

In-Hand ケージング操作の研究開発成果報告書概略版（平成 24 年度 競輪補助事業）

前田 雄介（横浜国立大学）

Research and Development of In-Hand Caging Manipulation Yusuke MAEDA (Yokohama National University)

Abstract In this project, we proposed a new method called ‘in-hand caging manipulation’ to manipulate objects in position-controlled robot hands. In this method, an object is caged by a hand throughout manipulation and localized around the goal as a result of the deformation of the cage. A motion planning algorithm for planar in-hand caging manipulation of a circular object was proposed. Planned motions by the algorithm were successfully performed by a two-fingered robot hand.

Keywords: Robot hand, Caging, In-hand manipulation

1 序論

近年、原発や家庭での介護ロボットといった幅広い分野でのロボットハンドの適用が期待されている。このような状況下では、ロボットハンドの行う作業も多岐に渡るため、人間の手のような多指ロボットハンドが求められている。多指ロボットハンドの動作は、物体を安定に支持し続ける把握動作と、物体の位置または姿勢を変化させる、物体を持ち替えるといった操り動作の 2 つに大きく分類される¹⁾。この操り動作の中に In-hand マニピュレーションという、手の中の物体の位置や姿勢を変える動作がある。この動作の研究は多く行われているが、通常は力センシングや力制御を必要とする手法が用いられている²⁾。

ここで力センシング、力制御を行わない物体拘束手法に「ケージング」と呼ばれるものが存在する³⁾。ケージングとは、物体を一定領域内に幾何学的に閉じ込めることで、物体の移動可能な領域を制限するという手法である。またケージングには物体の移動可能な領域を狭めることで、物体のコンフィギュレーションをある程度決めることができるという特性がある。この考え方を In-hand マニピュレーションに適用できれば、位置制御のみで操りを行うことが可能となる。

そこで本研究では力センシング、力制御が不要な“**In-hand ケージングマニピュレーション**”という新しい手法を提案し、その有用性を示すことを目的とする。

2 In-hand ケージングマニピュレーションの条件

筆者らのグループでは、ロボットだけでなく壁などの環境を利用してケージングを実現し、マニピュレーションを行う手法を定式化している⁴⁾。In-hand ケージングマニピュレーションは、ハンドのパームなどの非可動部を環境と見なすことで、この定式化を適用することができる。In-hand ケージングマニピュレーションを行うために必要な条件は次の 2 つである。

- ケージング成立条件
- ケージングマニピュレーション可能条件

2.1 ケージング成立条件

従来研究⁴⁾よりケージング成立条件は以下ようになる。

$$\begin{cases} C_{\text{free.obj}} \neq \emptyset \\ C_{\text{free.obj}} \cap C_{\text{free.inf}} = \emptyset \end{cases} \quad (1)$$

ここで $C_{\text{free.obj}}$ は物体が取り得るコンフィギュレーション領域、 $C_{\text{free.inf}}$ は無限遠点と繋がっているコンフィギュレーション自由領域である。式 (1) は $C_{\text{free.obj}}$ が存在し、その $C_{\text{free.obj}}$ が $C_{\text{free.inf}}$ と連結していないことを意味している。

2.2 ケージングマニピュレーション可能条件

従来研究⁴⁾ではケージングマニピュレーションの可能条件として次の条件を挙げた。

- $C_{\text{free.obj}}$ が不連続に減少しない

ここで「不連続な減少」について説明する。 $C_{\text{free.obj}}$ は対象物の存在する領域であると定義しているが、これが不連続に減少するということは対象物が不連続に移動しなければならない恐れがあり、実現できないことがある。また $C_{\text{free.obj}}$ が分断されてしまった場合、どちらの領域に対象物が存在するか判定することができないが、どちらに存在した場合でも、分断された領域の片方が $C_{\text{free.obj}}$ でなくなるため $C_{\text{free.obj}}$ が不連続に減少したと見なせる。実際にマニピュレーションを行う際に、領域が分断する場合を考えるのは困難なため、本研究では $C_{\text{free.obj}}$ が不連続に減少しないようにマニピュレーションを行う。この条件は以下のように書くことができる。

