

# 循環行動するロボット群の渋滞に効果的な走行制御手法の提案

星野智史 関宏也 仲勇治 (東京工業大学) 太田順 (東京大学)

## Effective Behavior Control Technique of Circulating Robots for the Congestion

\*Satoshi HOSHINO, Hiroya SEKI, Yuji NAKA (Tokyo Institute of Technology),  
and Jun Ota (The University of Tokyo)

**Abstract**— This paper describes a methodology regarding a behavior control technique of circulating robots which is effective for the congestion regardless of the presence of a bottleneck. For this purpose, we focus on an external interaction force between the robots. This force is generated with the use of a virtual damper; a damping force acts on a moving robot when its preceding robot is stopping or the congestion occurs in front of it. Through simulation experiments, we show that the proposed technique solves the congestion in a circuit without a bottleneck and eases the congestion in a manufacturing transportation system experiencing bottlenecks, and finally, improves the throughput and operation time.

**Key Words:** Multi-Robot, Coordination, Behavior Control, Damping Force, Congestion

### 1. 序論

自己駆動粒子群 (self-driven particles), すなわち, 自動車や自律移動ロボットなど, 自らの行動意思決定を行なうことができる移動体が, 群れとなり一方に循環する場合, 例えば, 信号のような妨げ (ボトルネック) がなくとも, 粒子群による凝集, すなわち, 移動体の渋滞が自然に発生する. そして, この渋滞は, 全体の流れと反対の方向へ拡大・遷移することが知られている. この現象は, すでに物理学の観点から定式化, そして証明されており [1] [2], さらに, サーキット場での自動車をを用いた自然渋滞形成の実験も行なわれている [3].

産業ロボットを用いた生産・搬送システムでは, 物品搬送ロボットがシステム内の作業ステーション間を移動する. したがって, 当該ステーションがボトルネックとなり, 搬送ロボットの渋滞 (待ち行列) が発生してしまう. 著者らの従来研究では, 上記のサーキットと類似した周回型の生産システムをシミュレーション環境で構築し, 自然渋滞の発生を確認してきた [4].

以上のことから, 自律した移動体 (ロボット) が循環行動するシステムでは, ボトルネックの有無に関らず以下の問題が解決されなくてはならない.

- より多くのロボットを投入しても, 渋滞が形成され, これにより, スループットや作業時間は改善されるどころか悪化することがある.

そこで本研究では, 渋滞に効果的な走行制御手法を提案する. そして, シミュレーション実験により, ボトルネックのないサーキットに適用して提案手法の有効性を検証し, さらに, 産業応用の観点から, ボトルネックの存在する周回型の生産・搬送システムへ適用し, その有効性について論じる.

### 2. 従来・関連研究

関連研究として, 衝突を回避しながら前方車両の速度に合わせ追従する, 自動走行のための運転システムが開発されている. Ioannou らは, 前方車両との安全車間距離を定義し, これを維持するための走行制御則

を提案している [5]. 国内では, 運転者が希望の速度を保つようアクセルの操作量を決定する自律分散モデルが提案されている [6]. しかしながら, 前方車両に対する一定の制御対象領域が設けられており, その外側にいる車両や, あるいは渋滞発生時における後方車両の走行制御・運転者モデルには, 言及がなされていない.

自動車の自然渋滞が発生する原因の一つに, 交通流の衝撃 (shock wave) があるとして, 前方車両の速度変化などの影響が, 後方に伝播するのを防ぐため, 車両群がクラスタ (数台による集団) を形成, クラスタ間で衝撃を吸収し, 渋滞を回避する手法が提案されている [7] [8]. しかしながら, クラスタを形成する最適な車両台数やクラスタの間隔などは考慮されておらず, 渋滞回避によるスループットの改善については議論がなされていない.

