

グラスプレス・マニピュレーションのためのロボット指の動作計画

東京大学 前田 雄介 新井 民夫

Motion Planning of Robot Fingers for Graspless Manipulation

The University of Tokyo ○Yusuke MAEDA Tamio ARAI

Abstract: In this paper, we present a motion planning method of multiple robot fingers for graspless manipulation. By considering whether each robot finger should be position-controlled or force-controlled, the method can generate manipulation plans that use both position- and force-control for each robot finger appropriately. We present some planned graspless manipulations of a cuboid by two robot fingers.

Key Words: Graspless Manipulation, Manipulation Planning, Manipulation Stability

1 序論

対象物を把持せず環境を利用して操るグラスプレス・マニピュレーション (Fig. 1) は、対象物の全重量を支える必要がないこと、簡単な機構で操りを実現できること、把持が不可能な場合にも操りが可能であることなどの利点があり¹⁾、通常の pick-and-place によるマニピュレーションを補完する存在として重要である。

対象物を初期位置から目標位置まで操るためのロボットの動作を計画することは、マニピュレーションにおける基本的な問題であるが、グラスプレス・マニピュレーションでは pick-and-place に比べて困難な点がいくつか存在する。Pick-and-place の場合、いったん把持してしまえば、対象物の運動はロボットの運動と 1:1 に対応する。したがって、計画は基本的に幾何学的な障害物回避問題に帰着される。しかしながら、グラスプレス・マニピュレーションの場合、対象物を把持していないため、その運動は、ロボットの運動だけでなく、環境との接触点における摩擦など力学的条件にも影響される。したがって、計画を行うためには幾何学的条件だけではなく力学的条件をも考慮する必要がある。また、グラスプレス・マニピュレーションでは、対象物を把持していないために操作が不可逆になる場合 (押せても引けない、など) があり、問題はより複雑になる。このため、従来は平面上での押し操作、転がし操作などに限定して操作計画を行うこと²⁾⁻⁴⁾ が一般的であった。

筆者らは、複数のロボット指による 2 次元平面内でのマニピュレーションを対象に、計画問題をグラフ探索に帰着させることで、押し操作・転がし操作などを含む一般的なグラスプレス・マニピュレーションを計画する手法を提案している⁵⁾。本論文ではこれを拡張し、3 次元空間内における、複数のロボット指によるグラスプレス・マニピュレーションの計

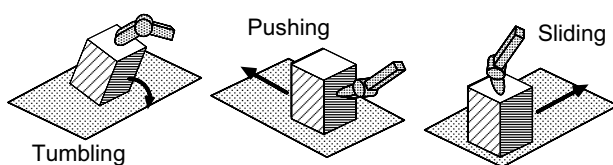


Fig.1: Graspless Manipulation

画を行う。未知の外乱に対してもロボットに操作が行えるように、各指の制御モードおよび制御指令値 (指力) を自動決定する手法を利用して、現実的な操作計画を実現することを目指す。

まず 2 章において、本論文の仮定を述べるとともに、マニピュレーションのモデル化を行う。3 章においては、操作の确实性の評価指標⁶⁾を用いて、ロボット指の適切な制御モード (位置制御 / 力制御) を決定する手法を説明する。次に 4 章では、3 章の結果を利用して、グラスプレス・マニピュレーションの計画問題をグラフ探索として表現するとともに、その探索方法について述べる。また、グラスプレス・マニピュレーションの計画例を示す。

2 グラスプレス・マニピュレーションのモデル

2.1 力学解析上の仮定

本論文で扱う計画問題では、多指ハンドによるグラスプレス・マニピュレーションを想定して以下の条件を仮定する。

1. 対象物・環境は剛体多面体である。
2. 操作は準静的と見なせる。
3. 接触力はクーロン摩擦に従う。ただし同一接触面内の摩擦係数は一様である。静摩擦と動摩擦は区別しない。
4. 摩擦円錐は凸多面錐⁷⁾ によって近似できる。
5. ロボット指は、指先のみを考え、対象物と摩擦あり点接触する球形の剛体で近似する。(これは、幾何学的干渉の計算を簡単にするための措置である。)
6. ロボット指は位置制御モードもしくは力制御モードをとる。
7. ロボット指が位置制御モードの場合、指力の上限值以内で、かつ摩擦円錐内の接触力を (受動的に) 発生する。
8. ロボット指が力制御モードの場合、ハイブリッド制御⁸⁾ されているとする。つまり、接触法線方向には (上限値以内の) 指令された指力を加えるとともに、それと垂直な方向には摩擦円錐内の摩擦力を (受動的に) 発生する。
9. 指の対象物上での滑り・転がりは扱わない。対象物上の指位置を変化させる場合は、持ち替えを行う。
10. 指と指の間隔はある一定距離以下であるとし (ハンドの機構による制約条件の近似)、この範囲内であれば他の