以下にこの条件を示す。

$$\lim_{\Delta t \rightarrow +0} (C_{\text{free.obj}}(t) \cap C_{\text{free.obj}}(t + \Delta t)) = C_{\text{free.obj}}(t) \quad (2)$$

式 (2) は、左辺の極限が存在し、なおかつ右辺と等しい場合、時刻 t から時刻 $t + \Delta t$ の間での $C_{\text{free.obj}}$ の減少が不連続でないことを意味する。摩擦のない理想的な状態では、以上より式 (1)、(2) を満たすロボットハンドの経路を生成することができれば、対象物のセンシングをせずに、位置制御だけでこの In-hand ケージングマニピュレーションが行うことができる。

3 In-hand ケージングマニピュレーションによる物体搬送

3.1 問題設定

第 2 章に基づき、In-hand ケージングマニピュレーションの計画を行う。ここで計画の入力は対象物およびハンドの初期コンフィギュレーション、マニピュレーションの終了条件とし、出力はハンドの経路とする。

しかしここでケージングは物体のコンフィギュレーションを一意に定めることができないため、物体を特定のコンフィギュレーションに搬送することができない。よって、In-hand ケージングマニピュレーション終了条件を次のように定義する。

$$C_{\text{free.obj}}(t) \subseteq C_{\text{free.goal}} \quad (3)$$

式 (3) は、ゴール状態をごく狭いコンフィギュレーション領域 $C_{\text{free.goal}}$ と設定し、この領域に $C_{\text{free.obj}}$ が全て含まれたときに物体をマニピュレーションできたと設定する (Fig. 1)。

3.2 動作計画

3.2.1 アルゴリズム

今回は簡略化のため、二次元空間において円形対象物を2指×2関節ハンドを使用して操る動作計画を行った。また動作経路にはランダム探索手法の一つであるRRT (Rapidly-exploring Random Trees) を基にしたアルゴリズムを使用する。そのアルゴリズムを以下に示す。

1. ハンドの初期コンフィギュレーション $q_{rob,ini}$ を設定する。
2. ハンドのコンフィギュレーション q_{sample} をサンプリングし、 q_{sample} から最も近いコンフィギュレーション $q_{nearest}$ を見つける。
3. $q_{nearest}$ から q_{sample} の方向へ長さ Δl の枝を伸ばし、そのコンフィギュレーションを q_{new} とする。
4. q_{new} において環境とハンドまたはハンド同士の干渉があれば手順2に戻る。
5. q_{new} において式(1), (2)を満たさなければ手順2に戻る。
6. $q_{nearest}$ から q_{new} へ枝を伸ばす。
7. 干渉判定, 式(1), (2)を満たす限り q_{sample} の方向へ長さ Δl の枝を伸ばし続ける。
8. 手順2から手順7を繰り返し、 q_{new} が終了条件を満たせば探索終了とする。

3.2.2 In-hand ケージングマニピュレーションの条件判定

In-hand ケージングマニピュレーションの条件判定は、次の手順により行う。まず、計画を行う領域全体に対してグリッドを考える。物体の中心を代表点とすると、物体の中心が取り得る位置を二次元平面上の格子点で表すことができる。物体がハンドと干渉する格子点を除外することで、近似的に格子点の集合で表された C_{free} を得ることができる。

このとき、 C_{free} は複数の独立した領域の集合となり得る、その中から物体が存在する $C_{free,obj}$ を特定する必要がある。しかし、ある範囲内に物体を拘束するというケージングの定義上、マニピュレーションの過程において物体の位置を特定することができない。そこで、 C_{free} の独立した領域に対してラベリング処理を行うことにより物体の存在する領域を決定する (Fig. 2)。まず、 $C_{free,obj}(0)$ は対象物の初期位置を含む領域となる。 $C_{free,obj}(t + \Delta t)$ ($t \geq 0$) に関しては、 $C_{free,obj}(t)$ と共通部分を持つ領域を $C_{free,obj}(t + \Delta t)$ とする。この $C_{free,obj}(t + \Delta t)$ と $C_{free,inf}$ が連結していない場合にケージングが成立していると判定する。

またケージングマニピュレーション可能条件である「不連続な減少」を考えると、ハンドによるマニピュレーションでは領域が分断される場合がほとんどであると考えられる。そのため時刻 $t + \Delta t$ において $C_{free,obj}(t)$ と共通部分を持ち、 $C_{free,inf}$ と連結していない領域が複数存在する場合、領域が分断されてしまっているとケージングマニピュレーション不可と判定する。