著者らは従来, ロボットの位置情報による走行制御を行ってきた. Fig.1 は, 従来手法におけるロボットの前方制御領域を示している. ロボットは, この制御領域に基づき, 自ら加減速の意思決定を行い, 速度を制御してきた. 最低安全車間距離は, ロボット同士の衝突を避けるため, 速度に関係なく一定の領域が設けられ, その外側に, 走行速度に応じた停止距離 (空走距離 + 制動距離) が設定されている. 停止距離の領域は, 速度  $v$ , 反応時間  $t$ , 最大減速度  $a$  とすると,  $vt + \frac{v^2}{2a}$  から決定される.

従来手法では, ロボットは他のロボットとの相対位置に基づき, 以下の3つの制御モードのいずれかを選択し, 行動する. 1) 最大減速 (緊急停止), 2) 減速,

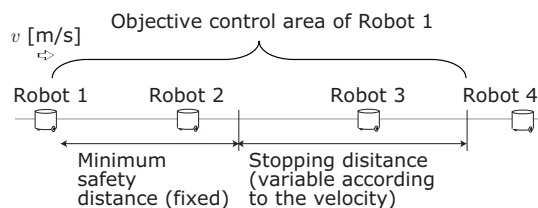


Fig.1 Forward Control Area of the Robot

3) 最大加速(あるいは一定速度). Fig.1において, 最後尾を走行するロボット1は, ロボット2に対しては制御モード1に, 制御対象領域(最低安全車間距離+停止距離)にいるロボット3に対しては, 最低安全車間距離をあけて停止できるように制御モード2で減速する. また, 制御対象領域の外側にいるロボット4に対しては, 制御モードを3に切替え, 最大加速度ならびに速度の範囲内で加速する.

したがって, 後方で走行中のロボットは, 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, 前方で停止中のロボットは徐々に後方ロボットの制御対象領域に含まれるようになり, その結果, 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. そして, この現象が後方のロボットに次々と伝播することで渋滞が発生する.

### 3. 循環行動するロボット群の走行制御手法

#### 3.1 概要

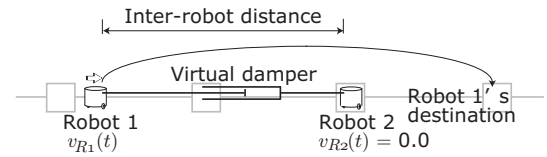
渋滞が発生しないよう, あるいは発生した渋滞を解消・緩和するよう行動するためには, 各ロボットが停止ロボットの後ろで自らも停止してしまわないよう, あるいは渋滞が発生した際には, それに巻き込まれないようにすることが重要となる. そこで本研究では, 制御モード3で走行中のロボットに対して, 相互作用外力を導入する.

外力を用いたロボットの動作制御手法として, 新井らは仮想インピーダンス法を提案している. 複数台のロボットは, 各自が計画した軌道上を, 障害物回避を行い他のロボットと協調しながら移動することに成功している [9]. 車両群の走行制御・隊列管理手法としても, 同様のインピーダンス法が提案されている [10] [11]. しかしながら, これらは, 渋滞に対してではなく, 衝突回避と目標追従を目的とした位置制御のための手法であり, 故に, 制御対象領域はロボットや車両の周辺に限られてきた.

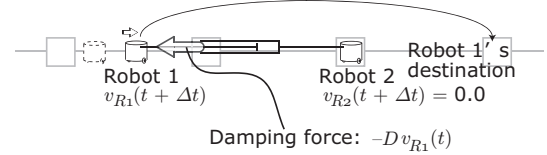
本研究では, 制御モード3で走行するロボットが, 制御対象領域外で停止中のロボットに対して, その時点での相対位置, すなわちロボット間距離を保つよう減速するための走行制御手法を提案する. そのため, 当該ロボット間に仮想ダンパを挿入し, 制動力を後方のロボットに作用させる. ただし, 前後2台のロボットが走行している限り, 仮想ダンパは挿入されない. なお, ロボットは固定された経路上を移動するため, 参照軌道はなく, また, 一方向(前進)にのみ移動することから, パネは使用しない.

