

自動走行制御のための循環行動する自律移動ロボット群渋滞解析

星野智史 関宏也 (東京工業大学) 太田順 (東京大学)

Congestion Analysis of Circulating Robots for Autonomous Cruise Control

*Satoshi HOSHINO, Hiroya SEKI (Tokyo TECH), and Jun Ota (The Univ. of Tokyo)

Abstract— In this paper, congestion of circulating mobile robots is analyzed. For this purpose, robots behavior regarding velocity is investigated. Two systems with and without a bottleneck are the research objects. First off, a previous cruise control technique is applied to the robots. Through simulation experiments depending on two states, i.e., non-congestion and congestion, properties of robots behavior are presented. These are criteria for evaluating the effectiveness of autonomous cruise control techniques. After that, simulation experiments with a proposed cruise control technique are conducted. Finally, it is shown that the proposed cruise control technique effectively solves the congestion regardless of a bottleneck.

Key Words: Congestion Analysis, Autonomous Cruise Control, Multiple Mobile Robots

1. 序論

人が運転する自動車など、自らの行動決定を行うことができる移動体が群として一方向に移動するとき、例えば信号などのボトルネックが存在しなくとも、渋滞が発生する [1]。また、ロボットが材料搬送のため所定の作業場所を往來する場合、搬送されてきた材料が処理される作業場所がボトルネックとなる可能性があり、これによりロボット渋滞が発生することとなる。本稿では、特にこの渋滞の影響が、周回型の閉じたシステムにおいて顕著であることから、ここで循環行動を行う自律移動ロボット群に焦点をあてる。

西成らは、交通渋滞の形成プロセスを実験的に解析し、渋滞が発生する直前に車両群の走行挙動が変化することを示した [2]。しかしながら、ボトルネックのないサーキットのみが対象とされてきた。著者らは、ボトルネックの有無を考慮した上で、渋滞を解消するためのロボット群自動走行制御手法を提案してきた [3] [4]。しかしながら、渋滞の発生原因については解析されておらず、これでは渋滞そのものに対する制御手法の有効性を議論することができない。

そこで本研究では、循環行動する自律移動ロボット群の渋滞解析を行うため、速度、平均速度、標準偏差に注目する。そして、従来の走行制御手法をロボットに適用し、渋滞が発生している状態とそうでない状態におけるシミュレーション実験を行い、各状態でのロボット群の挙動特性を明らかにする。これらは、走行制御手法の渋滞に対する有効性を評価する指標となる。さらに、著者らが提案する走行制御手法を適用したシミュレーション実験を行い、ボトルネックの有無によらず、本手法の渋滞に対する有効性を示す。

2. 自動走行制御

2.1 従来走行制御手法

Fig.1 は、従来走行制御手法による制御モデルを示している。進行方向への制御対象領域ならびに相対位置に基づき、ロボットは、1) 最大減速 (緊急停止)、2) 減速、3) 最大加速 (あるいは一定速度)、の3つの制御モードのいずれかを選択しながら加速あるいは減速

し、自らの走行速度を制御することができる。

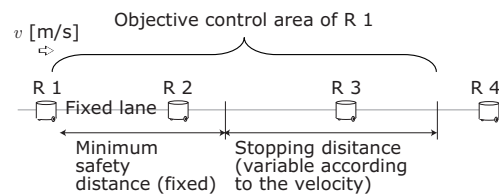


Fig.1 Control model based on the positional information

しかしながら、後方で走行中のロボットは、制御対象領域外側で停止中のロボットに対しては減速しないため、このロボットは、徐々に制御対象領域に含まれるようになり、後方ロボットは自らの制御モードを 3 → 2 → 1 と切替え、最終的に停止せざるを得なくなる。

2.2 提案走行制御手法

ロボット群渋滞を解消するためには、渋滞が発生した際、後方を走行中のロボットは、この渋滞に巻き込まれるのを避けるよう行動することが重要となる。そのため、Fig.2 が示すように、前方に停止ロボット (群) が存在した場合、当該ロボット間に仮想ダンパを挿入し、相対位置すなわちロボット間距離を保つよう、制動力を後方のロボットに相互作用させる。

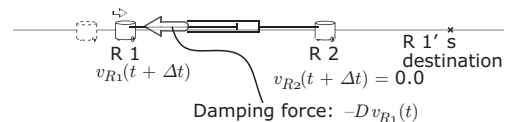


Fig.2 Proposed control model with a virtual damper

時刻 t に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 (1) となる。なお、 a は後方ロボット R の加速度のことである。

