移動ロボット群により形成される渋滞解決のための一方法論

—移動ロボット群に対する知的走行制御手法と行動ルールの提案—

星 野 智 史^{*1} 関 宏 也^{*1} 太 田 順^{*2}

Methodology for Solving Congestion Formed by Multiple Mobile Robots

—Development of Intelligent Cruise Control Technique and Behavior Rule—

Satoshi Hoshino^{*1}, Hiroya Seki^{*1} and Jun Ota^{*2}

In order for multiple mobile robots to solve congestion, a novel methodology that consists of two approaches, intelligent cruise control technique and behavior rule, is proposed in this paper. For this purpose, first, our previously-proposed cruise control technique is improved. This enables robots to reduce velocity not only for the congestion preceding them, but also for the decelerating robot in front, using external interaction force generated among robots with a virtual damper. After that, a behavior rule in connection with the intelligent cruise control technique is designed and provided on congested lanes where robots slowly move. Thus, stronger interaction force affects the robots, and they move more slowly on the congested lanes. In simulation experiments, the proposed methodology is compared to two other cruise control techniques. These are quantitatively evaluated on the basis of a criterion, i.e., behavioral feature, such as average velocity of all the robots and standard deviation of each velocity. Finally, the effectiveness of the methodology for solving the congestion is shown.

Key Words: Multiple Mobile Robots, Congestion, Intelligent Cruise Control, Behavior Rule, Intelligent Transport System

1. は じ め に

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、システムに対する移動体の数、すなわち占有密度が増すにつれ、移動体による渋滞が形成される。またこの渋滞は、群れの移動とは逆方向に拡大あるいは遷移する。この物理現象は、すでに数学的に定式化および証明されている [1] [2]。西成らは、周回コース上で自動車の走行実験を行い、ボトルネックがなくとも渋滞が自然に形成され、これが拡大・遷移することを示している [3]。また、渋滞が形成されるプロセスを、自動車の挙動変化に着目して解析している [4]。一方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、ロボットの台数や密度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に発生する [5]。そしてこの渋滞は、ボトルネック

を先頭に、ロボット群の移動とは逆の方向へ拡大することとなる。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。

一般的に、ある容量の空間や場所に対して、その容量を上回る流入があった際、流れに停滞が生じ、これが渋滞となる。本研究では、システム内におけるロボットの台数が増え、あるロボットが低速走行から停止した際、それに伴い後ろのロボットが停止し、2 台以上のロボットが常にどこかで停止している状態のことを渋滞と定義する。また、数十台以上からなる自らの行動の意思決定が可能な自律移動ロボット群が自動車の道路交通同様、1 本のレーン（車線）上を同一方向に移動するシステムを対象とする。すなわち、歩行者のように同一レーン（歩道）上を双方向に入り乱れながら往來することはできない。また、後ろのロボットは前のロボットを追い越すこともできない。このとき、各ロボットが自由に動いていては渋滞の形成は不可避となる。渋滞は、効率性だけでなく、エネルギーや環境問題の観点からも重要な課題である。そのため、群ロボットシステムや自動車の知的交通システム（ITS: Intelligent Transport System）の実現に向けては、移動ロボット群でも自動車群でも、それら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。

筆者らはこれまでに、ボトルネックの有無に関係なく渋滞に

原稿受付 2010 年 12 月 9 日

^{*1}東京工業大学

^{*2}東京大学

^{*1}Tokyo Institute of Technology

^{*2}The University of Tokyo

■ 本論文は有用性で評価されました。

効果的なロボット群の知的走行制御手法を提案してきた [6]。その結果、前のロボット（群）が停止（渋滞）していた場合、当該ロボット間へ仮想ダンパを挿入する制御シナリオに基づき、後ろを走行中のロボットは停止あるいは渋滞ロボット（群）から相互作用外力として制動力を受けながら減速し、渋滞に巻き込まれるのを避けることが可能となった。しかしながら、この知的走行制御手法にはそのシナリオに問題があり、走行制御を行うことによってロボットが停止してしまう恐れがある。さらに、ボトルネックのあるシステムに対しては、渋滞量が減少し、その影響は緩和されるものの、台数と密度によっては渋滞の完全な解決は困難である。

渋滞に対しては、移動体への直接的な行動制御だけでなく、道路標識のような個々の行動を制限するためのルールを環境に設けることで、群れ全体の動きを管理する方法も有効であると考えられる。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、以下の二つのアプローチからなる方法論を提案する。

- (1) すでに筆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う。ここでは、渋滞が発生する因子として、レーンが交差・合流するボトルネックを有したレイアウトのシステムを対象とする。そして、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、最も一般的な走行制御手法、筆者らが従来研究にて提案した知的走行制御手法と比較する。そのため本研究では、全ロボットの平均速度と各ロボットの速度の標準偏差をロボット群の挙動特性として着目し、渋滞の解析を行う。そして、この解析結果を指標とし、三つの走行制御手法をロボット群へ適用し、さらに行動ルールを渋滞箇所に関することの効果量を定量的に評価する。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。

本論文の構成は次のとおりである。第2章では、ロボットや自動車を群れで、かつ、自動で走行させるための関連研究、ならびに一般走行制御手法について述べる。第3章では、筆者らが従来研究にて提案したロボット群に対する知的走行制御手法について説明する。第4章では本研究で提案する方法論のうち、一つめのアプローチである新知的走行制御手法を、第5章では二つめのアプローチである行動ルールについて述べる。第6章ではシミュレーション実験を行い、本方法論の渋滞に対する有効性について議論する。第7章で本論文をまとめ、今後の課題や展望について述べる。

