

論文の内容の要旨

論文題目 領域法を用いた移動ロボット群による多数物体再配置作業

氏名 藤井 紀輔

本論文では、多数個の可動物体を初期位置から目標位置へ運ぶ多数物体再配置作業を取り扱う。効率、柔軟性、システムの頑健性の向上のため、移動ロボット群を用いた作業遂行手法の確立を目指す。

多数物体再配置作業では、ロボットが適宜物体を把持、開放する必要があるため、ロボットの動作の自由度は大きくなる。さらに、移動ロボット群を想定する場合にはその傾向が顕著になる。そのため、1) 達成が容易ないくつかのサブタスクを設定し、2) サブタスクを実行する順序を決め、3) それぞれのサブタスクを実行する、という段階を経て作業を行う手法が一般的である。本論文では、1) の処理を「作業分割」と呼び、2) の処理を「作業割付」と呼ぶ。

これらの処理を行う際には、ロボットが移動するための空間、物体が移動するための空間などの「資源」が作業環境中にどのように配置されているかを考慮することが重要であり、特にそれらの幾何的構造に注目することが必要である。本論文では、上述の資源配置のことを「環境の局所性」と呼ぶ。

また、実環境でロボットが複雑な作業を行うためには、センサ誤差などの各種誤差を含めた「環境の動的変動」を考慮しつつ、作業の効率性を維持する必要がある。

そこで、本研究では、

- 環境の局所性を考慮した作業分割手法、作業割付手法の構築。
- 環境の動的変動に対応する作業遂行手法の構築。

の2つを具体的な研究目的とする。

作業分割手法として、領域法 (territorial approach) の考え方に基づいた手法を提案する。この手法によって、各ロボットが移動するための空間を、他のロボットがどのような動きをするかに関わらず、常に確保することができる。作業割付手法として、従来のプロジェクトスケジューリング問題解法 (project scheduling problem solver, PSP Solver) を拡張した手法を提案する。物体が移動するための空間同士の関わりを、「サブタスク間の順序制約」という形で顕在化させることによって、デッドロックを起こすことのないサブタスク実行順序を生成する。

多数物体再配置作業は非常に複雑な問題であるため、まず作業完了の保証を得るための計画を立案し、次いで実環境において計画を実現するという作業遂行手法を構築する。

実環境での計画実現の際、環境の動的変動を検知し、その都度計画を修正する手法を提案する。

本論文は、7つの章により構成されている。1章において、研究背景、当該分野における従来研究と残された課題、それらに基づいた研究目標について述べた。

2章では、移動ロボット群による多数物体再配置問題の問題設定について、その定式化、仮定、順序制約の定義に分けて述べた。Manipulation planningの分野における知見を利用した再配置作業の定式化を行ない、1つの物体を扱うことが1つのサブタスクと位置づけられることを明らかにした。仮定について述べることで、本論文で扱う再配置作業が、1台のロボットで遂行できるサブタスクは同時に1つ (SR)、1つのサブタスクに要するロボットは1台 (ST)、サブタスクに要する作業時間は未知 (IA)、というクラスに属することを明らかにした。また、順序制約の定義について述べ、「サブタスク A が完了してからサブタスク B を開始しなければならない制約」を $A \prec B$ と記述できることを明らかにした。

3章では、提案手法の概念設計を行なった。まず、問題規模の大きさに対応するために、1) 事前計画、2) 動的変動を考慮した計画の実現、の2段階に分けて処理を行う構造を提案した。また、事前計画の段階においては、i) 高速な初期作業計画の立案、ii) 初期作業計画の改善、の2段階に処理を分けることで、計算時間制約に対応する枠組みを提案した。さらに、初期計画立案の段階に対して、II) 作業分割によるサブタスクの設定、II) 作業割付によるサブタスク実行順序の決定、III) 各サブタスクに対する動作計画立案、の3段階に分けて処理を行うことで高速に処理を行う枠組みを提案した。また、実機による作業実現手法について述べた。環境の動的変動に対処するために、作業計画の異なる段階に対して変更を加え、かつ異なる計算時間を要する対処手法を3つ、用意した。つまり、a) ロボット位置を計測することによる移動経路の微修正、b) 再計画による移動経路の修正、c) 再計画による受け渡し位置の再設定、の3つの手法を提案した。これによって、計量的な誤差に対しては a) の手法で即座に対応することができる。また、環境の動的変動に対しては b)、c) の手法により、多少の計算時間をかけたとしても、作業計画を大幅に修正することで、作業が冗長になることを防ぐことができる。

