

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

Cooperative Manipulation of Objects by Multiple Mobile Robots with Sticks under Errors

○ 山下 淳 (東京大学) 河野 功 (東京大学) 福地 正樹 (東京大学)
 正 相山 康道 (東京大学) 正 太田 順 (東京大学) 正 新井 民夫 (東京大学)

Atsushi YAMASHITA, Kou KAWANO, Masaki FUKUCHI, Yasumichi AIYAMA, Jun OTA and Tamio ARAI
 The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, JAPAN

In this paper, we propose a method to manipulate an object by multiple mobile robots by using sticks as tools. We build the manipulation technique, which is suitable for mobile robots by position-control. We propose the manipulation method without using sensor information considering the motion errors of mobile robots and the indefinite element of environment from the planning stage. We compute the conditions, in which the object gets unstable during manipulation, and generate the motion of each mobile robot with these analyses.

Key Words: Multiple Mobile Robot System, Cooperative Manipulation, Tool, Motion Errors

1. 序論

複数移動ロボットによる物体搬送を行う上で、状況に応じて物体の姿勢を変化させることは重要である。従来より、固定型マニピュレータによって物体操作を行う手法は数多く提案されてきた。これらの研究のほとんどは、力センサ等のフィードバック制御を利用した物体操作手法である。それに対して、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ことや、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ことから、従来のマニピュレーション分野で提案されてきた物体操作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、本研究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。ここでは、移動ロボットに移動誤差が生じた場合においても作業が失敗しないロバストな計画手法を構築する。また、棒のような道具を物体操作の補助として用いることで¹⁾、作業範囲の拡大および作業効率の向上を図る (Fig. 1)。

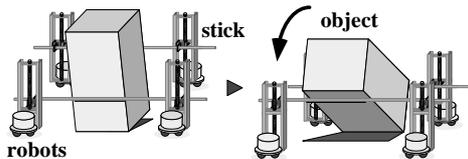


Fig. 1 Manipulation by Using Sticks as Tools

2. 物体操作に関する問題設定

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する (Fig. 2)。この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物体の姿勢を変化させることが可能である。

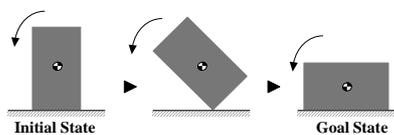


Fig. 2 Pose-changing Manipulation

ここで物体の形状、質量および重心位置、物体と床面・

棒との摩擦係数は全て既知とする。また、準静的に物体の姿勢変化を行うこととする。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

物体操作を以下の手順で決定する。

- (1) 全ての物体姿勢 θ 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 θ と棒接触位置 a_i を軸とする安定領域グラフ (Stable Domain Graph) を作成する。
- (2) 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 (Operation Graph) を生成する。動作グラフにおける最短経路問題を解く事により、物体操作手順を決定する。物体操作手順が決定した後に、棒の軌道を決定する。

3.1 操作可能領域の力学解析

物体を二次元モデルとして扱い、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 μ_s, μ_e とする (Fig. 3)。

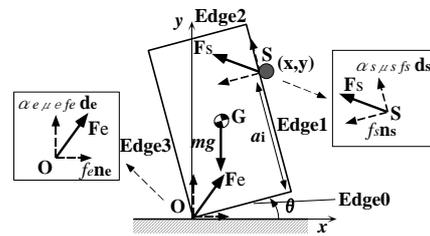


Fig. 3 2-Dimension Model Of an Object

物体を準静的に操作するための条件は、

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

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

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

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

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

となる。物体姿勢 θ 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グラフに示す (Fig. 4) .

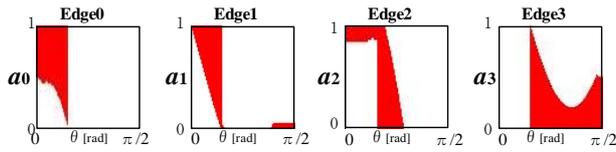
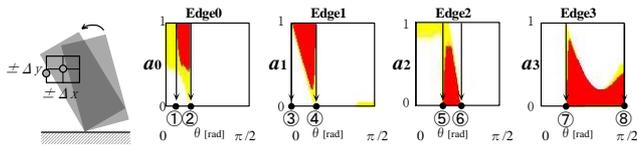


Fig. 4 Stable Domain Graph of Each Edge

Fig. 5(a)に示す移動誤差がロボットの操る棒に生じ、かつ物体-棒間および物体-床面間の摩擦係数の変動を考慮した安定領域グラフをFig. 5(b)に示す.