2. 追従と衝突回避のための一般走行制御手法

相互作用外力を用いたロボット群制御を目的に、新井らは仮想インピーダンス法を提案している [7] [8]。同様に、自動車群の隊列形成のための車間距離制御に関する研究もなされてい

Fig. 1 Moving robot with general cruise control technique on the basis of positional information

る [9] [10]。しかしながら、これら従来のロボットや自動車を対象とした走行制御に関する研究では、前方の対象への追従と、これとの衝突回避が目的とされてきた。そのため、ロボットや自動車の周辺のみが制御の対象となり、群れとして移動する際に発生する渋滞は考慮されてこなかった。また、渋滞を考慮した自動車群隊列制御に関する研究もあるが [11] [12]、ボトルネックの存在するシステムは対象とされておらず、さらに、渋滞が発生しないようシステムを安定状態に維持するためには、常に外力をロボットに作用させる必要があり、走行速度が低下してしまう問題がある。

一方、渋滞は考慮されていないものの、最も一般的な走行制御手法として、群れではなく各自動車が車間距離に基づいて自動走行するための研究も多くなされている。文献 [13] では、自動車が安全な車間距離を保ちながら前の車の速度に合わせて走行することを目的とし、その結果、前後2台の自動車は、後ろの車が前の車を追従しながら衝突を回避することに成功している。Fig. 1 に、この代表的な例として、安全車間距離（前方の制御対象領域）に基づいた一般走行制御手法をロボットに適用し、ロボットが位置情報により走行している様子を示す。

制御対象領域は、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最低安全ロボット間距離と、さらにその外側の走行速度に応じた停止距離（空走距離+制動距離）から構成されている。停止距離は、速度 v 、反応時間（制御のためのサンプリング時間） t 、最大減速度 a とすると、 $vt + v^2/2a$ から決定される。この制御対象領域と前のロボットの位置情報に基づき、ロボットは、1) 停止（最大減速・緊急停止）、2) 減速、3) 最大加速（あるいは一定速度）、の三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 において、後方を走行するロボット（R1）は、前のロボットが制御対象領域内の最低安全ロボット間距離以内に存在した場合（R2）、制御モード1で停止する。前のロボットが制御対象領域の停止距離以内にいた場合（R3）、最低安全ロボット間距離をあけて停止できるよう制御モード2で減速する。また、前のロボットが制御対象領域の外側にいた場合（R4）、制御モードを3に切り替え、最大加速度あるいは最大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減速することができない。そのため、前方の制御対象領域外側にいるロボットが停止していた場合、このロボットは徐々に後ろで走行中の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、走行ロボットも自らの制御モー

ドを $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ と切り替え、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. 既提案知的走行制御手法

3.1 制御シナリオ

筆者らはこれまでに、目標追従と衝突回避に加え、渋滞も考慮した知的走行制御手法を提案してきた [6]。ロボット群の渋滞を解決するためには、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 [14] [15]。ただし、第 1 章で述べた理由から、ロボットは渋滞を迂回することはできない。そこで、前方にロボット群の渋滞が発生、あるいは、停止しているロボットが 1 台でも存在した際、制御モード 3 で走行するロボットは、一時的にこの制御対象領域をなくすことで、制御対象領域外で停止中のロボットに対しても、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行動を行う制御シナリオを構築した。この制御シナリオでは、停止と走行している前後 2 台のロボット間に仮想ダンパが挿入され、制動力が後方のロボットへ作用することとなる。なお、前のロボットが制御対象領域以内に存在した場合、ロボットは一般走行制御手法における制御モード 1 と 2 に基づき走行する。

Fig. 2 は、既提案知的走行制御手法をロボット群へ適用し、後ろのロボット (R 1) がこの制御シナリオに基づき制動力を受けながら制御モード 3 で左から右へと走行している様子を示している。

時刻 t で、仮にあるロボット (R 2) が、走行中のロボット (R 1) の前方かつ制御対象領域外側で停止している場合でも、当該ロボット間に仮想ダンパが挿入される (Fig. 2 (a) 参照)。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) 参照)。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 での走行速度のことである。

3.2 制御モデル

ロボットに対して制動力が作用すると、微小時間 Δt 後の走行速度は、式 (1) から求めることができる。ここで、 a は後ろを走行中のロボット R の加速度のことである。なお本研究で

Fig. 2 Control scenario of our previous intelligent cruise control technique with virtual damper

は、微小時間 Δt をロボットの走行制御を行うための最小サンプリング時間とする。

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

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 (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、サンプリング時間を $\Delta t = 1.0$ 、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。したがって、ロボットはこの粘性係数 D を定められた範囲で決定しながら減速行動を行う。本稿では、後ろのロボットが前方停止ロボットに対して、粘性係数 D をロボット間距離に応じて決定する ($D = 1.0 / \{\text{ロボット間距離}\}$) こととした。すなわち、停止ロボットに対して、その後ろを走行するロボットとの間に挿入されたダンパは、ロボット間距離と後ろのロボットの走行速度に応じて軟らかくあるいは硬くなる。

4. 新知的走行制御手法

4.1 従来制御シナリオの問題点

Fig. 3 に、3.1 節で述べた既提案知的走行制御手法における制御シナリオの問題点を図示する。ここでは、ロボット群が左から右へ走行しており、その先頭で 1 台のロボットが停止している場合を例にする。なお、各ロボットの間隔は、最初の時点で制御対象領域以上あるものとする。