3.3 計画結果と実機による検証

Fig. 3, Fig. 4 に計画で得られたマニピュレーションの結果を示す。マニピュレーションの内容としては、対象物を左側

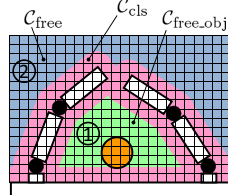
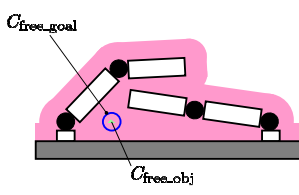


Fig. 1 Goal Condition

Fig. 2 Labeling Process

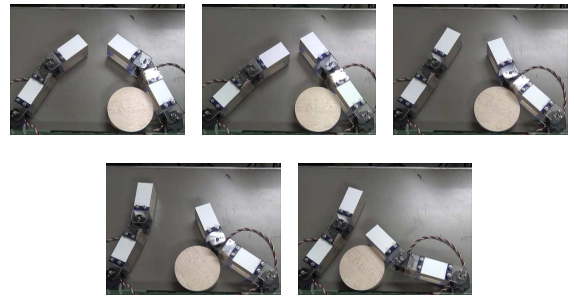


Fig. 3 In-hand Caging Manipulation (right-to-left)

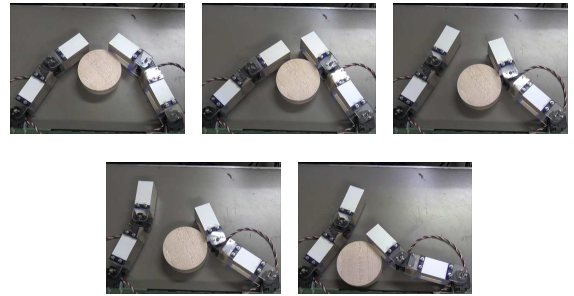


Fig. 4 In-hand Caging Manipulation (top-to-left)

のハンドの根元に持っていくマニピュレーションであり、初期状態でケージングを保ったままとする。また対象物の初期位置を Fig. 3 は右側ハンド根元としている。Fig. 3 を見ると、対象物がハンドが動きと共に左側指根元に移動していることがわかる。ここで本手法ではケージングの特性上、マニピュレーション途中の対象物のコンフィグレーション情報を利用していない。つまり、対象物の初期コンフィグレーションが異なっても、ハンド内の領域を狭めていけばマニピュレーションが可能ということになる。そのため Fig. 4 では動作計画は Fig. 3 と同じで対象物の初期位置だけを変えてマニピュレーションを行っている。Fig. 4 を見ると対象物の初期位置が変わっても、左側ハンドの根元にマニピュレーションが行えていることがわかる。

4 結論

本研究では In-hand ケージングマニピュレーションという新たな操り手法を提案し、RRT を用いて動作計画を行い、更にその計画を実機を用いて再現可能であることを確認した。そして、二次元空間における円形対象物について、初期位置が異なる場合でもマニピュレーションが行えることを確認した。しかし、jamming が発生してしまいマニピュレーションが失敗してしまう場合があるため、今後の課題として jamming を抑制した動作計画の実施があげられる。また、円形以外の対象物の動作計画および実機での実行も課題としてあげられる。

参考文献

- 1) 今関 一飛, 前野 隆司: “ロボットハンドによる把持・操り動作の階層的制御手法”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2003 講演論文集, 1A1-1F-G2, 2003.
- 2) D. Rus: “In-hand dexterous manipulation of piecewise-smooth 3-d objects,” Int. J. of Robotics Research, 18, 4, 355–391, 1999.
- 3) E. Rimon and A. Blake: “Caging Planar Bodies by One-Parameter Two-Fingered Gripping Systems,” Int. J. of Robotics Research, 18, 3, 299–318, 1999.
- 4) 横井 亮, 前田 雄介, 小林 達也: “環境を利用した平面内ケージングマニピュレーションの定式化と計画”, 日本機械学会論文集 C 編, 76, 770, 2671–2677, 2010.