(a) Motion Errors (b) Stable Domain Graph

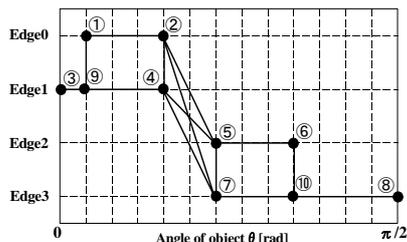
Fig. 5 Stable Domain Graph with Motion Errors

3.2 物体操作手順および棒軌道の決定

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、得られたし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. 操作の困難さをコストとして表現すると、

(連続操作) < (持ち替え操作) < (受け渡し操作)
となり、各ノード間に操作コストが設定出来る.



(a) Operation Graph

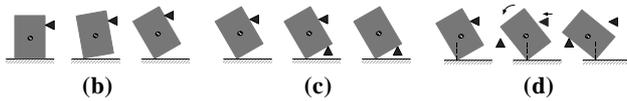


Fig. 6 Operation Graph and Operation

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.

以上の物体操作手法に関する計画シミュレーション結果をFig. 7に示す. ここでは、移動ロボットの動作および摩擦係数に一定範囲内の誤差が生じた場合にも、作業を失敗することなく遂行可能であることが確認できた.

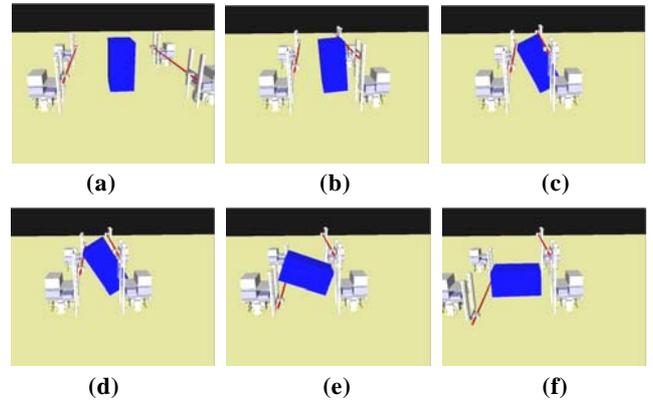


Fig. 7 Simulation Result

4. 把持機構の設計

棒の把持機構に受動関節を導入することで、考えられる移動ロボットの全ての移動誤差 (Fig. 8) に対して、過大な内力の発生を回避する. 一方で、受動関節の数が冗長であると、重力や物体からの外力に対して剛性を保てず、物体操作が不可能となる.

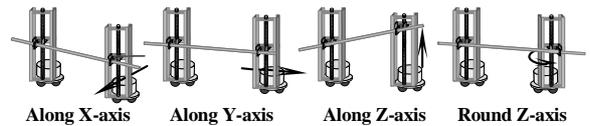


Fig. 8 Motion Errors of Mobile Robots

本研究では、Fig. 8に示した誤差に対して過大な内力が発生せず、かつ剛性を保つ把持機構を、Fig. 9に示す受動関節を持つリンク機構を用いて設計した. 各把持機構は回転関節×2, 直動関節×1の三自由度を持つ.

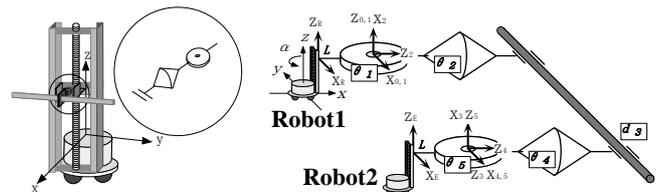


Fig. 9 Proposed Mechanism

5. 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.

また、棒を協調して操る際に、位置誤差が棒および移動ロボットに及ぼす過大な内力を回避するために必要とされる自由度について考察し、把持機構を設計した.

以上により、移動ロボットに生じる移動誤差に対してロバストな物体操作システムを構築した.

参考文献

- 山下他: "道具を用いた複数移動ロボットの協調による物体搬送", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2CIII3-1, 1998.