速移動するロボットは、追従ロボットの制御対象領域内に入り、最終的に追従ロボットも行動モードを1に切替え停止することとなる。この現象が後方のロボット群へ伝播することで、渋滞が形成される。

3.2 既提案ロボット行動制御手法

著者らはこれまでに、ボトルネックと渋滞を考慮した上で、自律移動ロボットが追従と衝突回避を行うための行動制御手法を提案してきた [5] [6]。これにより、前のロボットが停止していた際、仮想的なダンパが制御対象領域に関係なく当該ロボット間に挿入され、相互外力が追従ロボットに作用するよう生成されることとなった。ロボットは前との相対的な位置関係すなわちロボット間距離を維持するよう、制御対象領域外のロボットに対しても、停止していれば減速することができる。本稿では以降、これを従来行動制御手法とする。

図1は、後ろで追従するロボット(R1)が、前のロボット(R2)から相互外力を受けながら行動モード2で動いている様子を示している。

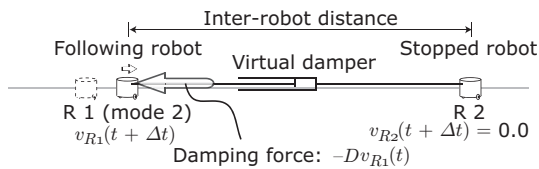


図1 仮想ダンパを用いた従来行動制御手法のシナリオ

時刻 t にて、R2がR1の制御対象領域外側にて停止した際、これらのロボット間に仮想ダンパが挿入される。その結果、微小時間 Δt 後のR1の速度 $v_{R1}(t + \Delta t)$ は、制動力と微小時間の積 $Dv_{R1}(t)\Delta t$ だけ減速することとなる。なお、 D は仮想ダンパの粘性係数、 $v_{R1}(t)$ はR1の時刻 t における速度のことである。

相互外力として制動力がロボットに作用すると、微小時間 Δt 後のロボットの速度は式(3)となる。ここで、 a はロボット R の加速度のことである。また、 Δt は制御のための最小サンプリング時間のことである。これは、式(1)の反応時間 τ に相当する。

$$v_R(t + \Delta t) = v_R(t) + a\Delta t - Dv_R(t)\Delta t \quad (3)$$

3.3 ロボット行動制御手法の改良

図2は、従来行動制御手法にてロボットへ相互外力を作用させる際の問題点を示している。

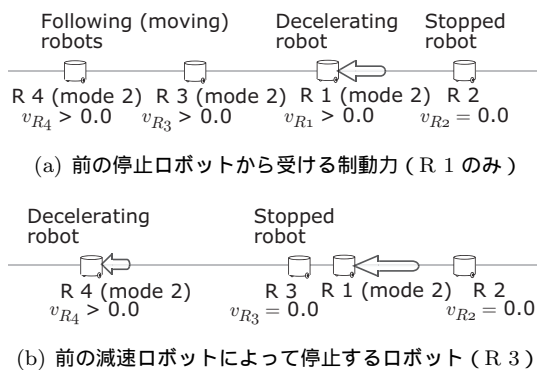


図2 従来行動制御手法における問題

図2(a)では、停止ロボットの直後のロボットのみ制動力が作用している。したがって、行動モード2のロボット群R1, R3, R4のうち、R1だけが制動力により減速することができる。その結果、図2(b)が示すように、R3は減速中のR1により停止を余儀なくされ、その一方で、制動力がその直後のR4へ作用し、R4は減速することとなる。停止ロボット直後のロボットには制動力が作用するため、渋滞量が後方に向かって増加することはない。しかしながら、散在する停止ロボットにより、システムの性能が低下してしまう恐れがある。

そこで本研究では、停止ロボットの後方全ロボットに対して相互外力を作用させるための改良を行う。そのため、まず、停止ロボットの後方にて行動モード2でいる全ロボットに対して、前のロボットとの間に仮想ダンパを挿入させる。これにより、進行方向前方に停止ロボットが存在した場合、後方の各ロボットは、前で減速しているロボットに対して自らも減速することが可能となり、停止ロボットが散在する問題を解決することができる。ただし、この制動力は $v_{R_p} \leq v_{R_f}$ の場合にのみ作用する。 R_p と R_f は前後のロボットのことであり、 v はそれらロボットの速度を示している。

図3は、改良制御手法に基づき、停止ロボットR3の後方全てのロボット間で生成された制動力を示している。R1とR2の間には、従来行動制御手法では仮想ダンパが挿入されないことに注意されたい。