#### 3.2 仮想ダンパによる相互作用外力

Fig.2は, ロボット1が相互作用外力を受けながら走行している様子を示している. なお, ここでは説明の都合上, 物品搬送ロボットが目的ステーション間を移動する場合を例にする. 時刻  $t$  で, ロボット2が制御対象領域の外にあるステーションにて停止している際, 後方のロボット1との間に仮想ダンパが挿入される (Fig.2(a)). その結果, 微小時間  $\Delta t$  後のロボット1の速度  $v_{R1}(t+\Delta t)$  は, 制動力と微小時間の積  $Dv_{R1}(t)\Delta t$  だけ減少する (Fig.2(b)). ここで,  $D$  は仮想ダンパの粘性係数,  $v_{R1}(t)$  はロボット1の時刻  $t$  での速度の



(a) Virtual damper between moving and stopping robots at a given time  $t$



(b) Damping force acting on the robot moving in the rear during a derivative time  $\Delta t$

Fig.2 External Interaction Force between the Robots

ことである.

制動力が相互作用外力としてロボットにはたらくと, 微小時間  $\Delta t$  後の走行速度は式 (1) となる. ここで,  $a$  はロボットの加速度のことである. なお, 本研究では微小時間を制御の最小サンプリング時間とする. 前方に停止しているロボットがない場合, 走行中のロボットには制動力は作用せず,  $Dv_R(t) = 0.0$  となることに注意されたい.

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

式 (1) の右辺は, 計算機シミュレーションの際の離散時間を考慮すると, 減速後の速度が負の値とならないよう (すなわち,  $v_R(t + \Delta t) \geq 0$  となるよう),  $D$  に関して式 (2) のように書き直すことができる.

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

ここで, サンプリング時間を  $\Delta t = 1.0$ , 速度は  $v_R(t) \gg a$  であるとする, 粘性係数は  $D \leq 1.0$  とならなければならない.

## 4. シミュレーション実験

### 4.1 対象システム

本シミュレーション実験で, 対象とするシステムを Fig.3 に示す. ボトルネックの存在しないサーキットでは, 各ロボットは作業ステーションに停止せず, 太線で示されたメインレーン上を周回走行する. そのため, 前方のロボットを追越すことはできない. 次に, ボトルネックが存在する生産・搬送システムの場合では, 物品搬送ロボットが, 製品を所定のステーションまで搬送しながらシステム内を循環する. このとき, メインレーンの他に, 中間および追い越しレーンも使用する. 各製品に対しては, 製造工程において複数のステーションを巡るよう, 一定の確率で搬送タスクが与えられる.

### 4.2 サーキットにおける周回走行

各ロボットは, メインレーン上をそれぞれ 200 周走行する. 最大速度は 2.1 [m/s], 最大加速度は, 速度に応じてそれぞれ 0.05 [m/s<sup>2</sup>] ( $\sim 0.7$  [m/s]), 0.08

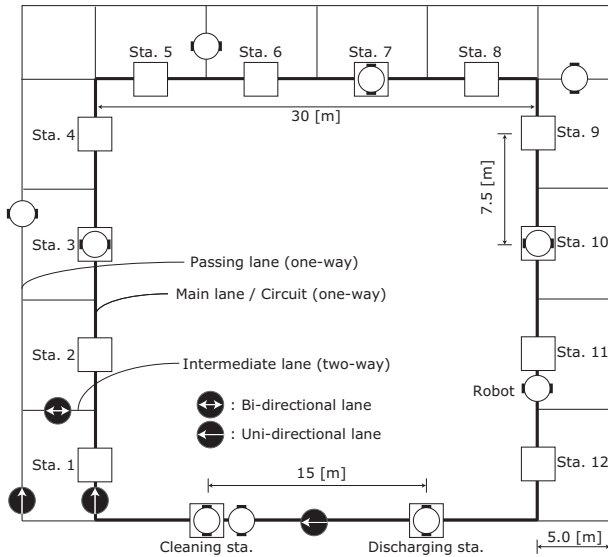


Fig.3 Circuit and Manufacturing Transportation System with a Cyclic Layout Structure

