

## Multi-Robot Coordination Methodology for Jams Formed in Congested Systems

正 星野智史（東京工業大学） 関 宏也（東京工業大学）

Satoshi HOSHINO and Hiroya SEKI, Tokyo TECH, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, JAPAN

**Abstract**— In order for multiple autonomous mobile robots to solve jams, this paper describes a novel methodology. In this methodology, first off, our previously-proposed cruise control technique is improved. After that, a behavior rule in connection with the intelligent cruise control technique is designed and provided on congested lanes where robots slowly move. Through simulation experiments, the influence of the improved control technique and behavior rule on the robots' movement in the system is evaluated. Finally, the effectiveness of the methodology for solving the jams is shown.

**Key Words:** Multi-robot systems, intelligent transport systems, cruise control, jam

## 1. 緒言

人が運転する自動車や自律移動ロボットなど、自らの行動に関して意思決定を行うことができる移動体（自己駆動粒子：Self-driven particles）が群れとしてシステム内を一方方向に動く際、例えば信号などの移動や流れを妨げるボトルネックが存在しなくとも、移動体の数が増すにつれ、渋滞が形成される。ボトルネックがある場合、例えばロボットを用いた多品種生産システムでは、ロボットの台数に応じて渋滞がより顕著に作業場所などのボトルネック部分で形成される [1]。すなわち、ボトルネックの有無に関係なく、いずれのシステムにおいても渋滞は発生し、これが群れの移動速度や時間に及ぼす影響は深刻なものとなる。

本研究では、自らの行動の意思決定が可能な自律移動ロボット群が、1本のレーン上を同一方向に移動するシステムを対象とする。本システムでは、後ろのロボットが前のロボットを追越すことはできない。このとき、各ロボットが自由に動いては渋滞の形成は不可避となる。そのため、移動ロボット群により形成される渋滞を解決するための方法論が必要となる。そこで本研究では、ロボット群がより効果的に渋滞を解決することを目的に、以下の2つのアプローチからなる方法論を提案する。

1. 既に著者らが提案している知的走行制御手法のシナリオとモデルを改良し、ロボットが停止しないための新たな知的走行制御手法を構築する。
2. ロボット群の走行速度分布を求め、レイアウトに起因して速度が低下した渋滞箇所に対し、走行制御手法と関連した行動ルールを設ける。

本稿の後半では、シミュレーション実験を行い、改良された知的走行制御手法とこれに関連して設計された行動ルールが、システム内におけるロボット群の移動に及ぼす影響について評価する。最後にこれらの結果から、渋滞に対する本方法論の有効性を示す。

## 2. ロボット群走行制御手法

## 2.1 基礎制御系

ロボットが前のロボットに衝突せず追従するよう、バンバン制御を適用する。Fig.1に、ロボットが前のロボットとの距離に応じて走行している様子を示す。ロボットは進行方向前方に、最低安全距離 ( $L$ ) と停止距離 ( $vt + \frac{v^2}{2a}$ ) からなる制御対象領域を有している。

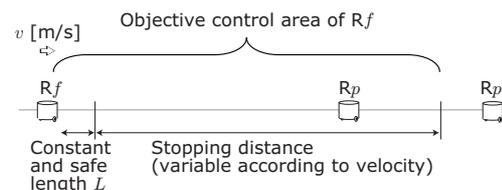


Fig.1 Forward Objective Area for Bang-Bang Control

前のロボット ( $R_p$ ) が後ろのロボット ( $R_f$ ) の制御対象領域内に存在した場合、 $R_f$  は動作モードを 1) 減速に切替え、領域外に存在した場合は動作モードを 2) 加速に切替えて走行する。そのため、 $R_f$  は制御対象領域の外側に存在する  $R_p$  に対して減速することができない。したがって、ここでの  $R_p$  が停止あるいは  $R_f$  より低速で走行していた場合、最終的に  $R_f$  も動作モードを 1 に切替え停止せざるを得なくなる。この現象が後続に伝播することで、渋滞が形成される。