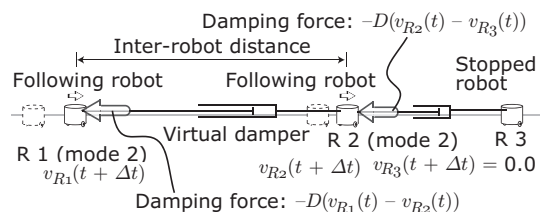


図3 改良されたロボット行動制御手法のシナリオ

時刻 t にてR3が停止すると、各ロボットの速度関係が $v_{R3} \leq v_{R2} \leq v_{R1}$ であれば、仮想ダンパがR3とR2, R2とR1のロボット間に挿入される。その結果、R1とR2の速度は、 $D(v_{R1}(t) - v_{R2}(t))\Delta t$ と $D(v_{R2}(t) - v_{R3}(t))\Delta t$ だけ減速することとなる。なお、 $v_{R1}(t)$, $v_{R2}(t)$, $v_{R3}(t)$ は、それぞれR1, R2, R3の時刻 t での速度のことである。

この改良行動制御手法により追従ロボットに対する制動力が作用する際、 Δt 後のロボットの速度は、式(4)で表すことができる。ここで、 a は追従ロボット R の加速度、 R' は前のロボットのことを示している。

$$v_R(t + \Delta t) = v_R(t) + a\Delta t - D(v_R(t) - v_{R'}(t))\Delta t \quad (4)$$

3.4 ACCに対する改良行動制御手法の実装

相互外力を用いることの長所として、制御系をACCのモデルへそのまま導入できることが挙げられる。すなわち、仮想ダンパとそこからの制動力をACCに加えて実装することができる。そのため、3.3節と同様の制御シナリオの下、式(2)に対して制動力を以下のように

に付加する．

$$v_R(t + \Delta t) = \frac{1}{h_d} \{ \Delta x_n(t) - L \} + \alpha \Delta v_n(t) + D \Delta v_n(t) \tau, \quad (5)$$

Δx_n と Δv_n は、ロボット間距離と相対速度のことであり、 τ は式 (4) における Δt に相当する．

なお、ACC で定義されている相対速度は $\Delta v_n(t) = v_{n-1}(t) - v_n(t)$ であるため、仮想ダンパが挿入される際には式 (5) の右辺第三項が負値となる．そのため、式 (3) や式 (4) とは異なり、制動力の項が式 (2) に対して足されていることに注意されたい．

4. 環境ルール

4.1 環境要因により形成される渋滞

ロボットが群れで行動すると、ボトルネックがなくとも台数増加にともない自然に渋滞が形成される．さらに、レーンの交差や合流といったボトルネックが存在するシステムでは、よりロボット群の渋滞が形成されやすくなる．図 4 は、ロボット群がレーン上の 2 点間 (P1 と P2) を往復移動している様子を示している．

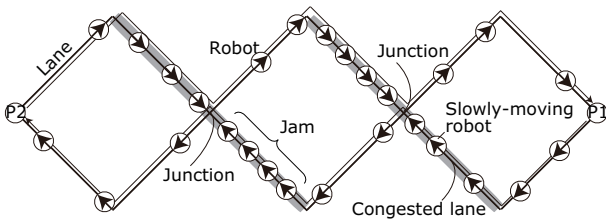


図 4 ボトルネックにより形成されるロボット群渋滞の一例

本システムには 2 つの合流点がボトルネックとして存在する．そのため、混雑具合によっては灰色で示されたレーン上にて渋滞が形成され、ここでロボット群は低速移動することとなる．その結果、この低速で移動するロボット群が全体の移動速度ならびに時間を左右する可能性がある．

4.2 関連研究

この問題に対して、混雑量あるいはロボット群の密度を減少させるための研究がなされている．西成らは、出入り口をボトルネックとし、ここで発生する歩行者の渋滞を、障害物を置くことで解消し、ボトルネック付近での人の流れをスムーズにすることに成功している [7]．岡田らは、ロボット群の渋滞緩和のため、快適空間設計法として混雑部に対してポールを置くためのアルゴリズムを提案している [8]．

しかしながら、これら障害物を置くアプローチでは、渋滞に対して物を置いた点でのみしか影響を及ぼすことができない．さらに、ボトルネックが複数存在するシステムに対しては、その分の障害物を置かなくてはならず、これによりシステム自体が複雑になってしまう．また、複数障害物を置くことの渋滞に対する有効性についても検証がなされていない．