[m/s<sup>2</sup>] (0.7 ~ 1.4 [m/s]), 0.12 [m/s<sup>2</sup>] (1.4 ~ 2.1 [m/s])とした。また、最大減速度は0.2 [m/s<sup>2</sup>]とした。ロボットの投入台数はシミュレーション毎に1から20台、仮想ダンパの粘性係数は比較のため、 $D = 1.0$ ,  $D = 1.0 / \{\text{ロボット間距離}\}$ と2種類を使用する。

Fig.4に、シミュレーション結果を示す。これより、提案手法では、投入台数が12台を超えると、従来手法と比べて周回走行を早く終えたことが確認できる。これは、従来手法では、ロボット群の自然渋滞が台数の増加に伴い形成され、スループットが悪化してしまったためである。一方で、提案手法を適用することにより、各ロボットは停止中のロボットに対して制動力により減速し、渋滞にはならず、仮に台数増加に伴い瞬間的に渋滞が発生しても、解消される結果となった。

ロボットを20台投入した際の、シミュレーション実験開始後、1000秒までの各ロボットのサーキット上での位置の軌跡をFig.5に示す。従来手法によるロボットの走行制御を行なった結果、常に渋滞が発生し、これが一定の長さで走行と反対の方向へ0.2 [m/s]の速度で推移していることが分かる (Fig.5(a))。なお、この渋滞は、シミュレーションが終了するまで解消されること

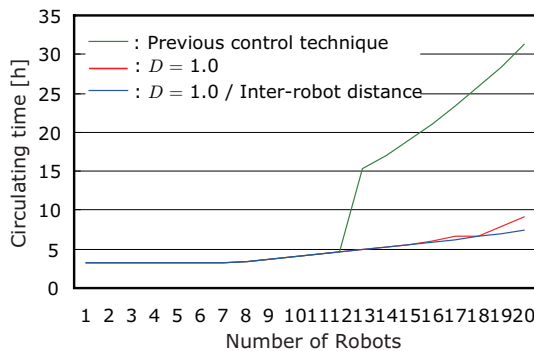
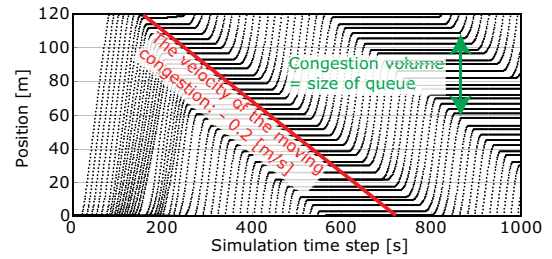
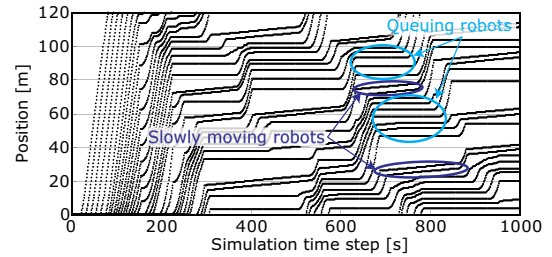


