

# 柔軟に状態空間を変更可能な行動計画法による 複数ロボットの協調行動の創発

Emergence of cooperative behavior based on planning-space shift motion generation

2011005



研究者代表

静岡大学大学院 工学研究科

准教授

小林 祐一

## [研究の目的]

本研究では、複数移動ロボットによる協調行動の実現にあたり、「単体でロボットが運動しているモード」「ロボットが物体を運んでいるモード」などの離散的な区別を導入し、そのモードを含んだ動作計画方法の枠組みを提案することで、ボトムアップな協調行動を可能にする動作生成の枠組みを提案することを目指す。複数移動ロボットによる協調行動の実現にあたり、2つのアプローチからの方法提案と実装・解析を行う。一つの方法は、単体のロボットが物体を押し運ぶ動作を学習する方法を構築し、その延長として物体を協調して運ぶ動作を生成させる方法を開発することであり、もう一つの方法は、複数の移動ロボットが協調して作業するような問題を予め考え、その枠組の中でいかにして最適な役割分担を実現するかというメカニズムを提案・考察し、第一の方法の開発に役立てることである。本報告では、複数移動ロボットの繰り返し協調搬送問題を例にとった第二の方法についてまず述べる。その後で、単体のロボットにおける「モードの切替え」に着目した動作計画方法とその学習によるアプローチについて述べる。

## [研究の内容, 成果]

### 1. 複数移動ロボットの繰り返し搬送問題における協調行動の調整

あらかじめ二種類の役割を与えられた多数のロボットがいかにして局所的に得られる観測情報をもとに最適なタスク達成をできるかという問題を設定し、そのための役割分担法を考案・検証した。図1に想定する繰り返し協調搬送問題の概観を示す。

各ロボットは自分の前方にいるロボットとの距離をもとに自分の速度を決定する Optimal Velocity モデルと呼ばれる速度決定法、および前方のロボットを追従することで適切な経路を創発的に獲得する Local Pursuit 戦略にもとづいて走行する。初期位置と目標位置との往復を繰り返す搬送問題において、2つの経路のうち

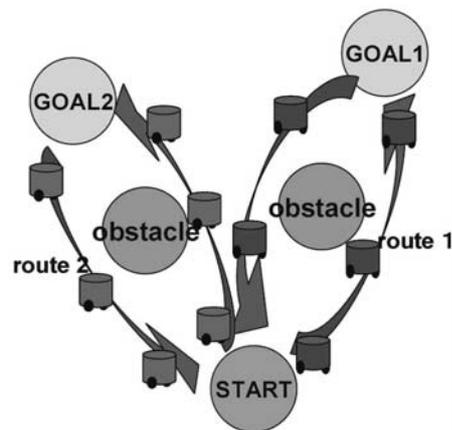


図1 繰り返し協調搬送問題

どちらを走行するかを選択することができる。各ロボットは、近傍にいるロボットとの位置関係から、現在与えられている役割（現在走行中の経路）の達成効率を推定する。推定された達成効率の情報にもとづいて、もう一方の役割を行うべきか、現在の役割を続けるべきかの判断を自律的に行う。時系列予測モデルを応用した達成効率の推定法にもとづいた自律的な役割分担方法を構築した。

図2に繰り返し協調搬送における役割分担の達成過程を示す。図中2つの円は経路を表し、その上の黒点はロボットを表す。各円の上の数字はその経路上に存在するロボット数を表し、ロボットの総数は30台である。この条件では、タスク開始時に左側の経路に全ロボットが集中し、渋滞のためにタスク達成効率が低くなっている。提案する役割分担法により、中央の図のようにいったん右側の経路にロボットが集中する過程を経て、右図のように最適な台数比率による分担が実現されていることがわかる。

