

# 三次元環境における複数移動ロボットによる搬送計画 (第1報：誤差に対してロバストな物体操作計画)

○山下 淳(東京大学) 福地 正樹(東京大学) 太田 順(東京大学) 新井 民夫(東京大学)

## Motion Planning for Transport System by Multiple Mobile Robots in a 3-D Environment (1st Report: Robust Manipulation Planning with Motion Errors of Mobile Robots)

\*Atsushi YAMASHITA, Masaki Fukuchi, Jun OTA and Tamio ARAI  
The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

**Abstract:** This paper proposes a planning method to manipulate an object by multiple mobile robots. We build the manipulation technique, which is suitable for mobile robots by position-control. We compute the conditions, in which the object gets unstable during manipulation, and generate the motion of each robot considering the motion errors of robots and the indefinite factors from the planning stage.

**Key Words:** Planning, Multiple Mobile Robots, Transport System, Cooperative Manipulation, Motion Errors

### 1. 序論

近年、工場等の産業現場において移動ロボットに作業を行わせることが期待されている。このような現場においては、狭い通路や障害物が存在するため、物体の搬送経路やそれを実現するロボットの動作を計画することが重要である。本研究では、(1)障害物を回避しながら目標にまで至る経路を求め、どの場所で物体の姿勢を変化させれば良いか(大域的動作計画)に関して、(2)物体の姿勢を変化させる際に、どのように各ロボットが物体を操作すれば、安定した物体操作が実現されるか(局所的物体操作計画)に問題を分割し、それぞれについて動作計画手法を構築する (Fig. 1)。

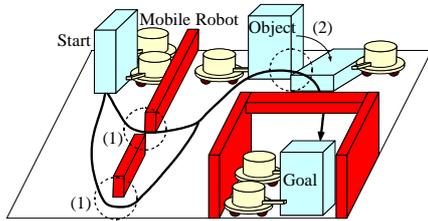


Fig. 1 複数移動ロボットによる協調搬送作業

本報では、(2)に関して取り扱うこととする。さて、複数移動ロボットでの物体操作に関する研究のほとんどは、力センサ等のフィードバック制御を利用した手法であった。しかし、移動ロボットは位置制御ベースで動作し、力センサ等の情報を高速にフィードバックすることは不可能である。また、移動する際に固定型マニピュレータと比較して大きな誤差が生じる。よって、従来手法をそのまま移動ロボットの物体操作に適用することは現実的でない。同時に、移動ロボットによる物体操作においては、センサ情報をフィードバックすることが困難であることから、事前に物体操作計画を行う重要性が大きい。

そこで、本報では位置制御ベースで動作する移動ロボットに適した物体操作計画手法を提案する。また、移動ロボットに移動誤差が生じた場合にも作業が失敗しないロバストな計画手法を構築する。

### 2. 物体操作手法の提案

#### 2.1 研究目的

本研究では、一本の棒を二台の移動ロボットが協調して取り扱い、棒を用いて物体を操作することにより、複数ロボットの合力を容易に生成し、かつ、物体との接触面積が拡大することにより作業の安定性を向上させる<sup>1)</sup>。

また、本研究における物体操作は、物体の一つの稜線を床面で支えながら、その稜線回りに物体を回転させることとし、本研究の目的とする (Fig. 2)。すべての稜線回りに物体を回転させる操作手法を構築し、物体を回転させる操作を繰り返すことにより、任意の面が床面に接地している状態に姿勢を変化させることが可能である。

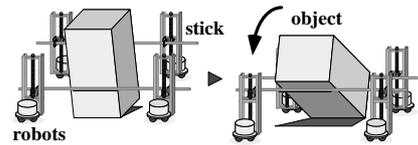


Fig. 2 複数移動ロボットによる物体操作

#### 2.2 問題設定

環境、対象物は多面体で表現させており、これらに関する情報は既知であるとする。ただし、与えられた対象物の質量および重心位置、対象物と床面・棒との摩擦係数にはある一定の精度(誤差)があるものとする。またロボットの移動(操作)に関しても、一定範囲内の位置誤差が生じるものとする。操作手法に関しては、すべての操作は準静的に行うこととする。これらの仮定の下で、物体操作手法をオフラインで事前に計画し、移動ロボットによる物体姿勢変化を実現することとする。

