

Intelligent Cruise Control for Transport Robots in Flexible Manufacturing Systems

○正 星野智史（東京工業大学） 関 宏也（東京工業大学） 仲 勇治（東京工業大学）
正 太田 順（東京大学）

Satoshi HOSHINO, Hiroya SEKI, and Yuji NAKA, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, JAPAN

Jun OTA, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, JAPAN

Abstract— This paper describes a methodology regarding an intelligent cruise control of transport robots which is effective for solving congestion. For this purpose, we focus on an external interaction force between the robots. This force is generated with the use of a virtual damper. In this methodology, two control scenarios are presented: a damping force acts on a moving robot as the external interaction force, (I) only when its preceding robot(s) is/are stopping or being congested and (II) when a robot exists in front of the moving robot before a destination, in order not to become involved in the congestion. A circuit and a flexible manufacturing system (FMS) are objectives in the simulation experiments. From the experimental results, it is shown that the proposed control method successfully solves the congestion, and finally, improves the performance. In addition, the superiority concerning the two control scenarios, (I) and (II), is discussed.

Key Words: Intelligent cruise control, congestion, external interaction force, multi-robot industrial application

1. 緒 言

多種多様な製品需要に対応するため、産業用ロボットを導入したフレキシブル生産システムなどでは、搬送ロボットにより、材料が所定の作業ステーションまで運ばれ、そこで製造処理が施されている。そのため、作業ステーションがシステムのボトルネックとなり、ロボットの渋滞が発生してしまう可能性がある。

渋滞は、ボトルネックのないサーキットでも、自然に形成されることが実証されている [1]。さらに、本研究で対象とするロボット型のフレキシブル生産システムには、上述した作業ステーションが存在する。そのため、ロボット台数を増加させても、渋滞が形成されるかあるいはその量が増すばかりで生産量は改善されず、むしろ悪化してしまう場合がある。

そこで本研究では、フレキシブル生産システムにおける搬送ロボット群の、渋滞に効果的な知的走行制御手法を提案する。そのため、渋滞に巻き込まれないよう、(I) 前のロボット（群）が停止（渋滞）している場合のみ、(II) 目的地までの前方にロボットが存在する場合は常に、相互作用外力を走行中のロボットに作用させる 2 つのシナリオの下、それぞれの制御モデルを構築する。

シミュレーション実験を、ボトルネックの有無を考慮し、サーキットと生産システムに対して行なう。そして、改善された性能に基づき、提案制御手法の渋滞に対する有効性を示す。さらに、上記 2 つの制御シナリオに関して、それらの優位性についても論じる。

2. 従来・関連研究

交通流の衝撃波が渋滞の原因であるとして、例えば、Payne-Whitham 連続交通流モデルによる、車両クラスターの形成に関する研究が行なわれている [2] [3]。これ

らの研究では、車両群からなるクラスターを形成し、前方の速度変化の影響が、後方へ次々と伝播するのを予防することで、渋滞を解消することに焦点が当てられてきた。しかしながら、最適なクラスターサイズやその間隔などは考慮されておらず、そのため、渋滞を解消することによる性能（スループット）の改善については、議論がなされていない。

著者らはこれまで、目標追従と衝突回避のための一般的な制御手法として、Fig.1 が示す前方の制御対象領域を設け、これと他のロボットとの位置関係に基づくロボットの走行制御を行ってきた。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。

ロボットは、以下の 3 つの制御モードのいずれかを選択しながら走行する。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）。Fig.1 において、最後尾を走行するロボット (R 1) は、最低安全車間距離内にいるロボット (R 2) に対しては制御モード 1 に、停止距離にいるロボット (R 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

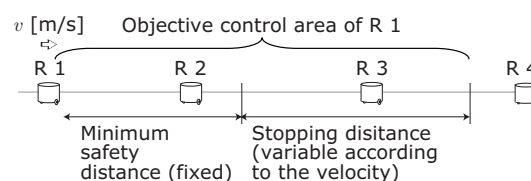


Fig.1 Forward Control Area of the Robot

ト (R 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 $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ 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. 提案走行制御手法

3.1 概要

渋滞を解決するためには、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走行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行動制御手法として、新井らは、仮想インピーダンス法を提案している [4]。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 [5] [6]。しかしながら、これらは、渋滞に対してではなく、目標追従と衝突回避を目的とした制御手法であり、故に、ロボットや車両の周辺を対象にした制御が行われてきた。

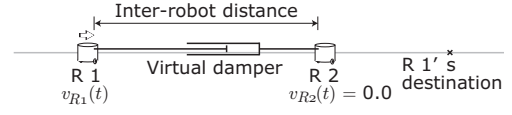
本研究では、制御モード 3 で走行するロボットが、制御対象領域外で停止中のロボットに対して、その時点での相対位置、すなわちロボット間距離を保つよう減速するための走行制御手法を提案する。そのため、当該ロボット間に仮想ダンパを挿入し、相互作用外力としての制動力を、走行中のロボットに作用させる。