図3にタスク達成効率の時間変化の比較を示す。単純な役割分担方法（図中 simple）と比較して、提案する方法（proposed 2）が効率の

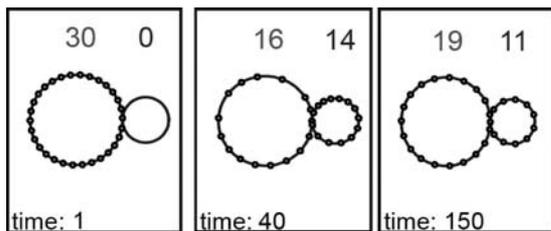


図2 役割分担の達成過程

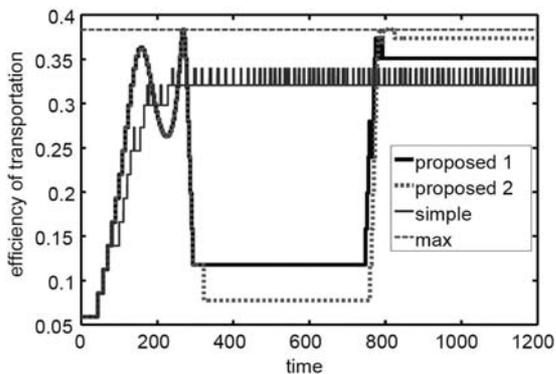


図3 役割分担の達成過程

よい役割分担を達成していることがわかる。

これらの結果より、2種類の役割が与えられた複数ロボットが全体としての効率を最適にするために局所的な観測情報から適切な役割分担を行うことが達成された。

## 2. モード切り替えに注目した移動ロボットによる物体押し操作の動作計画と学習

複数のロボットによる協調動作を考える際、「1台のロボットが物体を運ぶ」「もう1台のロボットに物体を受け渡す」などの複数の行動のまとまりを考えることができる。このようなまとまりをあらかじめ固定されたものとして設計者が準備しておくのではなく、ロボットが自律的に発見・獲得することが、ロボットの自律性を高める上で好ましい。このような「行動のまとまり」を本研究では「モード」という言葉で表現する。ここでモードとは、環境内で観測される対象の動きにもとづいて設定するものとする。具体的には、ロボットによる物体の押し運び動作であれば、「ロボットが単体で動いている状態」「ロボットが物体を押しながら動いている状態」「別のロボットが物体を押しながら動いている状態」などを個別のモードと考える。

2台のロボットによる協調動作を考えるための基礎として、1台のロボットが物体を押しして運ぶ動作において、提案するモードの考え方を利用した動作生成法を提案・検証した。自律型のロボットでの押し動作を考慮し、全方位カメラを搭載した車輪型ロボットのモデルをシミュレーション上で構築した（図4参照）。物体の押し動作の問題設定として、以下を想定する。

- ロボットは物体および物体を運ぶ目標位置までの距離と方向を観測する。

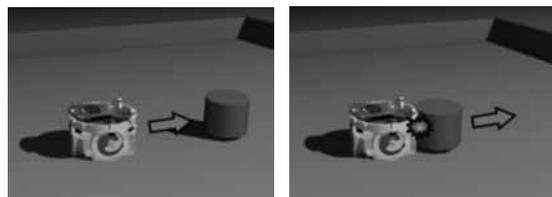


図4 押し動作における2つのモード

- ロボットの行動は、2つの車輪の微小な回転量とする。
- 最短行動ステップで物体を目標位置まで運ぶことを目的とする。
- 物体を目標位置まで運ぶ際の評価として、物体と目標位置間の距離が一定範囲内におさまることをタスク成功とみなす。

この問題設定のもとで、左図のような物体に接近するモードと、右図のような物体を目標位置まで押して運ぶモードの2種類を考える。

上記のような2つのモードを切り替えて最終的に押し動作を達成する動作生成法を考える。モードの切替を考慮する利点としては、抽象的な行動・状態識別のまとまりを導入することで動作生成の際の計算量・学習量を効率化できることがあげられる。通常の動作生成・行動学習の枠組みでは、最終的に目標に到達するという情報のみを用いて動作を生成するのに対して、モード切り替えを考慮した提案手法では、各モード内での動作の生成と、モードの切り替わりが起きる境界をどのように選ぶかという問題とを分けることで、より少ない試行錯誤や計算により望ましい動作系列を獲得できることが期待できる。

提案するモード切り替えを考慮した動作計画方法の概略を図5に示す。状態空間は、接触

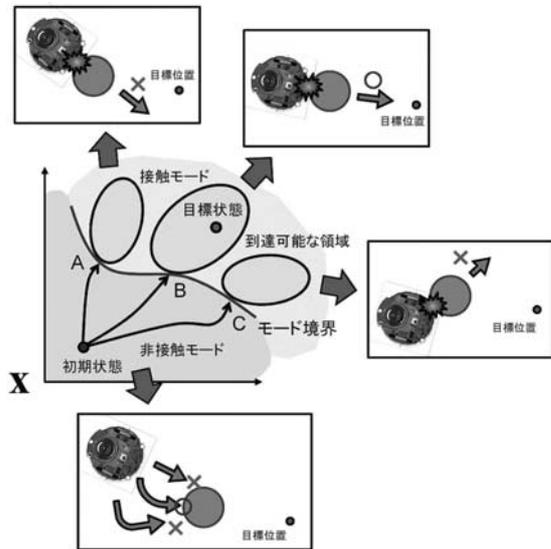


図5 押し動作における2つのモード

(ロボットが物体と接触しながら押し運ぶ)モードと非接触(物体に接触せずロボットのみが動きまわる)モードの2つに分けることができる。図中の境界上の点A, B, Cは、物体との接触が異なる場所で起きることを表している。境界上のどの点でモード切り替わりを起こすか(物体のどこで接触して押し始めるか)により、その後到達可能な状態(運べる物体の位置)は異なる。物体押し動作の動作生成は、「接触モードにおいて目標位置に向かって物体を押し動作」と「ある目標とするモード境界に到達するように移動する動作」を分けて生成することにより達成される。