## 2.2 既提案知的走行制御手法

## 2.2.1 制御シナリオ

著者らはこれまでに、渋滞を考慮した走行制御手法を提案してきた [2] [3]。渋滞を解決するためには、渋滞が制御対象領域外側で形成された際に、渋滞に向かって走行中のロボットがそれに加わらないことが重要となる。そこで、前方の停止ロボットとの間に仮想的なダンパを挿入し、これに基づいた減速のための力学系を構築した。Fig.2は、後ろのロボット ( $R_1$ ) が、ダンパからの制動力を受けながら動作モード 2 で走行し

ている様子を示している。

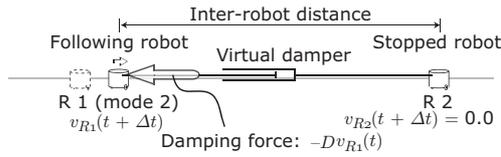


Fig.2 Control Scenario with Virtual Damper

時刻  $t$  にて前のロボット (R 2) が停止した際、制御対象領域の外内に関係なく前後 2 台のロボット間に仮想ダンパが挿入される。これにより、R 1 の  $\Delta t$  後の速度  $v_{R1}(t + \Delta t)$  は、制動力と時間の積 ( $Dv_{R1}(t)\Delta t$ ) だけ減速することとなる。ここで、 $D$  はダンパの粘性係数、 $v_{R1}(t)$  は R 1 の時刻  $t$  での速度を意味している。

### 2.2.2 制御モデル

制動力がロボットに作用すると、時間  $\Delta t$  後のロボットの速度は式 (1) となる。 $a$  は後ろのロボット (R) の加速度のことである。また、 $\Delta t$  はロボット制御のための最小サンプリングタイムとする。

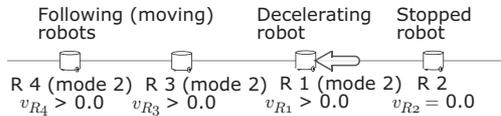
$$v_R(t + \Delta t) = v_R(t) + a\Delta t - Dv_R(t)\Delta t \quad (1)$$

本研究では、仮想ダンパの粘性係数  $D$  が、前方停止ロボットとの距離に応じて決められるよう、 $D = 1.0/\text{ロボット間距離}$  とした。

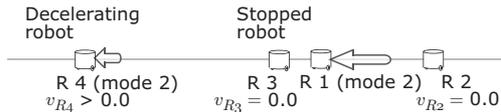
## 2.3 新知的走行制御手法

### 2.3.1 改良制御シナリオ

Fig.3 に、2.2.1 項で述べた制御シナリオの問題点を図示する。Fig.3(a) が示すように、制動力は停止ロボット直後のロボットのみにはしか作用しない。そのため、後方を動作モード 2 で走行中のロボット R 1, R 3, R 4 のうち、R 1 は制動力により減速することができるが、R 3 と R 4 には、それぞれ前のロボットが走行しているため、制動力は作用せず加速することとなる。その結果、Fig.3(b) が示すように、R 3 は R 1 によって動作モードを 1 へ切替え停止しなくてはならない。



(a) Damping force affected by stopped robot in front



(b) Stopped robot due to decelerating robot in front

Fig.3 Problem of Our Previous Cruise Control Scenario

そこで本研究では、従来制御シナリオを改良し、Fig.4 が示すように、進行方向に停止ロボットが存在した際、

その後方全てのロボットに制動力が作用するための制御シナリオを構築する。

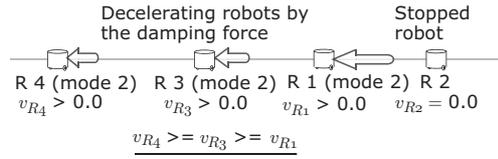


Fig.4 Damping Force Exerted against All the Robots Behind Stopped Robot

これにより、後方の全ロボットが進行方向に存在する停止ロボットに対して減速行動を取り、ロボット群が停止することなく移動することが可能となる。ただし、停止ロボット後方の全ロボットに制動力が作用するためには、 $v_{R_p} < v_{R_f}$  を条件とする。ここで、 $R_p$  と  $R_f$  は、前後 2 台のロボットのことであり、 $v$  はそれらの速度関係を示している。すなわち、進行方向に停止ロボットがいても、前のロボットの速度が自らの走行速度を上回っている場合、当該ロボット間に仮想ダンパは挿入されず、後ろのロボットに制動力は作用しない。