#### 3. 物体操作計画手法

以下の手順で物体操作計画を行う。

- (1) 対象物が安定な状態を算出(安定領域グラフの生成)
- (2) 移動ロボットの動作を決定(動作グラフ生成)

##### 3.1 安定状態の算出(安定領域グラフの生成)

物体を稜線回りに回転させる作業は、二次元モデルにより表現することが可能である。そこで、物体を二次元モデルとして扱い、全ての物体姿勢 $\theta$ に対して、物体の静止状態を保てる棒の接触位置を操作可能領域として求める。その際、各辺ごとに物体姿勢 $\theta$ と棒接触位置 $a_i$ を軸とする安定領域グラフを作成する。

まず、力学的解析を行い、安定した操作を実現する棒の接触位置を求める。対象物の質量を $m$ 、棒の接触位置を $(x, y)$ 、重心位置を $(x_g, y_g)$ 、物体が棒から受ける力及び床面から受ける力を $f_s, f_e$ とする。また、物体-棒間および物体-床面間の摩擦係数を $\mu_s, \mu_e$ とする (Fig. 3)。

物体を準静的に操作可能な条件は、以下の通りである。

$$f_s u_n + \alpha_s \mu_s f_s u_d + \alpha_e \mu_e f_e = 0 \quad (1)$$

$$f_s v_n + \alpha_s \mu_s f_s v_d + f_e - mg = 0 \quad (2)$$

$$f_s(xv_n - yu_n) + \alpha_s \mu_s f_s(xv_d - yu_d) - mg(x_g \cos \theta - y_g \sin \theta) = 0 \quad (3)$$

$$0 < f_e, 0 < f_s < F_{\max} \quad (4)$$

$$|\alpha_e| < 1 \text{ かつ } |\alpha_s| < 1 \quad (5)$$

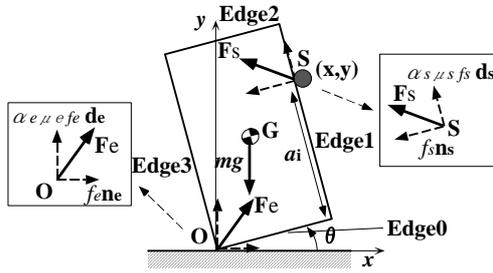


Fig. 3 対象物の二次元モデル

以上の解析結果により、物体姿勢  $\theta$  を横軸、棒の接触位置  $a_i$  ( $i$ : 辺番号) を縦軸とし、以上の条件を満たす領域を各辺に棒が接触する場合について、安定領域としてグラフを用いて表現することとする。この安定領域グラフでは、安定条件に加え、対象物と棒の接触位置に関する制約条件（幾何的条件）を考慮する。具体的には、棒の可動範囲（例えば棒は高さ  $H_{\text{limit}}$  以上持ち上げることが出来ない等の条件）を  $\theta$  と  $a_i$  で表現し、安定領域グラフの結果に反映させる。以上により生成された安定領域グラフを Fig. 4 に示す。

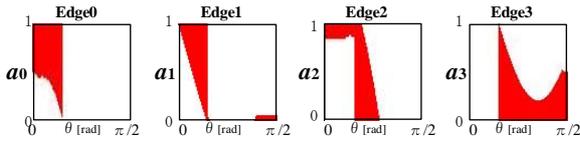


Fig. 4 安定領域グラフ

さらに、問題設定で述べた各種誤差が存在する場合の安定領域グラフを Fig. 5(b) に示す。ここでは、具体的に以下の誤差を考慮している。

- Fig. 5(a) に示すロボットの移動誤差に起因する棒と対象物の接触位置の誤差:  $(x_r \pm \Delta x_r, y_r \pm \Delta y_r)$
- 対象物の質量:  $m \pm \Delta m$
- 対象物の重心位置:  $(x_g \pm \Delta x_g, y_g \pm \Delta y_g)$
- 物体-棒間および物体-床面間の摩擦係数の変動: 摩擦係数を与えられた値よりも小さく見積もる

