

## 1. 研究の目的

群知能ロボットシステムやマルチエージェントシステムなど、複数台の自律移動体からなるシステムを管理するためには、数理計画法やメタヒューリスティクスなどを用いた、より上位レベルでの移動体行動制御(動作計画、タスク割当て、順序スケジューリングなど)が重要視されてきた。しかし、実際のシステムでは、投入台数の増加にとともに、必ずロボット群の渋滞が発生する。したがって、この渋滞を緩和するための制御がなくては、高度な制御を行っても、ロボット群を適切に扱うことは困難となる。

渋滞を緩和する行動制御として、ロボット群全体を一括に管理する方法論がある。しかし、膨大な数のロボットをリアルタイムで管理するには計算機コストが問題となる。都市交通計画をテーマにした研究分野では、渋滞緩和のための研究が盛んに行われている。例えば、自動車の交通渋滞緩和には、一般的に道幅や車線数などのインフラを拡張設計するアプローチが採られている。しかしながら、空間制約、すなわち拡張が困難なシステムでは、この手法の適用は不可能となる。

そこで本研究では、各ロボットをリアルタイムで管理するために、実装可能な分散型の制御システムを構築し、インフラの拡張ではない環境設計、すなわち開発する行動制御と環境をリンクさせた設計論を展開する。具体的には、(I)個々のロボット間に制御シナリオにしたがった仮想ダンパが挿入され、渋滞あるいは減速ロボットに対して自らも減速、(II)渋滞エリアには仮想ダンパからの制動力に外力を付加するためのルールを設計しさらに減速、(III) これら2つのアプローチにより渋滞を緩和し、ロボット群全体をすばやく動かす、以上のことを目的とする。

## 2. 研究の内容(手法、経過、評価など。)

本研究では、ロボット群により形成される渋滞緩和を目的に、ロボット群制御と環境ルールの2つのアプローチからなる方法論を構築する。渋滞に対するロボットの行動制御を行わない場合、渋滞は時間が経っても緩和されず、群の移動とは逆方向へ遷移することが知られている。渋滞が緩和されれば、移動速度や時間に大きく影響することから、エネルギーや環境問題などの社会工学的な観点からも、本研究の意義は大きい。

渋滞緩和のための方法論は、具体的に以下の2つのアプローチから構成されている。

- (1) 仮想ダンパを用い、力学的制御モデルに基づいたロボット群行動制御手法の改良
- (2) 群の移動速度を解析し、速度場の低い渋滞エリアを通過するロボットに対して(1)の制御モデルにおける粘性係数を大きくするための環境ルールを設計

本研究に先立って、仮想ダンパを用いることでロボットが渋滞に対して減速行動をとる制御モデルを開発した。また、独自開発のシミュレータ上にこの制御手法を実装した。しかしながら、本制御手法では、渋滞に対して減速中のロボットのさらに後方にあるロボットに対しては、仮想ダンパが挿入されないため、停止を余儀なくされた。そしてこの現象が後方に伝播すると、断続(局所)的な渋滞が形成される問題があった。そこで本研究期間において、行動制御に関する新たなシナリオとして、渋滞に対して減速行動中のロボットが前方にいた場合、当該ロボット間にも仮想ダンパを挿入し、制動力を走行ロボットに作用させ減速させる力学モデルを構築した。

環境ルールに関しては、インフラの拡張設計が一般的なアプローチである。一方本研究では、システム内におけ

## 2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です。)

るロボット群全体の速度分布をシミュレーション実験により解析し、最も低速で走行する渋滞エリアを見つけ出すアプローチを採用した。そして、そこを通過するロボットには、(1)の制御モデルで減速制動力が作用する際、粘性係数を大きくするためのルールを環境側に設けた。直感的には、渋滞エリアで低速走行することが、全体の流れをさらに遅くするように思える。しかるに、本研究では、この環境ルールによって渋滞を緩和しロボット群の移動速度を向上させることに注力した。

本方法論の有効性を検証するため、行動制御手法と環境ルールをそれぞれ計算機上に実装し、シミュレーション実験から得られた挙動特性に基づき、渋滞緩和への定量的な評価を行った。本研究では、挙動特性としてロボット群の移動速度に着目し、有効性検証のための指標を示した。非渋滞時には、ロボット群の挙動として、全ロボットの平均速度が各ロボットの速度の標準偏差を上回り、これらが一定の値へと収束する。また、渋滞緩和の効果が高いほど、この特性は明確なものになる。

シミュレーション実験では、仮想ダンパを用いた行動制御手法も環境ルールもロボット群へ適用しなかった結果と、新旧2つの行動制御手法および環境ルールを適用した結果を、移動に要した時間に基づき比較した。また、上記の挙動特性を指標に、本方法論の渋滞に対する有効性を定量的に明らかにした。