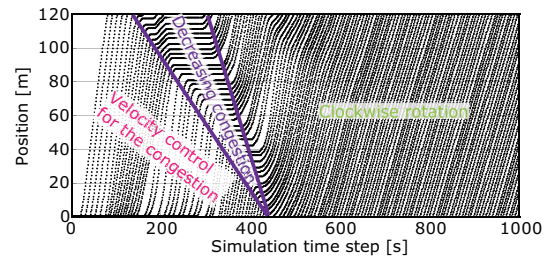
Fig.4 Simulation Result in a Circuit



(a) Moving congestion in the opposite direction



(b) Partially formed congestion



(c) Decreasing and eliminated congestion

Fig.5 Tracks of the Robots on the Circuit

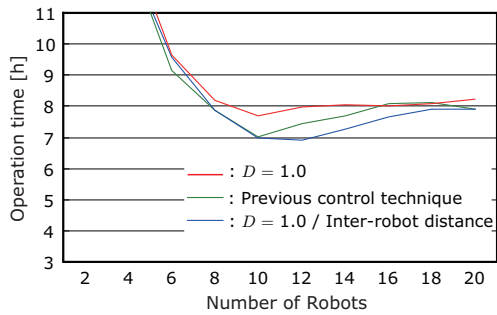
はなかった。提案手法で  $D = 1.0$  とした場合、渋滞は見られるものの部分的であり、この渋滞は徐々に減少していることが分かる (Fig.5(b))。なお、1000秒を超えたあたりで渋滞は完全に解消され、以降、渋滞が発生することはなかった。 $D = 1.0 / \{\text{ロボット間距離}\}$ とした場合では、一度形成された渋滞だが、瞬時(開始400秒後)に解消され、以後、ロボット群は等間隔で周回走行したことが分かる (Fig.5(c))。

以上、これらの結果より、ボトルネックのないサーキットにおける、ロボット群の周回走行に対する、提案手法の有効性が示された。

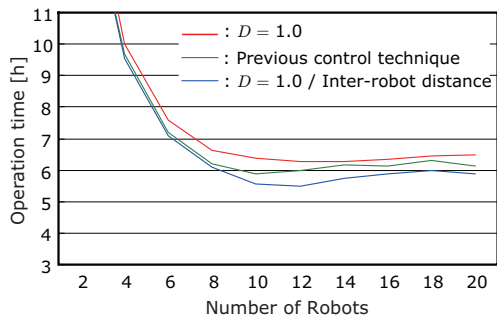
#### 4.3 生産・搬送システムにおける循環搬送

ロボットは、材料を所定のステーションへと搬送する。このとき、ボトルネックの程度の違いによる影響も考慮するため、Fig.3の1~12のステーションに対して、それぞれ0.3, 0.6, 0.9の確率で搬送タスクを割当てる。最終製品数を200とし、ロボットは1から20台まで、シミュレーション毎に2台ずつ増加させ投入した。搬送ロボットの走行速度および加減速度に関しては、4.2節と同様の設定にした。ステーションに到着したロボットは、一定時間停止する。

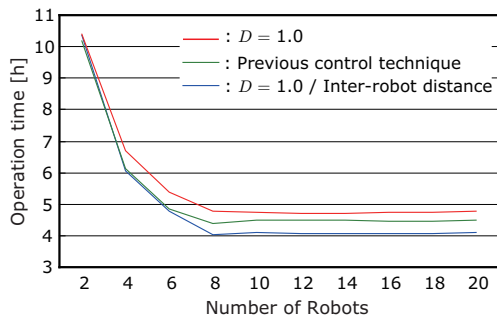
前節同様、3つの走行制御手法を適用した際の、全作業終了までに要した時間を Fig.6に示す。ボトルネックのないサーキットに対しては、粘性係数  $D$  に関係なく有効だった提案手法だが、ボトルネックの存在する



(a) A task is given with a probability 0.9 (heavy)



(b) A task is given with a probability 0.6 (medium)



(c) A task is given with a probability 0.3 (light)

Fig.6 Simulation Result in the Manufacturing Transportation System

本システムに対しては、投入台数の増加に伴い、粘性係数を  $D = 1.0$  とした提案手法が最も作業時間を要していることが分かる。一方で、粘性係数をロボット間距離により決定した提案手法の場合、従来手法に対して、投入台数の増加に伴い、ボトルネックの程度に関係なく、作業時間を短縮する結果となった。

この結果より、ロボット間距離により適切に粘性係数を調節、すなわち制動力を決定し、ロボットに作用させることで、作業ステーション付近で発生した渋滞（待ち行列）を緩和できることが示された。また、これにより作業時間も改善された。以上のことから、提案手法の産業応用に対する有効性も確認することができた。