3.2 仮想ダンパを用いた相互作用外力

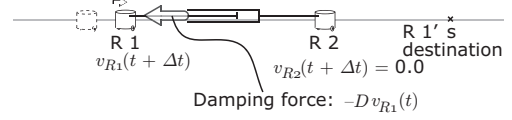
本稿では、後方を走行中のロボットが渋滞に巻き込まれないよう、(I) 前のロボット (群) が停止 (渋滞) している場合のみ、(II) 目的地までの前方にロボットが存在する場合は常に、制動力を相互作用外力として作用させる 2 つの制御シナリオ (I) と (II) を提案する。

Fig.2 は、制御シナリオ (I) により、相互作用外力を受けながらロボットが走行している様子示している。時刻 t で、R 2 が R 1 の進行方向における制御対象領域外側で停止している際、当該ロボット間に仮想ダンパが挿入される (**Fig.2(a)**)。その結果、微小時間 Δt 後の R 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 R 1 の時刻 t での速度のことである。

Fig.3 は、渋滞の有無に関係なく、制御シナリオ (II) により、相互作用外力を受けながらロボットが走行している様子を示している。時刻 t で、R 2 が R 1 の進行方向制御対象領域外側、かつ、目的地の手前に存在するとき、当該ロボット間に仮想ダンパが挿入される (**Fig.3(a)**)。そのため、微小時間 Δt 後の R 1 の速度は、 $D(v_{R1}(t) - v_{R2}(t))\Delta t$ だけ減少する (**Fig.3(b)**)。

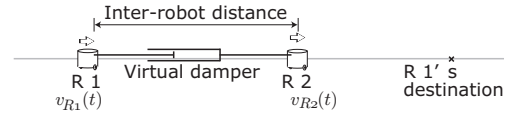


(a) Virtual damper inserted between moving and stopping robots at a given time t

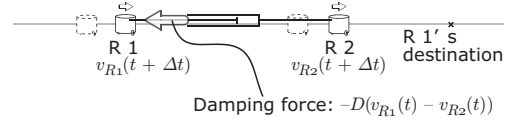


(b) Damping force acting on the following robot during a derivative time Δt

Fig.2 Proposed Control Scenario (I)



(a) Virtual damper inserted between two moving robots at a given time t



(b) Damping force acting on the robot moving in the rear during a derivative time Δt

Fig.3 Proposed Control Scenario (II)

ただし、R 2 の速度が R 1 より速い場合、仮想ダンパは挿入されず、R 1 は制御モード 3 で加速する。

制御シナリオ (I) と (II) により、ロボットに対して制動力を作用させると、微小時間 Δt 後の走行速度はそれぞれ、式 (1)、式 (2) となる。 a はロボット R の加速度、 R' は前のロボットのことである。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。

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

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

式 (1) と式 (2) の右辺は、それぞれ、計算機シミュレーションの際の離散時間 Δt 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 (3) と式 (4) のように書き換えることができる。

$$D \leq \frac{1}{\Delta t} + \frac{a}{v_R(t)} \quad (3)$$

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

式 (3) は、サンプリング時間を $\Delta t = 1.0$, $v_R(t) \gg a\Delta t$ 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。式 (4) では、相対速度の差が大きくなると、右辺の分母が $v_R(t) - v_{R'}(t) \approx v_R(t)$ と近似され、粘性係数は、 $D \leq 1.0$ とならなければならない。一方 2 台のロボットが同じ速度のとき、相対速度の差は小さくなり、粘性係数は正の実数値となる。本研究では、停止ロボットに対しては、制御シナリオ (I) も (II) でも、粘性係数 D をロボット間距離に応じて決定し、走行中のロボットに対しては、制御シナリオ (II) にて、予め決まった値 D を与えるものとする。

4. シミュレーション実験

4.1 条件設定

4.1.1 レイアウト

ボトルネックの有無を考慮した、サーキットと生産システムのシミュレーション実験を行なう。本実験では、渋滞による性能の低下が最も著しいとされる、Fig.4 が示す周回型のレイアウト構造を有したシステムを対象とする。本システムは、単方向のメインと追越しレーン、双方向の中間レーン、メインレーン上に配置された 1 ~ 12 のステーションならびに、製品の払出し、初期ステーションから構成されている。

4.1.2 周回走行と循環搬送

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 200 周走行する（右回り）。そのため、前方のロボットを追越すことはできない。次に、搬送ロボットは製品を、初期ステーションから、バッチの指令ステーション（1 ~ 12）へ搬送しながら、払出しステーションまで右回りに循環する。このとき、他のロボットの状況に応じて、文献 [7] の巡回経路計画手