4章では、初期作業計画立案手法について述べた。作業分割の段階では、高速に処理を行うために、離散ボロノイ線図の作図法を用いた領域分けと、ルールによる受け渡し位置設定を行なう手法について述べた。領域を設定することで、各ロボットが他のロボットの動作を考慮することなく、割り付けられたサブタスクを遂行可能である状態を作り出した。また、順序制約の増加を抑えるように作業分割を行なうことで、作業割付の段階で高速に実行可能解が求まる状態を設定した。作業割付の段階では、PSPで扱われていない種類の順序制約と、その計算法について説明し、順序制約を考慮したサブタスク実行順序を生成するための拡張 PSP Solver について説明を行った。さらに、サブタス

クに対する動作計画立案の段階では、動作計画問題が2回の経路計画問題に落としこめることに着目し、従来の経路計画手法から適切な手法を選定し直接適用した。また、提案した手法を評価するために実験を行ない、結果、提案手法は実験を行なった3台から4台までの移動ロボット、3個から12個までの可動物体が含まれる8つの環境全てに対して、初期作業計画を適切に立案することができることが分かった。ロボットの大きさに対する作業環境の広さを表す指標として *sparcity* を導入し評価を行なった結果、従来手法は *sparcity* が0以上の場合に適用可能であるのに対して、提案手法は *sparcity* が-2から4程度の範囲で適用可能であることが分かった。また、提案手法は従来手法より15%短い時間で作業を終えることができる解を出力することが分かった。

5章では、初期作業計画に対して改善を行ない、効率的な作業計画を得る手法について説明した。改善は作業分割を一部やり直す形で行なわれ、1) CPM を用いて全余裕時間を計算する、2) 全余裕時間が最大であるサブタスクを選ぶ、という手順で修正対象となるサブタスクを選ぶことを説明した。また、I) 他のロボットの搬送経路、他の物体の設置位置に重複しない範囲を算出する、II) その他の位置に対して受け渡し位置を変更した場合のサブタスク実行時間を算出する、III) それに基づいて総作業時間を見積もる、IV) 総作業時間を最小化する受け渡し位置を選ぶ、という手順で新たなサブタスクを定義することを説明した。提案した手法を評価するために実験を行い、提案手法は2台から4台までのロボット、3個から12個までの可動物体が含まれる20の作業環境に対して作業計画の改善を行なうことができることが分かった。平均10%以上の作業時間を短縮し、最終的に解を出力するまでの計算時間は平均1分以下であったことから、提案手法の解の質、計算時間両面での有用性を示した。また、全余裕時間を消費するという基本方針を達成し、平均60%以上の全余裕時間を短縮していることを明らかにした。さらに、提案手法の効果が発揮される状況について分析を行い、その結果、提案手法はロボットや物体の密度がそれほど大きくなく、物体受け渡し数に偏りがあるときに、特に効果を発揮することが分かった。

6章では、実環境で作業を実現する手法について述べた。計量的な誤差に対しては即座に対応するために、また環境の大幅な変動に対しても作業が冗長になることを防ぐために、作業計画の異なる段階に対して変更を加え、かつ異なる計算時間を要する対処手法を複数用意することを提案した。また、提案手法を用いて、変動が計量的な誤差に留まる場合と、壁の形状が大幅に変わる場合の双方について、ロボット3台、可動物体が8個の再配置作業を行った。両者において構築した処理が適切に行なわれていることを確認した。また、センシング誤差の取り扱いの問題を除けば、提案した手法は誤差に対して十分に対処できるものであることを示した。

7章では、本論文の結論を述べた。本論文の内容は以下のように結論付けられる。

- 環境の局所性を考慮した作業計画立案手法を構築した。領域法によるロボット移

動空間配置の影響の排除，順序制約の導出によるサブタスク間の優先関係の顕在化，によって，複雑な問題を，単純な複数の問題へと落とし込むことに成功した．本研究で提案した基本概念は，移動ロボットに関する問題のみならず，問題の分割が困難だと考えられている諸問題にも適用可能であると考えられる．

- 実環境における多数物体再配置作業に対して，環境の動的変動への対応手法を，再計画まで含めた形で整備した．
- 以上の内容によって，移動ロボットにとって基本的な作業である多数物体再配置作業に対して，局所性が存在する環境であっても，移動ロボット群により効率的に作業遂行ができる手法を構築した．