Fig. 3 (a) が示すように、従来の制御シナリオでは、制動力は停止ロボットの後ろのロボットのものにしか作用しない。そのため、後方を制御モード 3 で走行中のロボット群 R 1, R 3, R 4 に関しては、R 1 は制動力により減速行動をとることができるが、さらに後方の 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、進行方向に停止ロボットがいるにもかかわらず、一定の速度で走行あるいは加速することとなる。その結果、R 3 が R 1 より速く走行していた場合、Fig. 3 (b) が示すように、R 3 は前方で減速走行中の R 1 が自らの制御対象領域内に入ったことにより、制御モードを $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ と切り替え停止しなくてはならない。その一方で、停止し

Fig. 3 Problem of our previous cruise control scenario

Fig. 4 Damping force exerted against all the robots behind stopped robot

た R 3 によりその後ろの R 4 には制動力が作用し、これにより R 4 は減速行動をとることとなる。

この現象が後方に伝播しても、停止ロボット直後のロボットに対しては制動力が作用するため、渋滞が拡大することはない。しかしながら、後方には停止ロボットが散在することとなり、その結果、ロボット群全体の移動速度と時間が悪化してしまう恐れがある。

4.2 改良制御シナリオ

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、その後方すべ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。なお、制御対象領域については、停止ロボットの後方を制御モード 3 で走行する全ロボットはこれをなくし、自分の前のロボットが走行していたとしても、前後のロボット間に仮想ダンパが挿入される。

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、前と後ろ 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。筆者らは従来研究にて、類似した制御シナリオを提案している [16]。ただし、ここでも前後 2 台のロボット間のみでの制御に焦点が当てられており、本研究で改良された制御シナリオとは異なることに注意されたい。

Fig. 5 は、新知的走行制御手法をロボット群へ適用し、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 2 台の走行ロボット (R 1 と R 2) に対して、それぞれ仮想ダンパが挿入され、制動力が作用している様子を示している。

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 (Fig. 5 (a) 参照)。このとき、各ロボットの速度関係は、 $v_{R3} \leq v_{R2} \leq v_{R1}$ であるとする。その結果、微小時間 Δt だけ制動力を受けながらロボットが走行すると、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 (Fig. 5 (b) 参照)。なお、 $v_{R1}(t)$ 、 $v_{R2}(t)$ 、 $v_{R3}(t)$ は、時刻 t での R 1、R 2、R 3 の走行速度のことである。ここで、R 3 は停止しているため、 $v_{R3}(t) = 0$ となり、R 2 の速度は制動力により $Dv_{R2}(t)\Delta t$

(a) Inserted virtual dampers between both stopped and following robots at a given time t

(b) Damping force exerted against all the robots behind stopped robot during derivative time Δt

Fig. 5 Improved cruise control scenario

だけ減速することとなる。すなわち、本制御シナリオは、前のロボットが停止している場合には 3.1 節で述べた従来制御シナリオと同じになる。

4.3 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、微小時間 Δt 後のロボットの走行速度は、式 (3) 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。

$$v_R(t + \Delta t) = v_R(t) + a\Delta t - D(v_R(t) - v_{R'}(t))\Delta t \quad (3)$$

3.2 節と同様に、制御のためのサンプリングタイムを離散時間 Δt とすると、式 (3) の右辺は、後ろを走行中のロボットの減速後の速度が負の値とならないよう、粘性係数 D に関して式 (4) のように書き換えることができる。

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

式 (4) では、前後のロボット間の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、式 (2) と等価になることから、粘性係数は、 $D \leq 1.0$ とならなければならない。すなわち、式 (4) は、前のロボットが停止しており、 $v_{R'}(t) = 0$ となる場合、式 (2) で表される従来制御モデルを包含することとなる。一方、2 台のロボットが同等の速度で走行し相対速度の差が小さくなると、粘性係数は正の実数値をとる。以上のことから本稿では、仮想ダンパの粘性係数を $D = 1.0 / \{\text{ロボット間距離}\}$ として与え、本制御モデルに基づき、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。

5. 行動ルール

5.1 レイアウトに起因する渋滞

第 1 章で述べたように、自律行動する移動体は、その数によっ

Fig. 6 Example of congestion of robots due to bottlenecks

てボトルネックがなくとも自然渋滞を形成する。また、交差や合流、あるいは信号などの流れを遮るボトルネックがあれば、台数が増えロボットの密度が高まるにつれ、余計渋滞は発生しやすくなる。後者、レイアウトに依存して発生する渋滞を解決するための手段として、インフラの拡張設計がある。これは、群れの移動に対してその障害となっているボトルネック部分を、物理的に削除したり小さくしたりする設計のことである。道路交通を例にすると、道路の車線数を増やしたり迂回路を作ったりするなどといったことが挙げられる。しかしながら、空間制約のあるシステムでは、この手段を講じることはできない。

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。なお本システムでは、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たりするインフラの拡張設計は行えないものとする。

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に渋滞が発生し、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。なお、この灰色部分はロボット群の台数によって短くあるいは長くなる。

5.2 関連研究

ボトルネックにより形成される渋滞に対して、これを回避 (迂回) しながら行動するための制御手法が提案されている。これにより、AGV (Automated Guided Vehicle) や自律移動体の群れが集中制御 [17] と分散制御 [18] に基づき、渋滞領域を避け占有密度が低い領域へと向かいながら、停滞することなく行動することが可能となった。しかしながら、ロボットの台数がさらに増え、これらが同様の回避行動をとった場合、占有密度が低かった領域も渋滞してしまう可能性がある。さらに、空間制約により渋滞を回避するための余剰領域や、あるいは本研究で想定するレーンネットワークにて渋滞を迂回するための代替レーンがないシステムには、これらの制御手法を適用することはできない。