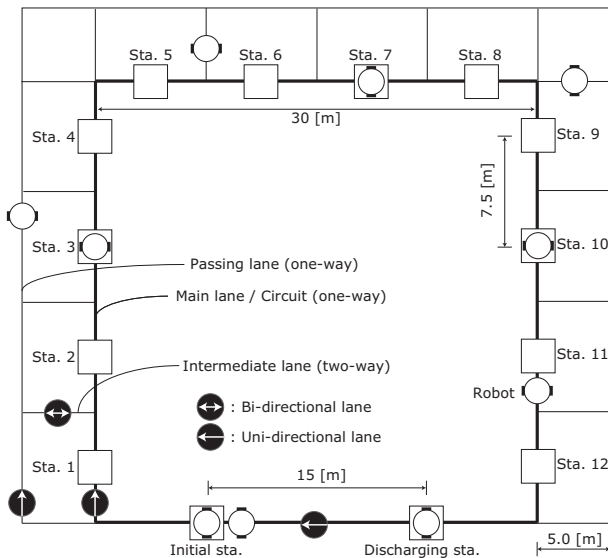


Fig.4 Circuit and FMS with a Cyclic Layout Structure

法に基づき、メイン、中間、追越しレーンを選択する。12 のステーションに対しては、搬送タスクが 0.3 の確率で与えられる。製品数は 200 とした。

4.1.3 粘性係数

前方で停止中のロボットに対しては、制御シナリオ (I) と (II), いずれにおいても、当該ロボットの距離に応じて、制動力が走行中のロボットに作用するよう、粘性係数を $D = 1.0 / \{\text{ロボット間距離}\}$ とした。また、制御シナリオ (II) では、前方のロボットから常に制動力が作用するため、その際の粘性係数は $D = 1.0$ とし、距離に関係なく、微弱な外力が一定に働くものとした。

4.2 シミュレーション結果

2. 節で述べた 3 つの制御モードによる従来制御手法に対して、(I) と (II) の 2 つのシナリオに基づいた提案制御手法の有効性を評価する。

Fig.5 に、サーキット上での周回走行シミュレーションの結果を示す。ロボットが 12 台以上になると、提案制御手法を適用することで、従来手法より周回走行を早く終える結果となった。これは、従来手法では、ロボット台数の増加にともない、自然渋滞が形成されたのに対し、提案制御手法では、いずれのシナリオとも、この自然渋滞を解消することができたためである。ここで、制御シナリオ (I) と (II) を比較すると、周回時間に若干の違いが見られる。これは、シナリオ (II) を適用することにより、相転移 (Phase transition) 以降の高密度なシステムでは、より頻繁に前方のロボットから制動力が作用したためである。

Fig.6 に、生産システムシミュレーションの結果を示す。ロボットの投入台数が増加し 4 台以上になると、従来手法と比べ、提案制御シナリオ (I) と (II) により、作業時間が短縮される結果となった。また、シナリオ (I) を適用することで、最も効率的なシステムとなった。本結果においても、サーキットの結果と同様、高密度になると、シナリオ (I) が (II) に比べ、渋滞に対して効果的であることが分かった。

以上の結果から、2 つのシナリオに基づいた提案制御手法の有効性を示すことができた。特にロボット台数の増加にともない、シナリオ (I) を適用することの優位性が示された。

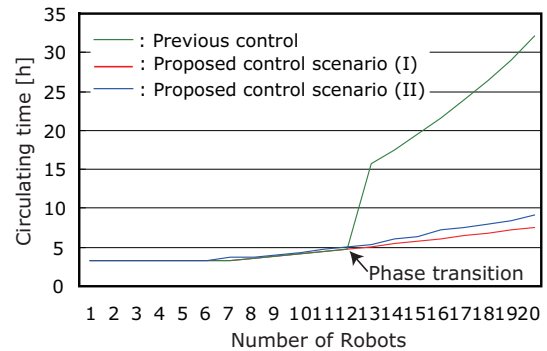


Fig.5 Simulation Result in the Circuit

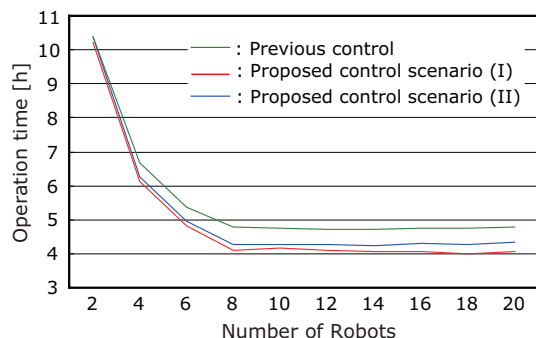


Fig.6 Simulation Result in the FMS

4.3 ロボット群の走行速度に基づく結果の考察

4.2 節の結果について、提案制御手法のシナリオ (II) が、(I) に比べ非効率となったことの考察を行なう。そのため、システム内におけるロボット群の挙動として、平均速度に注目した。