#### 4.4 考察

提案走行制御手法では、粘性係数  $D$  を式 (2) の範囲で決定することにより、後方を走行中のロボットが前方の停止ロボットあるいは渋滞に対して、ロボット間距離を保つよう減速することができる。そのため、ボトルネックのないサーキットの場合、粘性係数に関ら

ず、このロボット間距離を維持するよう走行することで、停止ロボットあるいは渋滞に到達する前に、停止ロボットは走行を開始、渋滞は解消された。

一方、生産・搬送システムのように、ボトルネックが存在する場合、停止ロボットあるいは渋滞が、サーキットに比べ頻繁に発生することとなる。このとき、粘性係数を  $D = 1.0$  とした提案手法の場合、ロボット間距離に関係なく常に硬いダンバが使用されるため、停止ロボットあるいは渋滞後方のロボットは、強い制動力により減速を強いられることとなる。これに対して、粘性係数を  $D = 1.0 / \{\text{ロボット間距離}\}$  とした場合、遠く後方を走行するロボットに対しては小さく、これが近づくにつれ徐々に大きくなるよう制動力が作用し、ロボット間距離維持のための減速行動の影響が、後方の広範囲にわたり伝播するのを回避することができた。

以上のことから、4.2 節のサーキットに対しては有効だった、粘性係数  $D = 1.0$  とした提案手法が、4.3 節の生産・搬送システムに対しては最も非効率となり、 $D = 1.0 / \{\text{ロボット間距離}\}$  とした提案手法がいずれの場合に対して最も有効である結果となった。

## 5. 結論

本研究では、ロボットが循環行動するシステムに対して、ボトルネックの有無に関らず、渋滞に効果的な走行制御手法の提案を行なった。仮想ダンバを当該ロボット間へ挿入することにより、後方で走行中のロボットへ相互作用外力として制動力をはたらかせ、渋滞が解消あるいは緩和され、これにより、スループットや作業時間が改善されることを、シミュレーション実験を通じて示した。

- [1] B.S. Kerner *et al.*: "Cluster Effect in Initially Homogeneous Traffic Flow," *Physical Review E*, 48, 4, pp. 2335–2338, 1993.
- [2] M. Bando *et al.*: "Dynamical Model of Traffic Congestion and Numerical Simulation," *Physical Review E*, 51, 2, pp. 1035–1042, 1995.
- [3] Y. Sugiyama *et al.*: "Traffic Jams without Bottlenecks – Experimental Evidence for the Physical Mechanism of the Formation of a Jam," *New Journal of Physics*, 10, 033001, 2008.
- [4] S. Hoshino *et al.*: "Pipeless Batch Plant with Operating Robots for a Multiproduct Production System," *Distributed Autonomous Robotic Systems 8*, Springer, pp. 503–512, 2008.
- [5] P.A. Ioannou *et al.*: "Autonomous Intelligent Cruise Control," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 42, 4, pp. 657–672, 1993.
- [6] 松本卓也 他: "高速道路交通の自律分散型シミュレーション・モデルと意思決定," 第 17 回計測自動制御学会自律分散システム・シンポジウム, pp. 143–146, 2005.
- [7] 加藤晋 他: "ロンジチューズナル制御の交通流への影響に対する一考察," アドバンティ・シンポジウム 2002, 2002.
- [8] 横田浩貴 他: "車々間通信を用いた車両群のクラスター化による交通流制御," 第 17 回自律分散システム・シンポジウム, pp. 147–152, 2005.
- [9] T. Arai *et al.*: "Motion Planning of Multiple Mobile Robots Using Virtual Impedance," *Journal of Robotics and Mechatronics*, 8, 1, pp. 67–74, 1996.
- [10] S.-Y. Yi *et al.*: "Impedance Control for a Vehicle Platoon System," *Mechatronics*, 15, 5, pp. 627–638, 2005.
- [11] A. Gorjestani *et al.*: "Impedance Control for Truck Collision Avoidance," *American Control Conference*, pp. 1519–1524, 2000.