西成らは、出入口 (ボトルネック) 付近に殺到した歩行者の

(a) Behavior rule with our previous intelligent cruise control technique

(b) Behavior rule with novel intelligent cruise control technique

Fig. 7 Different damping force by β depending on lanes

流れをスムーズにするため、歩行者の動きに注目し、ボトルネック付近に障害物を置くことの有効性を示している [19] [20]。岡田らは、ロボット群の混雑緩和のため、快適空間 (アメニティ) 設計を目的とし、混雑部にボールを配置する手法を提案している [21] [22]。これらの研究では、ボトルネックが原因で発生する渋滞に対して、ボトルネックや渋滞の付近にボールなどの障害物を置くことにより、人やロボット群の密度を低下させ渋滞を分散させることに成功している。しかしながら、障害物を置く方法では、点でのみしか渋滞緩和に影響を及ぼすことができない。さらに、複数箇所にボトルネックがある場合、それに応じて障害物を置かなくてはならず、システムが煩雑になる可能性がある。また、障害物を複数置くことが渋滞や混雑緩和へ与える影響も考慮しなくてはならない。

5.3 走行制御手法と関連した行動ルールの設計

本研究では、交通工学における交通流の流入量を制限する考え方にに基づき、障害物ではなく、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する。そのため、まず、ロボット群の走行速度の分布をシミュレーションにより求め、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。渋滞が発生すると、Fig. 6 の灰色レーンが示すように、ロボット群はボトルネック部を渋滞の先頭とし “stop-and-go”, すなわち停止と発進 (のろのろ運転) を繰り返す。したがって、(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を渋滞レーンとして定義する。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。これにより、渋滞レーンを通過する際のロボットは、この行動ルールに従って走行するよう規制されることとなる。

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、渋滞レーンへ設けられる。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、渋滞レーンとそうでないレーン上にて、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。

渋滞レーンで新旧二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 (1) と式 (3) の制御モデルにて、粘性係数 D を定数倍するために値 β 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 β 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ないかにより β だけ変わることとなる (Fig. 7(b) 参照)。ただし、定数 β がかけられた仮想ダンパの粘性係数が式 (2) と式 (4) で定義された粘性係数の上限値を超えてしまった場合、この上限値を粘性係数とし、ロボットへ制動力 $\beta D v_R(t) \Delta t$ と $\beta D(v_R(t) - v_{R'}(t)) \Delta t$ を作用させる。

本行動ルールの利点として、混雑部に障害物を置く手法とは異なり、渋滞レーン上の全ロボットに対して、大きな減速制動力を作用させられることが挙げられる。そのため、点でなくより広いエリアで渋滞に影響を与えることが可能となる。また、ボトルネックが複数あってもそれにつながる渋滞レーンに行動ルールを設けるのみで物理的な実体を置くわけではなく、システムは煩雑にならない。

6. シミュレーション実験

6.1 実験条件

6.1.1 ロボット群に対する走行制御手法と行動ルール

渋滞解決のための本方法論の有効性を検証するため、第 4 章と第 5 章で提案した新知的走行制御手法と行動ルールを、第 2 章で述べた一般走行制御手法と第 3 章で述べた既提案知的走行制御手法と比較する。なお、既提案知的走行制御手法は行動ルールとともにロボット群へ適用される。

6.1.2 システムレイアウト

本実験では、ボトルネックとして交差と合流を有し、かつ渋滞の影響が最も顕著に現れやすいとされている単一レーン周回型のシステムを対象とする。Fig. 8 に、三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 System layout consisting of three circuits

サーキット 1 とサーキット 2 と 3 へは、それぞれ隣接する入り口からロボット群は進入し、各サーキットにおいて同じ距離だけ走行するよう周回する。図において円で示した部分 (○) が半径 2.25 [m] の交差と合流エリアとなり、先にこのエリアに進入したロボットが優先的に通過することができる。同時に進入した際には、速度の速いロボットが優先され、同時かつ同じ速度の場合は、ランダムに優先権が割当てられる。なお、レーン 1 本あたりの長さは 20 [m] とする。そのため、サーキット 3 は一辺が 1 レーンで合計が 4 レーン (80 [m]) から、サーキット 1 と 2 の一辺は 2 レーンで合計が 8 レーン (160 [m]) から構成されている。各レーンには、後の説明の都合上、それぞれ識別番号が記されている。

6.1.3 移動ロボット群

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 を走行する。その際、ロボットの最高速度は 1.5 [m/s]、最大加速度は速度に応じて 0.05 [m/s²] (~ 0.5 [m/s]), 0.08 [m/s²] (0.5 $\sim$ 1.0 [m/s]), 0.12 [m/s²] (1.0 $\sim$ 1.5 [m/s]), 最大減速度は 0.5 [m/s²] とした。

6.1.4 ロボット間通信

各ロボットは進行方向に存在するロボット群と通信を行い、走行制御のために位置と速度情報を取得する必要がある。これらは、自らの行動の意思決定を行うことができる自己駆動粒子であることから、冗長性の観点からも、分散制御を可能とするための通信モデルが必要となる。これまでに、AGV 群の運行管理のための共有黒板通信モデル [23] や自律分散ロボットシステムに対応した分散型黒板通信モデル [24] が提案されている。分散型黒板通信モデルは、ロボット群の交通整理にも適用可能であることが示されている [25]。さらに、無線通信システムを実装した群ロボットシステムや ITS に関する研究も行われている [26] [27]。そこで本研究では、無線通信システムがロボットに搭載され、その範囲がシステム内であることを前提に、各ロボットには通信を介して他のロボットの黒板にアクセスし、随時当該ロボットの位置と速度情報を取得する通信形態を実装した。