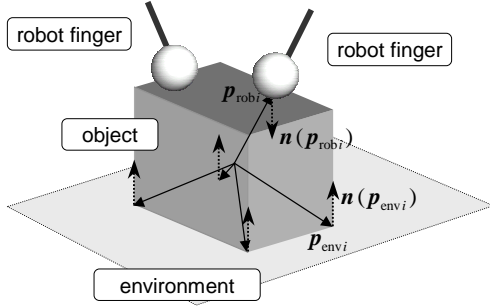


Fig.2: Object in Graspless Manipulation

物体と干渉しない限り持ち替えを行うことができるとする。

11. すべての幾何的・物理的パラメータは既知とする。

解くべき問題は、対象物を初期コンフィギュレーションから目標コンフィギュレーションまで移動させるための、指先位置および指の制御モード（位置制御/力制御）の系列を求めること、である。また、力制御指については指令指力も併せて求める。

2.2 力学モデル

Fig. 2 のような、複数のロボット指によるグラスプレス・マニピュレーションを考える。対象物の重心を原点とする座標系をとり、 $p_{env 1}, \dots, p_{env m} \in \mathbb{R}^3$ を対象物と環境との接触点位置とする。同様に、 $p_{rob 1}, \dots, p_{rob n} \in \mathbb{R}^3$ を、それぞれ $1, \dots, n$ 番目のロボット指と対象物との間の接触点位置とする。接触点 p での対象物側への単位接触法線ベクトルを $n(p) \in \mathbb{R}^3$ で表す。また、滑っている接触点の集合を C_{slide} 、滑っていない接触点の集合を C_{stat} とする。望みの対象物の運動が与えられれば、 $p_{env i} \in C_{slide}$ か $p_{env i} \in C_{stat}$ かは判定することができる。接触点 p での摩擦円錐を、単位稜ベクトル $c_1(p), \dots, c_s(p) \in \mathbb{R}^3$ を持つ凸多面錐で表す。 $p_{env i} \in C_{slide}$ の場合は、 $c'(p_{env i}) \in \mathbb{R}^3$ を、 $p_{env i}$ における滑りの方向と反対側の摩擦円錐のエッジとする。

接触点 $p_{env i}$ において可能な接触力 $f \in \mathbb{R}^3$ の集合は以下のように表せる。

$$\begin{cases} \{f | f \in \text{span}\{c_1(p_{env i}), \dots, c_s(p_{env i})\}\} \subset \mathbb{R}^3 \\ \quad (p_{env i} \in C_{stat} \text{ のとき}) \\ \{f | f \in \text{span}\{c'(p_{env i})\}\} \subset \mathbb{R}^3 \\ \quad (p_{env i} \in C_{slide} \text{ のとき}) \end{cases} \quad (1)$$

ここで $\text{span}\{\dots\}$ は、その要素ベクトルで張られる凸多面錐である⁷⁾。

一方、 $p_{rob i}$ における可能な接触力 f の集合は、

$$\begin{cases} \{f | f \in \text{span}\{c_1(p_{rob i}), \dots, c_s(p_{rob i})\}, \\ \quad n(p_{rob i})^T f \leq f_{max i}\} \subset \mathbb{R}^3 \\ \quad (i \text{ 番目のロボット指が位置制御のとき}) \\ \{f | f \in \text{span}\{c_1(p_{rob i}), \dots, c_s(p_{rob i})\}, \\ \quad n(p_{rob i})^T f = f_{com i} \leq f_{max i}\} \subset \mathbb{R}^3 \\ \quad (i \text{ 番目の指が力制御のとき}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで $f_{max i}$ は i 番目のロボット指の法線方向の接触力の上限であり、 $f_{com i}$ は i 番目のロボット指の（法線方向の）指令指力である。