動作生成には、モデル同定型の動的計画法を用いる。これにより、(TD型の強化学習法と比較して)少ない試行錯誤からの動作生成を実現する。モデル同定には、逐次最小二乗法と混合正規分布モデルにもとづいたOn-line EMアルゴリズムによる状態遷移モデルの関数近似を用いる。動的計画法の評価関数(報酬)として、物体と目標位置の距離にもとづいた報酬と、モード切り替え境界上に設定された点との距離にもとづいた報酬の2種類を用いる。

各モードについて提案学習手法で得られた動作を示す。図6に、接触モードにおける物体押し動作の学習過程を示す。試行回数が10回を超えた付近で一定の報酬を得ることができていることがわかる。

接触モードにおける押し動作学習結果を利用し、非接触モードを含んだ押し動作全体の学習

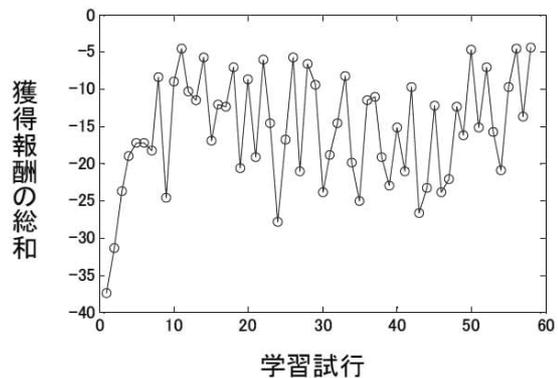


図6 接触モードにおける学習過程

を行った学習過程を図7に示す。左上が第1回の試行，右上が13回，左下が19回，右下が25回目の試行での軌跡を表す。

ロボットは2輪移動機構のため非ホロノミック拘束（車輪に垂直な方向には速度を発生させられない）を受ける。その拘束による強い非線形性の存在する状態遷移において，車両の運動学や物体とロボットの間相互作用などが未知の状態から，適切な物体の押し動作を学習により獲得できていることがわかる。

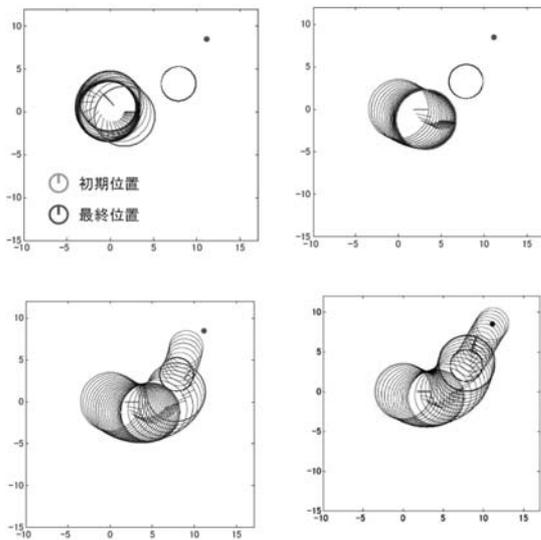


図7 モード切り替えを含んだ動作全体の学習過程

#### [今後の研究の方向，課題]

これまでに得られた2つの成果を統合・拡張することで2台のロボットによる役割分担の動作計画方法を実装・検証することが今後の方向の一つである。また，(2)の成果として得られた単体のロボット動作学習法でのモード識別に

対して，「もう1台の別のロボットが物体に接触している」モードなどを追加することで最終的に2台のロボットによる協調動作の生成が可能になると考えられる。そのための提案手法の拡張と検証が今後の課題となる。また，提案手法を実機で検証するための移動ロボットシステムを構築しており，実機での検証を行うことを予定している。

#### [成果の発表，論文等]

- [1] Y. Kobayashi, Y. Sato and M. Gouko, Division of iterative-transportation based on local observation by multiple mobile robots, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol. 16, No. 3, pp. 462-468, 2012.
- [2] Y. Kobayashi and S. Hosoe, Planning-Space Shift Motion Generation: Variable-space Motion Planning: Toward Flexible Extension of Body Schema, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, volume 62, issue 3-4, pp. 467-500, 2011.
- [3] T. Sekiguchi, Y. Kobayashi, A. Shimizu, T. Kaneko, Online learning of optimal robot behavior for object manipulation using mode switching, *Proc. of IEEE Int. Symposium on Robotic and Sensors Environments*, 61-66, Nov. 2012, Magdeburg, Germany.
- [4] 関口拓生，小林祐一，清水昭伸，金子透，離散・連続的ダイナミクスを考慮したロボット動作のオンライン学習，第30回日本ロボット学会学術講演会予稿集，AC4N1-7，2012（9月），札幌市。
- [5] 関口拓生，小林祐一，逐次最小二乗法を用いた連続行動空間での最適行動の学習，計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会，1618-1620，2011（12月），京都市。
- [6] 関口拓生，小林祐一，高次元空間における行動生成のための大域的・局所的最適制御法，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011，1A1-M03，2011（5月），岡山市。