6.2 実験結果

6.2.1 速度分布

Fig. 9 に、一般走行制御手法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。ここでは、ロボットが各レーンを通過する際の速度を、単位時間 (1 シミュレーションステップ = 1 [s]) あたり 0.1 [m] 間隔で計測した。そして、ロボットの大きさを 1 × 1 [m] として速度を算出した。

この速度分布より、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がったレーンとして、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。なお、速度分布が波形を示しているのは、常時発生し続けた渋滞が原因である。本シミュレーション実験では、制御モード 1 における最低安全ロボット

Fig. 9 Velocity distribution obtained with general cruise control technique

Table 1 Average velocity on lanes with general cruise control technique

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

Table 2 Average velocity on lanes with our previous intelligent cruise control technique

Lane #	1	2	3	4	5	6	7	8
Velocity	0.52	0.42	0.41	0.68	0.59	1.30	1.31	0.87
Lane #	9	10	11	12	13	14	15	16
Velocity	0.60	1.31	1.33	0.89	0.52	0.42	0.41	0.69

Table 3 Average velocity on lanes with novel intelligent cruise control technique

Lane #	1	2	3	4	5	6	7	8
Velocity	0.59	0.40	0.40	0.73	0.60	1.34	1.39	1.04
Lane #	9	10	11	12	13	14	15	16
Velocity	0.57	1.34	1.43	1.08	0.61	0.40	0.41	0.69

間距離 (Fig. 1 参照) を 3 [m] としたため、渋滞を形成したロボット群はこの間隔で停止した。

新旧二つの知的走行制御手法をロボットに適用した際の各レーン上における速度分布の平均値を **Table 2** と **Table 3** に示す。Table 1 の結果と比べると、渋滞レーンを含むほぼすべてのレーンにて速度の改善が見られる。しかしながら、Table 1 と同様に、ボトルネックに向かうレーン (2, 3, 14, 15) 上にてロボットは最も低速走行する結果となった。そのため、これら四つのレーンに対して行動ルールを設ける。なお、Table 2 と Table 3 を比べると、同じ渋滞レーンでは、既定案知的走行制御手法を用いることで、ここでの平均速度がより改善されているように見える。これは、渋滞後方に散在する停止ロボットにより、ボトルネックへと向かうロボットの台数が分散されたためである。ただし、後述するが、これら停止ロボットが原因となり、走行時間は新知的走行制御手法のほうがより優れた結果となった。

Fig. 10 に、既提案と新知的走行制御手法のみを適用した際

(a) Previous intelligent cruise control technique and behavior rule

(b) Novel intelligent cruise control technique and behavior rule

Fig. 10 Velocity distribution

の速度分布と、渋滞レーンに行動ルールを設けることが速度に与えた影響を示す。黒線[†]が、知的走行制御手法をロボット群に適用し行動ルールを渋滞レーンに設けたあとの速度分布を示している。なお、5.3 節で述べた β の値は、ロボットの速度性能や台数による影響が大きく、本研究では実験的に $\beta = 10$ とした。

いずれの結果においても、行動ルールを渋滞レーンに設けることにより、そこでの速度が大幅に改善されていることが分かる。さらに、この影響はボトルネック通過後のサーキット 3 での速度にも及び、レーン 4, 5, 9, 16 での速度も改善される結果となった。これは、渋滞が解消されたことに伴い、ボトルネック部をロボット群が通過しやすくなったためである。Fig. 10 (b) の速度分布と比べ、Fig. 10 (a) では行動ルールを設けたあと、渋滞レーンのさらに後方レーンで速度分布が波形を示していることが見て取れる。これは、渋滞レーンでは行動ルールにより、渋滞後方に存在する停止ロボットの影響も小さくなったが、その分、これら停止ロボットの影響がその他のレーンへ及んだためである。そのため、高速走行レーン 6, 7 や 10, 11 などでは、行動ルールを設けることにより速度が低下することとなった。一方で新知的走行制御手法を適用した場合、行動ルールを設けたあとでは際立った渋滞は発生せず、また、渋滞の後方で停止するロボットもいなかったため、渋滞レーン以外でも速度分布は波形を示すことはなかった。また、高速走行レーンでは、行動

[†] 分布は 0.1 [m] 間隔で計測を行ったため離散値だが、ここでは見やすくするため各プロットを実線で結んだ。

Fig. 11 Comparison of traveling time

ルールを設けたあとも、ロボット群はほぼ変わらない速度で走行したことが分かる。

6.2.2 走行時間

Fig. 11 に、一般走行制御手法、既提案知的走行制御手法、新知的走行制御手法をロボット群に適用し、さらに渋滞レーンには行動ルールを設けた際の、34 台のロボットがサーキット 1 (17 台) と 2 (17 台) を 200 周走行するのにかかった時間を示す。なお、1 台のロボットはサーキット 3 を同じ距離だけ周回走行した。一般走行制御手法では、ロボットによる渋滞に対して制動力を用いた減速行動や、渋滞レーンに対して行動ルールを設けることによる減速行動は行われない。そのため、この手法を適用して得られた結果を基に、筆者らによる新旧二つの知的走行制御手法と行動ルールを組み合わせた結果を比較する。