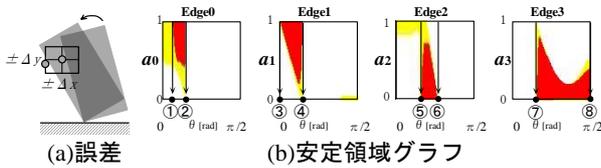


Fig. 5 誤差を考慮した安定領域グラフ

### 3.2 ロボットの動作決定（動作グラフ生成）

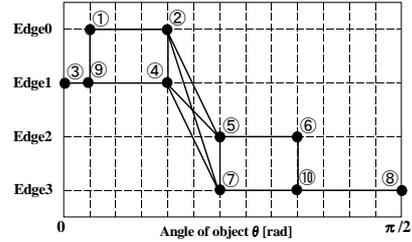
各辺における安定領域グラフにおける特徴点を抽出し、これらの特徴点をノードとする動作グラフを生成する。

具体的には、安定領域グラフから、棒を用いて物体のある辺を支えた場合に静止状態を保てる、物体の開始・終了姿勢をノードとして抽出する (Fig. 5(b))。次に、得られたノードを動作グラフ上に配置する (Fig. 6(a))。

横方向のノード間の移動 (例: 1→2) は、連続操作を意味する (Fig. 6(b))。この操作においては、棒が接触する辺は変化させずに、物体の姿勢を連続的に変化させる。縦方向のノード間の移動 (例: 1→9) は、持ち替え操作

を意味する (Fig. 6(c))。この操作においては、物体の姿勢は変化させずに、棒が接触する辺を変化させる。斜め方向のノード間の移動 (例: 2→5) は、受け渡し操作を意味する (Fig. 6(d))。この操作においては、物体の姿勢および棒が接触する辺を同時に変化させる。この操作は、ロボットの移動誤差等の影響により過大な内力が発生する危険性がある状況を回避するために用いられる。以上の操作に関して、操作の困難さをコストとして、

(連続操作) < (持ち替え操作) < (受け渡し操作) となるように設定することにより、各ノード間に操作コストが設定出来る。



(a) 動作グラフ

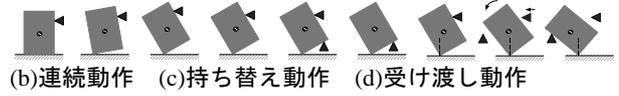


Fig. 6 動作グラフとその説明

以上の操作を組み合わせることで、物体を目標姿勢に変化させる。つまり、初期姿勢ノードから目標姿勢ノードへ操作する際のコストが最小となるような経路を求める最短経路問題に問題が帰着される。本研究においては、Dijkstra の手法を用いてコストの合計を最小とするような操作手順を求めた。以上から、3→9→4→7→10→8 と辿る結果が得られた。3→4 では辺 1、7→10 では辺 3 に棒が接触して連続操作を行い、4→7 で辺 1 から辺 3 への持ち替え操作を行う。

操作手順が決定された後、棒の運動が滑らかになる軌道を生成する。具体的には、移動ロボットの性能を考慮し、棒が直線運動を行うような棒の軌道を生成する。

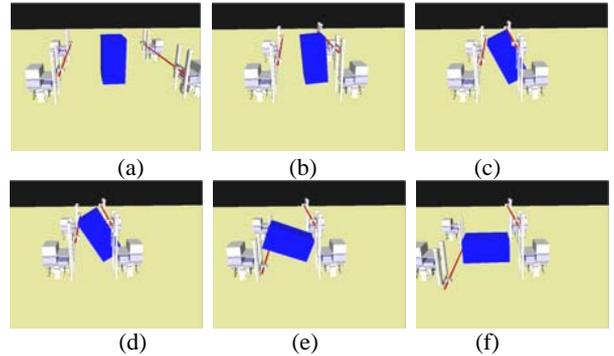


Fig. 7 物体操作計画

## 4. 結論

移動ロボットに適した物体操作手法の構築を行った。計画段階において移動ロボットに生じる移動誤差や各種パラメータ誤差を考慮することにより、移動ロボットに付随する不確実な位置誤差に対してロバストな物体操作計画手法を提案した。

## 参考文献

- 1) 山下淳他: "棒を用いた複数移動ロボットによる誤差を考慮した物体協調操作計画", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演論文集, 1P1-30-034, 1999.