### 3. 研究の結論、今後の課題

#### 研究の結論

右の結果は、3つの手法をロボットに適用した際の走行時間の比較結果を示す。申請者が提案した2つの手法では、従来手法に比べ、走行時間が約半分程度まで短縮された。

新旧2つの手法を比べると、改良された行動制御手法により、約1時間、走行時間は短縮された。また、いずれの結果

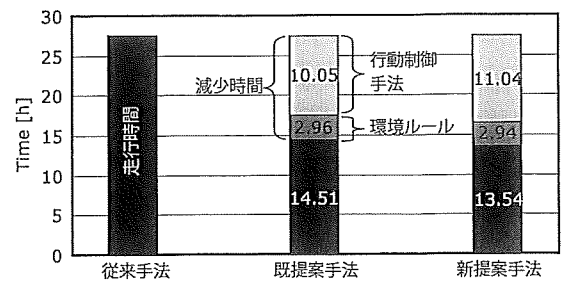
においても、行動制御手法に加え環境ルールを渋滞レーンに設けることにより約3時間、走行時間が短縮された。なお、本環境ルールは、渋滞箇所以外の場所に設けてもロボット群全体の移動速度は改善されなかった。

以上のことから、(1)仮想ダンパの力学的制御モデルに基づいたロボット群行動制御手法と(2)渋滞箇所に設けられた環境ルールにより、渋滞を緩和しロボット群全体をすばやく動かすことに成功した。さらに、本方法論におけるこれら2つのアプローチの利点として、基礎部となる制御システムに依存しないこともあげられる。

#### 今後の課題

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行動制御手法と環境ルールの開発を行う。本研究は、群ロボットシステムだけでなく、自動車によるITSへの適用も想定して行われている。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。

今後の課題として、群知能ロボティクスに信頼性や安全性工学をいかにして考慮するかが重要となる。また、自動車に対しては、本制御手法と環境ルールに基づき得られた速度情報をいかにして運転者に提示すかが、完全自動化されていないITSにおいて渋滞を解決するための課題となる。



#### 4. 成果の価値(とくに判りやすく書いてください。)

##### 1. 社会的価値

本研究成果の特徴として、高度な制御システムやデバイスを用いなくとも群制御が行え、環境設計もコストと余剰空間を必要とする拡張工事や障害物を置く手法を採用せずとも、渋滞を緩和できることがあげられる。渋滞問題は都市交通だけでなく、社会の至るところに存在している。ロボットシステムにおいても、今後高度に自律移動が可能となれば、多くのロボットに限られたシステム内で移動することとなり、そこでは高効率な自動化に向け、渋滞が大きな問題となることが予想される。

本方法論は、大まかであっても位置と速度が各自で分かれば、空間の制約に関係なく応用することができる。その適用範囲は群知能ロボットシステムだけでなく、都市交通システムを含む渋滞問題に悩む多くの社会システムまでに及び、本研究成果の波及効果は大きい。

##### 2. 学術的価値

これまで、ロボット群の動作計画、タスク割当て、順序スケジューリングなど、群知能ロボットシステムの上位レベルでの行動制御に関する研究は、投入台数に伴うシステムの相転移(非渋滞状態から渋滞状態への変化)問題は扱っていない。

本方法論は、よりロボットの占有密度が高く、相転移が起こりやすいシステムにおいても、渋滞緩和に効果的であり、今後の行動制御研究の基盤として活用されるものと期待できる。また、渋滞エリアではさらに低速で動くことにより全体の動きが速くなるといったアイデアは、学術的に大変興味深い発見であり、ロボットシステムだけでなく、都市交通システムにおける自動車のより高度な制御の実現を目指す研究にも大いに役立つものと考えられる。

3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いてください。未発表のものは公表予定を書いてください。)

##### 原著論文

1. 星野智史, 関宏也, 太田順: 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 –, 日本ロボット学会誌, Vol.29, No. 8, pp. 726-736, 2011.
2. S. Hoshino, H. Seki, and J. Ota: Experimental Analysis of Cooperative Behavior of Autonomous Mobile Robots against Congestion, Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, Vol. 5, No. 1, 2012 (掲載予定).

##### 国際会議論文

3. S. Hoshino: Multi-Robot Coordination Methodology in Congested Systems with Bottlenecks, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2810-2816, 2011.
4. S. Hoshino, H. Seki, and J. Ota: Multi-Robot Manipulation and Maintenance for Fault-Tolerant Systems, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4347-4352, 2011.

##### 国内口頭発表論文

5. 星野智史, 関宏也: 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, 日本機械学会 第20回 交通物流部門大会(TRANSLOG2011), pp. 329-332, 2011.
6. 星野智史, 関宏也: ボトルネックの存在する混雑環境で形成される移動ロボット群渋滞を解決するための行動制御手法と環境ルール, 第29回 日本ロボット学会学術講演会, 芝浦工業大学, RSJ2011AC201-7, 2011.