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

サンプリング時間 Δt は、計算機シミュレーションを行うための離散時間であるとする、式 (1) の右辺は、減

速後の速度が負の値とならないよう ($v_R(t+\Delta t) \geq 0$), D に関して式 (2) のように書き換えることができる.

$$D \leq \frac{1}{\Delta t} + \frac{a}{v_R(t)} \quad (2)$$

式 (2) において, サンプルング時間を $\Delta t = 1.0$, 右辺第二項に関しては $v_R(t) \gg a\Delta t$ であるとする, 粘性係数は, 速度に関係なく $D \leq 1.0$ とならなければならない. そこで, 走行速度と前方停止ロボットとのロボット間距離に応じた制動力が後方のロボットに作用するよう, ダンパの粘性係数を $D = 1.0 / \{\text{ロボット間距離}\}$ と決定する.

3. 循環行動する自律移動ロボット群

本研究では, Fig.3 が示す周回型レイアウトのシステムを対象とする. 本システムは, ボトルネックの有無により, サーキットと材料搬送プラント (MTP) の 2 つに分けられる. 材料搬送プラントには, 作業ステーションがボトルネックとして存在する.

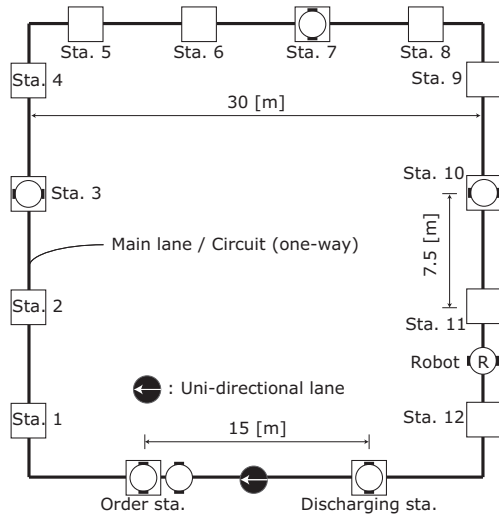


Fig.3 Two cyclic systems: circuit and material-transport plant (MTP)

ロボット群は, 各システム内を時計回り方向へ循環走行する. その際の走行性能は, 最高速度が 2.1 [m/s] , 最大加速度が走行速度に応じて, $0.05 \text{ [m/s}^2]$ ($\sim 0.7 \text{ [m/s]}$), $0.08 \text{ [m/s}^2]$ ($0.7 \sim 1.4 \text{ [m/s]}$), $0.12 \text{ [m/s}^2]$ ($1.4 \sim 2.1 \text{ [m/s]}$), 最大減速度が $0.2 \text{ [m/s}^2]$ とした. ロボットは, サーキットでは Fig.3 の各ステーションには停止せず, 材料搬送プラントでは指令ステーションから払出しステーションまで, 1 から 12 のうち, 所定のステーションに停止しながら循環搬送を行う.

4. 従来走行制御手法シミュレーション実験

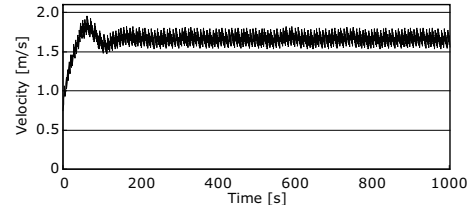
4.1 条件設定

従来走行制御手法を適用した際, サーキットに対しては, 10 台まで渋滞は発生せず, 13 台で渋滞が発生し, これにより循環走行に要する時間が大きく異なる結果となった. 材料搬送プラントに対しては, 6 台と 10 台投入したときで, 各ステーションにおけるロボットの渋滞量ならびに搬送時間に大きな違いがみられた.

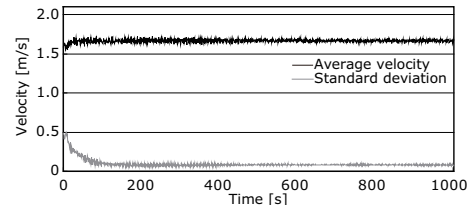
そこで, サーキットに対しては 10 台と 13 台, 材料搬送プラントに対しては 6 台と 10 台のロボットを投入したシミュレーション実験を行う. ロボット群はそれぞれが 200 周循環走行する. そして, 渋滞が発生している状態とそうでない状態のシステムにおいて, ロボット 1 台の速度, 全ロボットの平均速度, 各ロボットの速度の標準偏差について評価する.