4.3 設計方針

本研究では、ボトルネックにより渋滞している部分でのロボット群の密度を減少させるため、障害物でな

く環境ルールを設計する．そのため、まず、ボトルネックによりロボット群が低速移動している場所、すなわち渋滞レーンを見つけ出す必要がある．そこで、各レーン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ていれば、それによりロボット群は停止と発進を繰り返すこととなる．そのため、渋滞レーンとは以下の 2 つの条件を満たしたレーンであると定義する．(I) ボトルネックに直接接続するレーン．(II) ロボットが最も低速で移動するレーン．そして、ロボット群が次々とボトルネック部に到達してしまわないための環境ルールを設計し、それを当該渋滞レーンへと設ける．

環境ルールは、相互外力を使用することに関連して設計される．したがって、3.2 節の従来行動制御手法や、さらには ACC に対しても実装することが可能である．そのため、環境ルールを設けることで、式 (3)、式 (4)、式 (5) における粘性係数 D は、ロボットが渋滞レーンを移動中にはより大きな制動力が作用するように、係数 β だけ増大される．これにより、従来行動制御手法では $\beta D v_R(t) \Delta t$ 、改良制御手法では $\beta D (v_R(t) - v_{R'}(t)) \Delta t$ 、ACC では $\beta D \Delta v_n(t) \tau$ の相互外力が渋滞レーン上でのロボット群に作用することになる．

すなわち、渋滞解決のため、渋滞レーン上をすでに低速で移動中のロボットは、ルールによってさらに低速で移動するよう外的に規制される．ルールは障害物と異なり、環境に対して実体を置く必要がないためシステムは複雑にならず、さらに、点でなくレーン単位でロボットに対して相互外力を作用させることができる．そのため、より広域な範囲で渋滞に対して影響を及ぼすことができる．

5. シミュレーション実験

5.1 実験条件

本シミュレーション実験では、ロボット群の移動時間をシステムの性能指標とする．ロボット群は、ボトルネックとして交差と合流を有したシステム内を移動する．図 5 が示すように、本システムは 3 つの周回サーキットから構成されている．

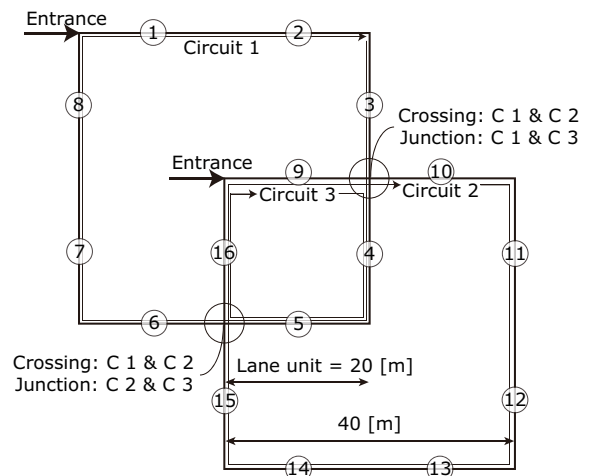


図 5 ボトルネックを有した混合型サーキットシステム

合計で 35 台のロボット群を投入し、1 台のロボット

がサーキット1を、残りのうち、それぞれ17台ずつのロボット群がサーキット1と2を時計回りに移動する。計算機シミュレーションのため、制御サンプリング時間と反応時間を離散値 $\Delta t = 1, \tau = 1$ [s] とした。その他の制御パラメータは、 $h_d = 1.0$ [s], $L = 3.0$ [m], $\alpha = \tau/h_d = 1$ とした。環境ルールによって渋滞レーンに設けられる係数 β は、 $\beta = 10$ とした。

5.2 実験結果

本シミュレーション実験では、ロボット群は交差・合流を通過した後、サーキット1と2では安定した速度で高速に移動し、その後、再びこのボトルネックに近づくにつれ、低速で移動する結果となった。そして、ボトルネックに直接接続されたレーンのうち、レーン3と15にてロボット群は最も低速で移動した。そのため、これら2つを渋滞レーンとする。以上のことから、従来行動制御手法、改良行動制御手法、ACCを実装する際、レーン3と15上にてより大きな相互外力が作用するように、環境ルールをこれらのレーンに設けることとした。

図6はBBCのみ、BBCに従来行動制御手法¹と環境ルール²を実装(BBCpreBCER)、BBCに改良行動制御手法³と環境ルールを実装(BBCimpBCER)、ACCのみ、ACCに改良行動制御手法と環境ルールを実装(ACCimpBCER)した結果を示している。