まず、一般走行制御手法に比べ、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。二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。したがって、6.2.1 項では渋滞に対する影響が比較的小さいように見えたものの、本知的走行制御手法の効果を確認することができる。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。

ここで、知的走行制御手法に比べ、行動ルールを設けることによる時間の短縮量が少ないように見える。しかしこれは、まず知的走行制御手法がロボット群に対して適用され、シミュレーション実験を通じて渋滞レーンを特定し、そこへ行動ルールが設けられたためである。したがって、行動ルールが知的走行制御手法に比べ、渋滞に対する効果が低いことを意味しているわけではないことに注意されたい。

本行動ルールは、サーキット 1 や 2 の渋滞レーン以外に対しては効果がなく、したがって、例えば高速走行レーン (6, 7, 10, 11) に行動ルールを設けてもロボット群全体の移動速度は改善されなかった。そのため、このときの結果は新旧二つの知的走行制御手法のみを適用した結果と変わらず、それぞれ約 17.5 時間と 16.5 時間だった。このことから、ロボット群が行動ルールに従い渋滞レーン上のみをさらに低速走行することで渋滞は解

(a) # of robots: 20 (non-congested state)

(b) # of robots: 35 (congested state)

Fig. 12 Behavioral feature of robots with general cruise control technique

消され、渋滞箇所での速度が改善しロボット群全体の移動速度も高くなり、その結果、走行時間が短縮されることが示された。

6.3 渋滞解析のためのロボット群挙動特性

本研究では、渋滞を解析するため、全ロボットの平均速度と各ロボットの速度の標準偏差をロボット群の挙動特性として着目する。そして、ロボット群の投入台数を変えたシミュレーション実験を行い、渋滞が発生していない状態と発生している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、知的走行制御手法と行動ルールの渋滞に対する有効性を定量的に評価するための指標となる。

Fig. 12 に、一般走行制御手法をロボット群に適用した際のシミュレーション開始後 3,000 秒までのロボット群の挙動特性を示す。なお、本実験ではシステムが非渋滞状態ならびに渋滞状態となるよう、20 台と 35 台のロボット群を投入した。

Fig. 12 (a) では、シミュレーション開始時にはボトルネックが原因となり渋滞が発生したものの、その影響は少なく、常にボトルネック部を先頭とした渋滞が存在したわけではなく、各サーキットをロボット群の移動とは反対方向へ渋滞が遷移する結果となった。また、2,000 秒あたりで渋滞は消滅し、最終的には各ロボットは前のロボットとの距離を一定に保ちながら、同じ速度で高速に走行することとなった。そのため 3,000 秒間では、全ロボットの平均速度が標準偏差を上回る結果となった。また、2,000 秒以降ではこの差がより顕著となり、標準偏差は 0、平均速度は最大値 (1.5 [m/s]) となった。一方 35 台のロボット群を投入した場合では、常にボトルネック部を先頭とした渋滞が形成されることとなった。そのため、渋滞レーンにて停止あるいは低速走行しているロボットや、それ以外のレーンでは高速走行しているロボットなど、各ロボットで速度のばらつき、すなわち

標準偏差が大きくなり、これが Fig. 12 (b) が示すように、全ロボットの平均速度を上回ることとなった。すなわち、Fig. 12 (a) と Fig. 12 (b) では、ロボット群は非渋滞状態と渋滞状態でそれぞれ反対の挙動特性を示したことが分かる。これは、ボトルネックのないシステム（単一レーン周回型一つのサーキット）におけるロボット群の挙動特性とも一致する [28]。

以上の結果から、ボトルネックの有無に関係なくロボット群の挙動特性は、

- 渋滞の発生していないシステムでは、全ロボットの平均速度 > 各ロボットの標準偏差
- 渋滞が発生しているシステムでは、全ロボットの平均速度 < 各ロボットの標準偏差

となることが分かった。そこで次節では、この挙動特性を指標とし、新知的走行制御手法と行動ルールの渋滞解決に対する有効性を評価する。

6.4 渋滞解決への有効性

Fig. 13 に、新旧二つの知的走行制御手法のみをロボット群に適用した際の挙動特性、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た際の挙動特性を示す。

従来の知的走行制御手法のみを適用した結果を示している Fig. 13 (a) では、ボトルネックによる渋滞とその後方の停止ロボットが原因となり、頻繁に標準偏差が平均速度を上回ることが見て取れる。Fig. 13 (b) では、行動ルールによりボトルネックに伴う渋滞は解消されたが、走行制御により停止ロボットは散在し、時折標準偏差が平均速度を上回ることがある。一方新知的走行制御手法のみを適用した場合、停止ロボットは発生しなかったため、Fig. 13 (c) では、Fig. 13 (a) と比べ、速度の標準偏差が平均速度を上回る頻度が減少したことが分かる。さらに、行動ルールを設けた Fig. 13 (d) では、ほぼ完全に平均速度が標準偏差を上回る結果となった。

Table 4 に、Fig. 12 (b) と Fig. 13 の結果を基に、全ロボットの平均速度と各ロボットの速度の標準偏差を時間に対して平均化した値を示す。新旧二つの知的走行制御手法と行動ルールの結果については、それぞれ（知的走行制御手法のみ）／（知的走行制御手法＋行動ルール）の形式で示されている。