Fig. 7 は、サーキットシミュレーションの際のロボット群の平均速度を示している。ロボット台数が 6 ~ 12 では、制動力により、シナリオ (II) による平均速度が最も低いことが分かる。それ以降も、シナリオ (I) に比べて平均速度が低く、これが原因となり、Fig.5 が示す周回時間も、長くなる結果となった。

Fig. 8 は、生産システム内でのロボット群の平均速度を示している。この結果から、ロボットは制動力による減速以外に、目的地で停止するために減速しなくてはならず、そのため、Fig. 7 に比べ、各制御手法による平均速度が低かったことが分かる。ただし、制御シナリオ (I) により減速走行することで、渋滞は緩和され、平均速度が最も高くなる結果となった。このとき、制御シナリオ (II) による平均速度は、(I) だけでなく、場合によっては、従来制御手法と比べても低い場合があることが分かる。これは、Fig. 7 の結果も含め、従来手法では、渋滞によりロボットが減速／停止するのに対して、(II) では、さらに、前方を走行中のロボットに対しても減速するためである。

以上のことから、ボトルネックの有無にかかわらず、提案制御手法において、シナリオ (II) による相互作用外力は、渋滞が発生していないシステムでは逆効果であり、渋滞が発生した後も、シナリオ (I) による提案制御手法に比べて、平均速度も低く、その結果、周回時

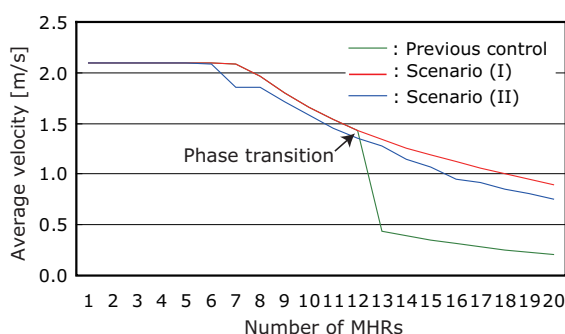


Fig.7 Average Velocity of the Robots in the Circuit

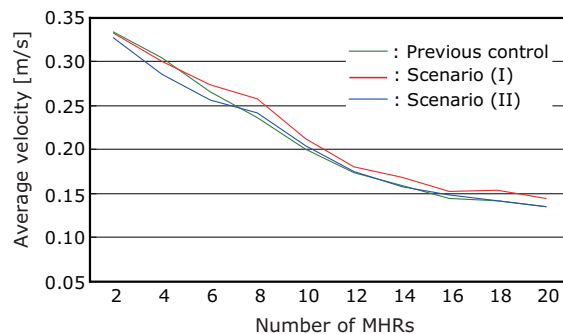


Fig.8 Average Velocity of the Robots in the FMS

間も作業時間も余分にかかる結果となった。

5. 結 論

本稿では、フレキシブル生産システムにおける搬送ロボット群の、渋滞に効果的な知的走行制御に関する方法論について述べた。そして、2つのシナリオに基づいた制御手法を提案した。シミュレーション実験を通じて、システムに対する提案手法の有効性を検討し、ボトルネックの存在しないサーキットならびに、ボトルネックの存在する生産システムに対する提案制御手法の有効性を確認した。このとき、制御シナリオ (I) と (II) では、前方停止あるいは渋滞ロボット（群）に対してのみ、後方を走行中のロボットが制動力を受けながら走行する (I) の制御手法が最も渋滞の解消・緩和、そして、性能の向上に効果的であることが分かった。

参考文献

- [1] Y. Sugiyama *et al.*, Traffic Jams without Bottle-necks – Experimental Evidence for the Physical Mechanism of the Formation of a Jam, *New Journal of Physics*, vol. 10, 033001, 2008.
- [2] R. Jiang *et al.*, A New Continuum Model for Traffic Flow and Numerical Tests, *Transportation Research Part B*, vol. 36, no. 5, pp. 405–419, 2002.
- [3] W. L. Jin *et al.*, The Formation and Structure of Vehicle Clusters in the Payne-Whitham Traffic Flow Model, *Transportation Research Part B*, vol. 37, no. 3, pp. 207–223, 2003.
- [4] T. Arai *et al.*, Motion Planning of Multiple Mobile Robots Using Virtual Impedance, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 8, no. 1, pp. 67–74, 1996.
- [5] S.-Y. Yi *et al.*, Impedance Control for a Vehicle Platoon System, *Mechatronics*, vol. 15, no. 5, pp. 627–638, 2005.
- [6] A. Gorjestani *et al.*, Impedance Control for Truck Collision Avoidance, in *American Control Conference*, pp. 1519–1524, 2000.
- [7] 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.