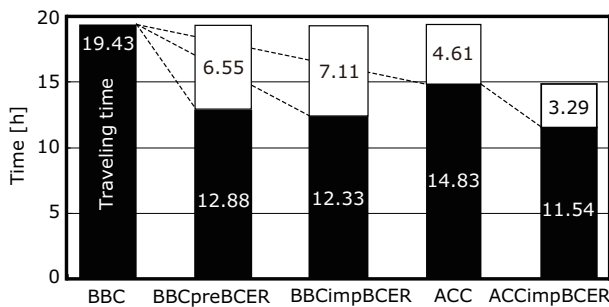


図6 ロボット群の移動時間の比較

BBCpreBCERとBBCimpBCERのいずれも、BBCに比べ移動時間を約6.55と7.11[h]だけ短縮した。また、BBCpreBCERに比べBBCimpBCERは0.5[h]だけ移動時間を短縮し、ロボット群の移動にとっては最も効果的であることが確認できる。これは、行動制御手法を改良したためであり、事実、新旧の行動制御手法のみをBBCに加え実装した際には、それぞれ4.79と5.82[h]だけ移動時間が短縮される結果となった。さらに、残りの1.76と1.29[h]分の短縮時間が、環境ルールを設けることの渋滞に対する有効性も示している。

BBCpreBCERとBBCimpBCERは、結合安定性が保証されていないにもかかわらず、ACCと比べても1.95と2.5[h]だけ移動時間を短縮した。この結果は、ボトルネックが存在しロボットで混雑したシステムに対しては、ACCが最適とはならないことを示している。ただし、ACCimpBCERは、ACCと比べ、3.29[h]も移動時間を短縮する結果となった。これは、ボトルネッ

クにより前のロボットが停止した際、追従するロボットはACCにより算出された以上に減速する必要があり、この差を式(5)における外力の項が補完したためである。したがって、ボトルネックが存在し混雑したシステムに対しては、改良行動制御手法ならびに環境ルールはBBCだけでなくACCへも十分適用することができ、それらの渋滞に対する有効性も示された。

以上の結果から、BBCやACCなどといった基礎となる制御システムに関係なく、提案した方法論における改良行動制御手法ならびに環境ルールの渋滞に対する有効性が明らかになった。そして、ボトルネックが存在しかつ混雑したシステムに対しても、ロボットを群れとして効果的に移動させ、高い性能が得られることが示された。

6. 結論

本稿では、自律移動ロボット群を対象に、ボトルネックが存在しかつ混雑した環境の下、群れとして効果的に移動させるための方法論を提案した。そのため、従来の行動制御手法を改良し、より効果的な相互外力がロボット間で作用するように、さらに、渋滞レーンを移動中のロボットに対してはより大きな相互外力が作用するように環境ルールを設計した。シミュレーション実験により、本システムに対するACCの問題点を指摘した上で、本方法論における改良行動制御手法ならびに環境ルールの渋滞に対する有効性を明らかにした。

謝辞

本研究の一部は、矢崎財団(Yazaki Memorial Foundation for Science and Technology)の支援を受けた。

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] C.-Y. Liang and H. Peng, "Optimal Adaptive Cruise Control with Guaranteed String Stability," *Vehicle System Dynamics*, vol. 31, pp. 313–330, 1999.
- [3] 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.
- [4] L. C. Davis, "Effect of Adaptive Cruise Control Systems on Traffic Flow," *Physical Review E*, vol. 69, pp. 1–8, 2004.
- [5] S. Hoshino *et al.*, "Behavior Control Methodology for Circulating Robots in Flexible Batch Manufacturing Systems Experiencing Bottlenecks," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5350–5356, 2009.
- [6] S. Hoshino *et al.*, "Autonomous Cruise Control of Circulating Multi-Robot for Congestion," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2101–2106, 2010.
- [7] K. Nishinari, "Jamology: Physics of Self-driven Particles and Toward Solution of All Jams," *Distributed Autonomous Robotic Systems*, vol. 8, pp. 175–184, 2008.
- [8] 本間 良幸, 岡田 昌史, "混雑緩和のためのアメニティ設計と移動ロボットへの応用," 第27回日本ロボット学会 学術講演会 CD-ROM 論文集, 1F2-02, pp.1–4, 2009.

¹previous Behavior Control

²Environmental Rule

³improved Behavior Control