一般走行制御手法と比べ、二つの知的走行制御手法は、それらのみでもロボット群に適用することで、平均速度と標準偏差の両方ともが改善されていることが分かる。既提案知的走行制御手法のみを適用した場合、平均速度（0.5）が標準偏差（0.56）を下回っている。これは、システムが渋滞状態にあることを意味している。行動ルールを設けると、平均速度（0.61）が若干標準偏差（0.58）を上回り、システムは非渋滞状態になった。しかしながら、依然として停止ロボットが散在しているため、その差は小さい。一方新知的走行制御手法では、それだけで平均速度（0.51）と標準偏差（0.52）がほぼ同じ値となり、これは非渋滞と渋滞のはざま、すなわちシステムが相転移状態にあることを示している。さらに行動ルールを設けると、平均速度（0.69）は標準偏差（0.54）を大きく上回ったことが分かる。これは、ボトルネックによる渋滞ならびに渋滞後方に散在する停止ロボットの問題が解消され、システムが非渋滞状態になったことを示している。

(a) Previous intelligent cruise control technique only

(b) Previous intelligent cruise control technique and behavior rule

(c) Novel intelligent cruise control technique only

(d) Novel intelligent cruise control technique and behavior rule

Fig. 13 Behavioral feature of robots (# of robots: 35)

Table 4 Mean value of average velocity and standard deviation for 3,000 [s]

	Average velocity	Standard deviation
General	0.36	0.59
Previous	0.50 / 0.61	0.56 / 0.58
Novel	0.51 / 0.69	0.52 / 0.54

標準偏差に関しては、新旧二つの知的走行制御手法にて、行動ルールを設ける前に比べ、後では速度のばらつきが大きくなった（0.56 から 0.58, 0.52 から 0.54）。これは、ボトルネックによる渋滞が緩和あるいは解消されたものの、ボトルネックのないシステムとは異なり、それによりロボット群全体の移動が劇的にはスムーズにならなかったためである。また、行動ルール

により渋滞レーンでは大きく減速行動をとるロボット群が存在した一方で、その他のレーン上には高速走行したロボット群も多数存在したことも原因である。

以上の結果より、本方法論において改良された新知的走行制御手法と行動ルールの組み合わせが最も渋滞の解決に有効であることが示された。

7. お わ り に

本稿では、ロボットが群れをなして移動する際に形成され得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。これに関しては、ロボット群が走行中にオンラインで Fig. 9 や Fig. 10, そして Table 1, Table 2, Table 3 のような速度分布を作成し、自ら渋滞レーンを判断し行動ルールを設けるための研究を行う必要がある。ボトルネックとして交差と合流を有した単一レーン周回型のシステムを対象に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のロボット群全体の移動速度や走行時間に対する効果を示した。また、ロボット群の挙動特性に基づき、本提案方法論の渋滞に対する有効性を定量的に示した。今後は、小型の自律移動ロボット群を用いた実機実験を行う。そして、位置や速度情報に誤差が含まれ通信に遅れが生じる状況を想定した走行制御と行動ルールの開発を行う。

筆者らは、群ロボットシステムだけでなく、自動車による ITS への適用も念頭に研究を行っている。これらは互いに共通部分の多い研究分野とされている [29]。渋滞は、ロボットにも自動車にとっても深刻な問題となる。したがって、近い将来相互に応用可能な新技術が必要になると予想される。そこでこれに対し、群知能ロボティクスに信頼性や安全性工学を取り入れた研究も行う予定である。また、自動車に対しては、本制御手法と行動ルールに基づき得られた速度情報を運転者に提示することで、完全自動化されていない ITS においても、渋滞解決の手段になるものと期待することができる。