Fig.5 は、新知的走行制御手法をロボット群へ適用した際の力学系を示している。改良された制御シナリオに基づき、停止しているロボット (R 3) の後方を動作モード 2 で走行中のロボット (R 1 と R 2) に対して、それぞれ仮想ダンパが挿入され制動力が作用する。

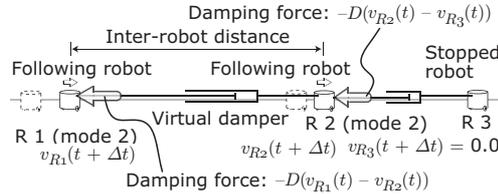


Fig.5 Improved Cruise Control Scenario

時刻  $t$  でロボット R 3 が R 1 と R 2 の進行方向前方で停止した際、停止ロボット R 3 とその後ろで走行中のロボット R 2 との間に加え、走行中のロボット R 1 と R 2 の間にも仮想ダンパが挿入される。その結果、時間  $\Delta t$  だけ制動力を受け続けると、R 1 と R 2 の走行速度はそれぞれ  $D(v_{R1}(t) - v_{R2}(t))\Delta t$  と  $D(v_{R2}(t) - v_{R3}(t))\Delta t$  だけ減速することとなる。

### 2.3.2 改良制御モデル

後方を走行中のロボットに対して、改良された制御シナリオに基づき制動力が作用すると、時間  $\Delta t$  後のロボットの走行速度は、式 (2) となる。ここで、 $a$  は後ろを走行中のロボット (R) の加速度を、 $R'$  は前のロボット、 $D$  は仮想ダンパの粘性係数のことを示している。

$$v_R(t + \Delta t) = v_R(t) + a\Delta t - D(v_R(t) - v_{R'}(t))\Delta t \quad (2)$$

式 (2) は、前のロボットが停止しており  $v_{R'}(t) = 0$  となる場合、式 (1) で表される従来制御モデルを包含することになる。粘性係数は、 $D = 1.0/\text{ロボット間距離}$  から決定し、ロボット間距離と相対速度に応じた制動力を、後ろを走行中のロボットへ作用させる。

### 3. 行動ルール

#### 3.1 レイアウトに起因する渋滞

Fig.6 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。本システムでは、空間制約によりレーン数を増やしたり渋滞を迂回するレーンを設けるインフラの拡張設計は行えないものとする。

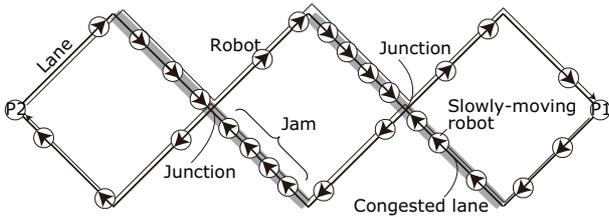


Fig.6 Example of Jam of Robots Due to Bottlenecks

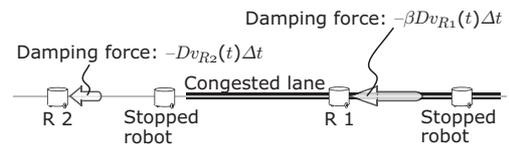
本レーンネットワーク上には、往路と復路のレーンが合流する地点が 2 箇所ある。そのため、この合流部がボトルネックとなり、ここを先頭に、灰色が示すレーン上で渋滞が発生し、ロボットが低速で走行することとなる。渋滞や低速走行するロボットは、それ自身がロボット群全体の移動速度や走行時間を左右する。