4.2 サーキット

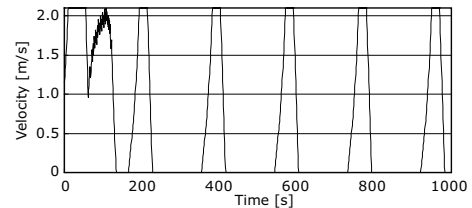
Fig.4 に, それぞれロボットを 10 台と 13 台投入し, シミュレーション開始後 1000 秒までの結果を示す.



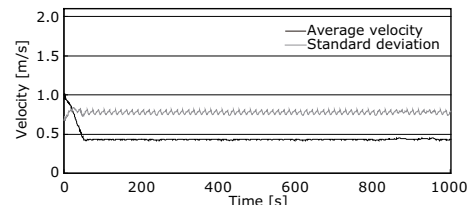
(a) Velocity of a robot (# of robots: 10)



(b) Average velocity and standard deviation



(c) Velocity of a robot (# of robots: 13)



(d) Average velocity and standard deviation

Fig.4 Simulation result of the circuit (previous)

Fig.4(a) より, ロボットの走行速度は, 時間の経過につれ, ある一定の速度付近に収束していることが分かる. 本シミュレーション実験では, 1.67 [m/s] に収束した. このとき, Fig.4(b) が示す全ロボットの平均走行速度と標準偏差は, 平均速度が Fig.4(a) の結果と同じ 1.67 [m/s] に収束し, かつ, 各ロボットでの速度のばらつきも小さいことが分かる.

一方渋滞が発生すると, Fig.4(c) より, ロボットの走行速度は 0 から最大速度の間で振動する結果となった. これは, 前方の渋滞による減速ならびに停止, 渋滞からの脱出による加速, その後, 新たな渋滞による減速ならびに停止, を繰り返した (stop-and-go 運動の) ためである. そのため, Fig.4(d) では, 平均速度はあ

る速度 (0.45 [m/s]) に収束するものの、標準偏差がこれを上回る結果となった。

4.3 材料搬送プラント

Fig.5 に、ロボットをそれぞれ 6 台と 10 台投入した際のシミュレーション開始後 2000 秒までの結果を示す。

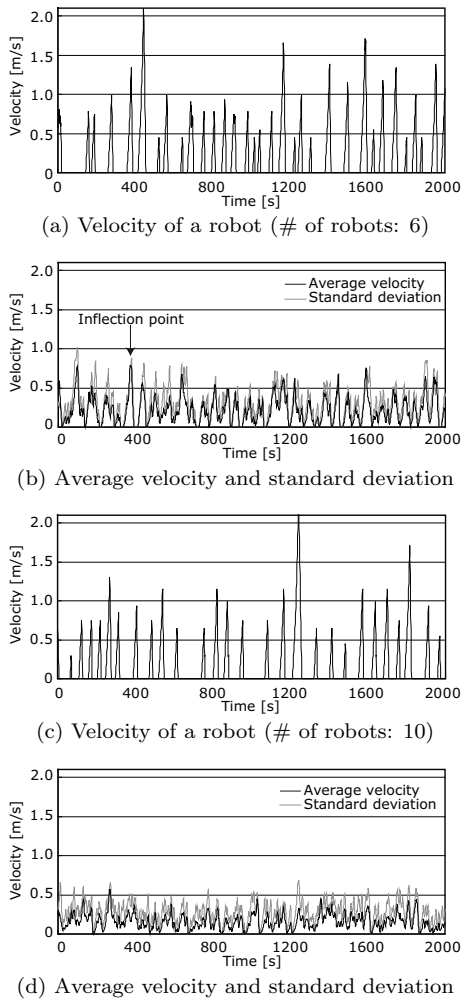


Fig.5 Simulation result of the MTP (previous)

Fig.5(a) より、ロボットは搬送目的地となるステーションに停止しなくてはならないため、走行速度が振動していることが分かる。ただし、stop-and-go 運動が一定の間隔で繰返されたわけではなく、ステーションでの停止と発進を繰返したことから、Fig.5(b) が示すように、平均速度と標準偏差が収束することはなかった。このとき、平均速度の変曲点のみ、標準偏差が平均速度を上回る結果となった。これは、ステーションで停止したロボットを先頭にした、ロボット群のクラスが複数形成され、これらが減速・停止と発進・加速を繰返したためである。

さらに、Fig.5(c) が示す渋滞が顕著となった状態のシステムでは、ロボットは、目的ステーション以外にも、そこで発生している渋滞により停止を余儀なくされるため、Fig.5(a) に比べ、停止、すなわち速度が 0 の時間が長くなる結果となった。このとき、Fig.5(b) の結果と比べ、Fig.5(d) では、2000 秒間の平均速度の平均値は低くなり (0.21 から 0.16 [m/s])、さらに、