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] B.S. Kerner and P. Konhäuser: "Cluster Effect in Initially Homogeneous Traffic Flow," *Physical Review E*, vol.48, no.4, pp.2335–2338, 1993.
- [2] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata and Y. Sugiyama: "Dynamical Model of Traffic Congestion and Numerical Simulation," *Physical Review E*, vol.51, no.2, pp.1035–1042, 1995.
- [3] Y. Sugiyama, M. Fukui, M. Kikuchi, K. Hasebe, A. Nakayama, K. Nishinari, S. Tadaki and S. Yukawa: "Traffic Jams without Bottlenecks — Experimental Evidence for the Physical Mechanism of the Formation of a Jam," *New Journal of Physics*, vol.10, 033001, 2008.
- [4] A. Nakayama, M. Fukui, M. Kikuchi, K. Hasebe, K. Nishinari, Y. Sugiyama, S. Tadaki and S. Yukawa: "Metastability in the Formation of an Experimental Traffic Jam," *New Journal of Physics*, vol.11, 083025, 2009.
- [5] S. Hoshino, H. Seki, Y. Naka and J. Ota: "Multi-Robot Coordination for Flexible Batch Manufacturing Systems Experiencing Bottlenecks," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol.7, no.4, pp.887–901, 2010.
- [6] S. Hoshino, H. Seki, Y. Naka and J. Ota: "Behavior Control Methodology for Circulating Robots in Flexible Batch Manufacturing Systems Experiencing Bottlenecks," *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.5350–5356, 2009.
- [7] T. Arai and J. Ota: "Motion Planning of Multiple Mobile Robots Using Virtual Impedance," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.8, no.1, pp.67–74, 1996.
- [8] T. Arai and J. Ota: "Dwarf Intelligence — A Large Object Carried by Seven Dwarves," *Robotics and Autonomous Systems*, vol.18, no.1–2, pp.149–155, 1996.
- [9] S.-Y. Yi and K.-T. Chong: "Impedance Control for a Vehicle Platoon System," *Mechatronics*, vol.15, no.5, pp.627–638, 2005.
- [10] A. Gorjestani, C. Shankitz and M. Donath: "Impedance Control for Truck Collision Avoidance," *American Control Conference*, pp.1519–1524, 2000.
- [11] 大前学, 藤岡健彦, 三宅浩四郎: "プラトーンを一力学系として扱った縦方向制御に関する研究", *日本機械学会論文集 C 編*, vol.65, no.640, pp.4714–4721, 1999.
- [12] 内山慎一, 鎌田崇義, 永井正夫: "プラトーンを振動系として扱った車間距離制御に関する研究", *日本機械学会第 9 回交通・物流部門大会講演論文集*, pp.81–84, 2000.
- [13] P.A. Ioannou and C.C. Chien: "Autonomous Intelligent Cruise Control," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.42, no.4, pp.657–672, 1993.
- [14] 西成活裕: 渋滞学. 新潮選書, 2006.
- [15] 加藤晋, 橋本尚久, 津川定之: "車車・路車間通信による予見的速度制御の交通流改善効果の一考察", *自動車技術会論文集*, vol.40, no.3, pp.919–924, 2009.
- [16] S. Hoshino, H. Seki, Y. Naka and J. Ota: "Autonomous Cruise Control of Circulating Multi-Robot for Congestion," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.2101–2106, 2010.
- [17] L. Qiu, W.-J. Hsu, S.-Y. Huang and H. Wang: "Scheduling and Routing Algorithms for AGVs: A Survey," *International Journal of Production Research*, vol.40, no.3, pp.745–760, 2002.
- [18] S. Maniccam: "Adaptive Decentralized Congestion Avoidance in Two-dimensional Traffic," *Physica A*, vol.363, no.2, pp.512–526, 2006.
- [19] K. Nishinari: "Jamology: Physics of Self-driven Particles and Toward Solution of All Jams," *Distributed Autonomous Robotic Systems*, vol.8, pp.175–184, 2008.
- [20] D. Yanagisawa, A. Kimura, R. Nishi, A. Tomoeda and K. Nishinari: "Theoretical and Empirical Study of Pedestrian Outflow through an Exit," *Distributed Autonomous Robotic Systems*, vol. 8, pp. 227–238, 2008.
- [21] 本間良幸, 岡田昌史: "群の連続体モデルに基づく混雑緩和のためのアメニティ設計", 第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 3O1-06, 2008.
- [22] 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予稿集 DVD-ROM, 1F2-02, 2009.
- [23] J. McElroy, L.M. Stephens, R.D. Bonnell and J. Gorman: "Communication and Cooperation in a Distributed Automatic Guided Vehicle System," *IEEE SoutheastCon*, pp.999–1003, 1989.
- [24] J. Wang: "On Sign-board Based Inter-Robot Communication in Distributed Robotic Systems," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1045–1050, 1994.
- [25] J. Wang: "Operating Primitives Supporting Traffic Regulation

and Control of Mobile Robots under Distributed Robotic Systems,” Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1613–1618, 1995.

- [26] H. Asama, K. Ozaki, A. Matsumoto, Y. Ishida and I. Endo: “Development of Task Assignment System Using Communication for Multiple Autonomous Robots,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol.4, no.2, pp.122–127, 1992.
- [27] S. Kato, S. Tsugawa, K. Tokuda, T. Matsui and H. Fujii: “Vehicle Control Algorithms for Cooperative Driving with Au-

tomated Vehicles and Intervehicle Communications,” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol.3, no.3, pp.155–161, 2002.

- [28] 星野智史, 関宏也, 太田順: “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”, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, AC3G3-5, 2010.
- [29] 永井正夫: “カー・ロボティクス調査研究委員会の紹介—ロボット技術と自動車技術の融合を目指して—”, 日本ロボット学会誌, vol.27, no.1, pp.2–5, 2009.

星野智史 (Satoshi Hoshino)

2006 年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。2006 年東京工業大学資源化学研究所助手。2007 年同助教。群ロボットによる港湾自動コンテナターミナル・多品種生産システムの開発。自律移動ロボット群の渋滞に対する行動制御・最適保全方策に関する研究に従事。2004 年日本機械学会第 13 回交通・物流部門大会優秀論文講演表彰受賞。IEEE, 日本機械学会, 計測自動制御学会, 化学工学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

関 宏也 (Hiroya Seki)

1986 年東京大学工学部機械工学科卒業。1988 年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了。同年三菱化成 (株) (現在三菱化学) 入社。この間, 1995~1997 年スイス連邦工科大学自動制御研究室客員研究員。博士 (工学)。2005 年東京工業大学資源化学研究所准教授。プラントワイド制御, バッチプロセス制御の高度化などに関する研究に従事。2002 年 IFAC Control Engineering Practice Prize Paper Award, 2003 年計測自動制御学会論文賞武田賞。化学工学会, 計測自動制御学会の会員。

太田 順 (Jun Ota)

1987 年東京大学工学部精密機械工学科卒業。1989 年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了。同年新日本製鐵 (株) 入社。1991 年東京大学工学部助手。博士 (工学)。1994 年同講師。1996 年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻助教授。この間, 1996~1997 年スタンフォード大学客員研究員, 介護ロボットのインタフェースシステムの研究に従事。2007 年同准教授。2009 年より東京大学人工物工学研究センター教授。群ロボットの計画, 制御, ロボットのための環境設計, 群知能ロボットと移動知, 大規模生産/搬送システムの設計, ヒューマンアナリシス等の研究に従事。IEEE, 精密工学会, 日本機械学会, 計測自動制御学会の会員。(日本ロボット学会正会員)