#### 3.2 走行制御手法と関連した行動ルールの設計

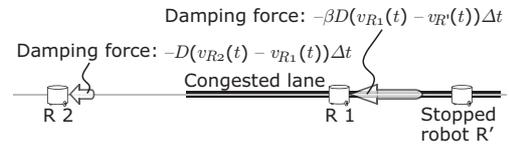
本研究では、行動ルールを設けることにより、ボトルネック部で発生する渋滞を分散させる。そのため、ロボット群の走行速度の分布を求め、ボトルネックによりロボット群が渋滞し、これにより低速走行するレーンを見つけ出す。そこでこの渋滞レーンを (I) ボトルネックへと向かってつながり、かつ (II) 走行速度が最も低くなるレーンと定義する。そしてこの渋滞レーンでは、ボトルネックに次々とロボットが到達するのを防ぐため、その他のレーンに比べ、ロボット群がさらに低速で走行するための行動ルールを設ける。

提案する行動ルールは、制動力が作用する制御モデルと関連する形で設計される。したがって、改良された新知的走行制御手法だけでなく、既提案知的走行制御手法においても、本行動ルールを渋滞レーンに設けることができる。Fig.7 は、各制御手法の下、ロボット群がこの行動ルールに従い、渋滞レーンとそれ以外のレーン上で、それぞれ異なった制動力を受けながら減速行動をとっている様子を示している。

渋滞レーン上で、新旧 2 つの知的走行制御手法により後ろのロボットが前のロボットから制動力を受け減速行動をとる際、より大きな制動力が作用するよう式



(a) Behavior rule with previous cruise control technique



(b) Behavior rule with novel cruise control technique

Fig.7 Different Damping Force Depending on Lanes

(1) と式 (2) の制御モデルにて、粘性係数  $D$  を定数倍するために値  $\beta$  をかける。これにより、既提案知的走行制御手法を適用しても、渋滞レーン上では、それ以外のレーン上と比べ、前の停止ロボットから受ける制動力が  $\beta$  だけ大きくなり (Fig.7(a) 参照)、新知的走行制御手法でも、ロボット間で作用する制動力が、ロボットが渋滞レーンにいるかいないかにより  $\beta$  だけ変わることとなる (Fig.7(b) 参照)。

### 4. シミュレーション実験

#### 4.1 実験条件

ロボット群は、ボトルネックとして交差と合流を有する単一レーン周回型のシステム内を移動する。Fig.8 に、3 つの周回サーキットから構成されるロボットシステムを示す。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。

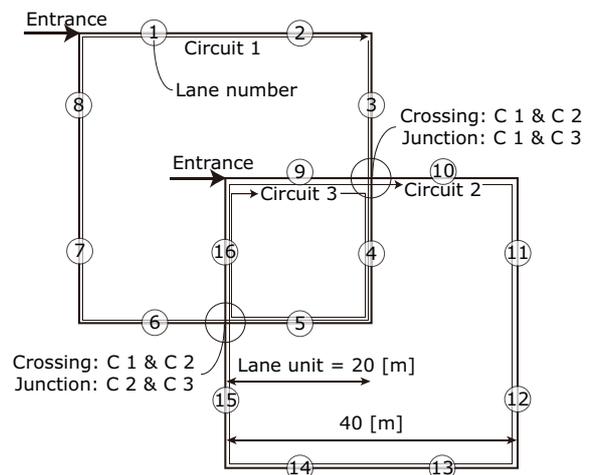


Fig.8 Mixed System Layout Consisting of Three Circuits

本システムに対して、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走行する。1 台のロボットはサーキット 3 を走行し、残りの 34 台のうち 17 台ずつがそれぞれサーキット 1 と 2 を 200 周走行する。本実験では、ロボット群の走行時