平均速度の変曲点以外の多くの場合でも、標準偏差が平均速度を上回る結果となった。

5. ロボット群の挙動特性

4. 章のシミュレーション結果より、ロボット群の挙動に注目すると、渋滞の発生していない状態と発生している状態では、サーキットと材料搬送プラントにおいてそれぞれ以下の特性があることが分かった。

1 台のロボットの走行速度、全ロボットの平均速度、ならびに各ロボットの速度の標準偏差は、ボトルネックの有無によって異なり収束あるいは振動するものの、渋滞が発生していない状態では、ボトルネックに関係なく共通して平均速度が標準偏差を上回ることが分かった。これは、ボトルネックのないシステムでは、各ロボットが等間隔・等速で走行し、ボトルネックのあるシステムでは、停止ロボットより走行中のロボットの数が多かったためである。一方渋滞が発生すると、平均速度が標準偏差を下回ることとなった。これは、ボトルネックの有無によらず、極端に速度の遅いあるいは停止しているロボットの数が多く、かつ、渋滞から抜け出し非常に速く (最大速度で) 走行しているロボットが数台のみ存在したためである。

以上のことから、ロボット群が以下の挙動特性を示す限りにおいて、ボトルネックの有無にかかわらず、そこで適用されている走行制御手法が渋滞に対して有効であると評価することができる。

- ボトルネックのないシステム：ロボット群全体の平均速度が標準偏差より上回り、かつ、それぞれがある値へと収束
- ボトルネックのあるシステム：ロボット群全体の平均速度が変曲点以外では標準偏差と同等か、それ以上の値

6. 提案走行制御手法シミュレーション実験

6.1 サーキット

ロボットを 6 台投入したサーキットでは、渋滞が発生しなかったため、制動力は作用せず提案走行制御手法を適用しても Fig.4(a) や Fig.4(b) と全く同様の結果となった。そのため、Fig.6 には、ロボットを 13 台投入した際の走行結果のみを示す。なお、比較のため、Fig.4(c) と Fig.4(d) の結果も細線で示す。

Fig.6(a) より、ロボットは前方の停止ロボット (群) に対して減速行動を行っていることが分かる。その結果、ロボットは停止することなく走行し続け、従来走行制御手法では振動していた走行速度も、ある一定の速度付近に収束する結果となった。Fig.6(b) には、実験開始後 300 秒までのロボットの減速行動の詳細が示されている。従来手法では、ロボットが前方の渋滞に到達、停止したのに対し、提案手法では、150 秒付近に注目すると、制動力により減速し、その速度が 0 になっていない、すなわち停止しなかったことが分かる。そのため、前のロボットが加速した際、これに即座に対応することができている。また、加速の際にも、従来手法では速度が単調増加する傾向にあるのに対して、提案手法では、制御対象領域外にて発生する渋滞に対して、時折減速行動をとっていることが見て取れる。同様の減速行動が最高速度付近でも繰返され、これらにより、渋滞は解消されることとなった。さらに、Fig.6(c) は、

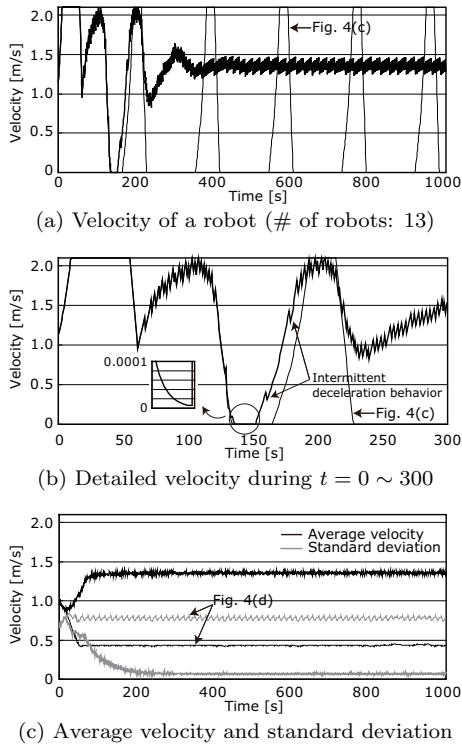


Fig.6 Simulation result of the circuit (proposed)