間を渋滞に対する有効性の評価指標とする。

## 4.2 実験結果

### 4.2.1 渋滞レーン

Fig.9 に、バンバン制御のみをロボット群に適用した結果得られた各サーキットでの速度分布を示す。この結果を基に、渋滞レーンを求める。

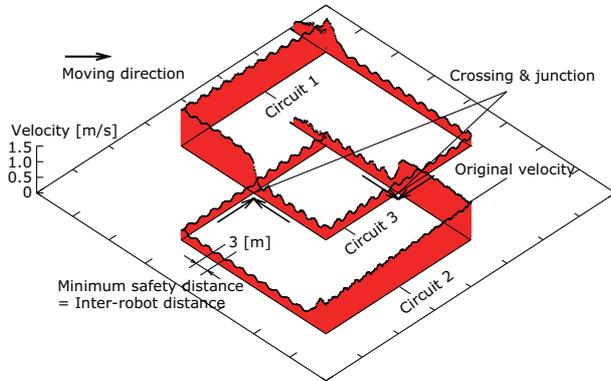


Fig.9 Velocity Distribution with Bang-Bang Control

速度分布より、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走行しているが、その後、再びこのボトルネックに近づくにつれ、低速で走行したことが分かる。このとき、Table 1 が示す1～16の各レーン上における速度分布の平均値より、ボトルネックを先頭につなげたレーンとして、レーン2と3, 14と15にてロボットは最も低速で走行することとなった。そのため、新旧2つの知的走行制御手法をロボットに適用する際には、これら4つの渋滞レーンに対して行動ルールを設ける。なお、3.2節で述べた $\beta$ の値は、ロボットの速度性能や台数による影響が大きく、試行錯誤的に $\beta = 10$ とした。

Table 1 Average Velocity with Bang-Bang Control

Lane #	1	2	3	4	5	6	7	8
Velocity	0.42	0.32	0.31	0.35	0.38	1.18	1.13	1.04
Lane #	9	10	11	12	13	14	15	16
Velocity	0.38	1.17	1.12	1.05	0.42	0.31	0.30	0.36

### 4.2.2 走行時間

Fig.10 に、バンバン制御のみの結果と、これに既提案知的走行制御手法と新知的走行制御手法を加えてロボットへ適用し、さらに渋滞レーンには行動ルールを設けた際の結果を示す。

バンバン制御のみの結果に比べ、新旧2つの結果では、走行時間が約半分程度まで短縮されていることが分かる。2つの知的走行制御手法を比べると、改良された新知的走行制御手法により、約1時間、走行時間を短縮する結果となった。これは、既提案知的走行制御

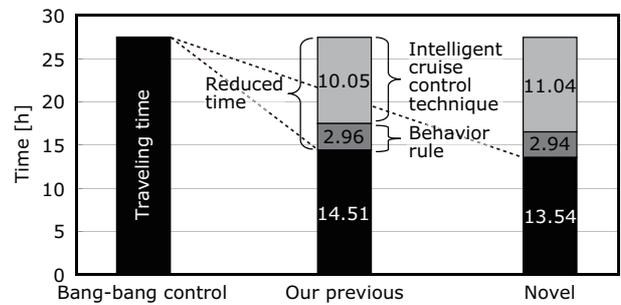


Fig.10 Comparison of Traveling Time

手法により生じる渋滞後方にて散在する停止ロボットの問題が、新知的走行制御手法によって解決され、ロボット群全体の移動速度も改善されたことを意味している。また、いずれの結果においても、知的走行制御手法に加え行動ルールを渋滞レーンに設けることにより約3時間、走行時間が短縮されたことが分かる。このことから、行動ルールの効果も確認することができる。

## 5. 結論

本稿では、ロボット群で混雑したシステムにて形成される渋滞を解決するための方法論を提案した。そして、従来研究にて提案した知的走行制御手法を改良し、停止ロボットが散在しないような新たな知的走行制御手法を構築した。さらに、レイアウトに起因する渋滞を解消するため、ボトルネックによる渋滞レーンに対して、そこでの走行速度を改善するための行動ルールを設計した。シミュレーション実験を行い、新知的走行制御手法と行動ルールによりロボット群の走行時間が短縮されることを確認し、渋滞に対する本方法論の有効性を示した。

## 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] S. Hoshino *et al.*, "Multi-Robot Coordination for Flexible Batch Manufacturing Systems Experiencing Bottlenecks," *IEEE Trans. on Automation Science and Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 887–901, 2010.
- [2] S. Hoshino *et al.*, "Behavior Control Methodology for Circulating Robots in Flexible Batch Manufacturing Systems Experiencing Bottlenecks," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5350–5356, 2009.
- [3] S. Hoshino *et al.*, "Autonomous Cruise Control of Circulating Multi-Robot for Congestion," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2101–2106, 2010.