それぞれ Fig.4(d) の結果とは逆に、平均速度が標準偏差を上回り Fig.6(a) と同じ値に収束し、その際の各ロボットの速度のばらつきも小さくなった。

6.2 材料搬送プラント

ロボットを6台投入した場合、制動力は作用したが、Fig.5(a) と Fig.5(b) の結果と同様、走行速度は振動するものの最大速度に達することはなく、また、平均速度の変曲点以外では、おおむね平均速度が標準偏差を上回る結果となった。そこで Fig.7 には、ロボットを10台投入したシミュレーション実験の結果を示す。

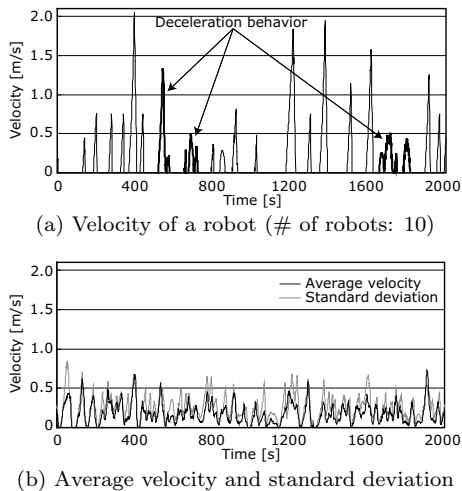


Fig.7 Simulation result of the MTP (proposed)

Fig.7(a) より、投入台数の増加に伴い各ステーションに停止中のロボットの台数が増え、目的ステーションに加えこれらのロボットにより、後方を走行中のロ

ボットは減速する頻度が多くなったことが分かる。ただし、太線の走行速度が示すように、停止ロボットに対しては制動力により減速するため、後方を走行中のロボットが停止する時間は、6台の結果と比べ大きな違いがなかったことに注意されたい。そのため、Fig.7(b) に注目すると、平均速度の変曲点以外では、平均速度が標準偏差を上回ることとなった。

6.3 渋滞に対する提案走行制御手法の有効性

サーキットでは、ロボットを13台投入したシステムにおいても、ロボットの走行速度は時間の経過とともに1.33 [m/s] に収束した。また、平均速度は標準偏差を上回り、かつ、1.33 [m/s] に収束した。これは、提案走行制御手法により、ロボットは減速行動をとるものの、結果としてこの行動が渋滞を解消し、各ロボットは等間隔かつ等速でスムーズに走行したことを示している。さらに、従来走行制御手法により渋滞が発生した際の全ロボットの平均速度が0.45 [m/s] であったことから、ボトルネックのないシステムで自然に発生する渋滞に対する提案手法の有効性を確認することができる。

一方、材料搬送プラントでは、6台と10台のロボットを投入したいずれのシステムにおいて、従来手法を適用した結果と比較すると、2000秒間での平均速度の平均値はそれぞれ0.21と0.23 [m/s]、0.16と0.18 [m/s] となり、提案走行制御手法を適用することにより、ロボット群の移動速度は増す結果となった。さらに、ステーションにて停止しているロボット、あるいは一時的に発生した渋滞に対してロボットが減速行動を行うことで、平均速度が標準偏差を上回る結果となった。このことから、システム内に渋滞が発生しなかった、あるいは、発生してもその後すぐに解消されたことが分かる。すなわち、提案走行制御は、ボトルネックの存在するシステムにおいても、渋滞に対して有効であることが示された。

7. 結論

本研究では、循環行動する自律移動ロボット群の渋滞解析を行った。ロボット群の挙動として、速度、平均速度、標準偏差に注目し、従来の走行制御手法を適用したシミュレーション実験、渋滞が発生している状態とそうでない状態におけるロボット群の挙動特性を明らかにした。さらにこれらを指標とし、著者らが提案する走行制御手法を適用したシミュレーション実験を行い、ボトルネックの有無によらず、本手法の渋滞に対する有効性を示した。

- [1] Y. Sugiyama *et al.*: "Traffic Jams without Bottlenecks — Experimental Evidence for the Physical Mechanism of the Formation of a Jam," *New Journal of Physics*, vol. 10, 033001, 2008.
- [2] A. Nakayama *et al.*: "Metastability in the Formation of an Experimental Traffic Jam," *New Journal of Physics*, vol. 11, 083025, 2009.
- [3] S. Hoshino *et al.*: "Behavior Control Methodology for Circulating Robots in Flexible Batch Manufacturing Systems Experiencing Bottlenecks," *IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots and Syst.*, pp. 5350–5356, 2009.
- [4] S. Hoshino *et al.*: "Autonomous Cruise Control of Circulating Multi-Robot for Congestion," *IEEE Int. Conf. Robotics and Automat.*, pp. 2101–2106, 2010.