また、以下の行列を定義する。

$$\begin{aligned} W_{env} &= \begin{bmatrix} I_3 & \dots & I_3 \\ p_{env 1} \times I_3 & \dots & p_{env m} \times I_3 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 3m} \\ C_{env} &= \text{diag}(C_{env 1}, \dots, C_{env m}) \\ C_{env i} &= \begin{cases} [c_1(p_{env i}), \dots, c_s(p_{env i})] \in \mathbb{R}^{3 \times s} \\ \quad (p_{env i} \in C_{stat} \text{ のとき}) \\ [c'(p_{env i})] \in \mathbb{R}^{3 \times 1} \\ \quad (p_{env i} \in C_{slide} \text{ のとき}) \end{cases} \\ W_{rob} &= \begin{bmatrix} I_3 & \dots & I_3 \\ p_{rob 1} \times I_3 & \dots & p_{rob n} \times I_3 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 3n} \\ C_{rob} &= \text{diag}(C_{rob 1}, \dots, C_{rob n}) \in \mathbb{R}^{3n \times ns} \\ C_{rob i} &= [c_1(p_{rob i}), \dots, c_s(p_{rob i})] \in \mathbb{R}^{3 \times s} \\ N_{rob} &= \text{diag}(n(p_{rob 1}), \dots, n(p_{rob n})) \in \mathbb{R}^{3n \times n} \end{aligned}$$

ここで I_3 は 3×3 の単位行列、 $p \times I_3 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は p との外積と等価な歪対称行列である。

外乱力がなければ、対象物のつりあい方程式は

$$Q_{known} + W_{env} C_{env} k_{env} + W_{rob} C_{rob} k_{rob} = 0 \quad (3)$$

となる。ここで、 $k_{env} \geq 0$ 、 $k_{rob} \geq 0$ であり、 $Q_{known} \in \mathbb{R}^6$ は重力などの既知の一般化外力である。ロボット指の法線方向力の制限は、以下のように書ける。

$$N_{rob}^T C_{rob} k_{rob} \leq f_{max} \quad (4)$$

ここで $f_{max} = [f_{max 1}, \dots, f_{max n}]^T \in \mathbb{R}^n$ とする。

3 グラスプレス・マニピュレーションにおける指の制御モードの決定

3.1 基本的な方針

一般に接触作業は力制御を用いて実現されるのがふつうであるが、一方で、例えば平面上での押し操作の場合は位置制御を用いた方が確実な操作ができることが知られている⁴⁾。つまり、押し操作・転がし操作などさまざまなグラスプレス・マニピュレーションを実現するためには、指の制御モード（位置制御/力制御）を状況に応じて使い分けよう計画を行う必要がある。

何らかの適切な評価関数が与えられれば、それに基づいて、「最適」な制御モードの組み合わせ（および、そのときの指力）を決めることができる。筆者らは、グラスプレス・マニピュレーションに適する指標として「操作の確実性」を提案している⁶⁾、グラスプレス・マニピュレーションは、対象物を把持していないために、通常の pick-and-place 操作に比べて外乱に弱いことを考えると、操作の確実性ができるだけ高くなるようにすることが有効であると考えられる。そこで、この操作の確実性の指標を利用することによって、グラスプレス・マニピュレーションにおける最適な指の制御モードおよび指令指力を決定し、それを操作計画の中で利用することを考える。

よりも操作の確実性が大きくなれば、これを記憶しておく。

4. まだ調べていない制御モードの組み合わせがある場合は1へ戻る。すべての組み合わせを調べ終わった場合はこれで終了。

すべての組み合わせを調べ終わったら、その中で操作の確実性の値を最大とする制御モードの組み合わせを採用する。もし、操作の確実性が正になる組み合わせが一つも存在しないならば、このマニピュレーションを確実に実現することは不可能（まったく実現不可能か、あるいは無限小の外乱力によっても対象物の運動が乱されてしまう）ということになる。

ただし、組み合わせの数（ n 本の指に対して 2^n 通り）だけの繰り返しがあるため、上記の素朴な方針では少々計算量が大きい。しかし、以下の性質を考えることで、計算量を減らすことができる。

1. ある制御モードの組み合わせで、過大な内力の発生可能性があるならば、その組み合わせから位置制御の指を増やした組み合わせでは必ず過大な内力の発生可能性がある。
2. ある制御モードの組み合わせにおける操作の確実性の値を、その組み合わせから力制御の指を増やした組み合わせでの操作の確実性の値が上回ることはない。

上記の2つの性質を利用すれば、調べる必要のない組み合わせを省くことができる。ここでは

- すべての指が位置制御モードの組み合わせから始め、順に力制御の指を増やしていく。
- 操作の確実性の値が増加する可能性が明らかにない組み合わせは調べない。例えば、すべての指が位置制御モードの場合に、過大な内力の発生可能性がなく、ある操作の確実性の値が得られたならば、その他の組み合わせは一切調べない（調べる必要がない）。

という方針をとることとする。

以上の手続きにより、実現したい対象物の運動とそのときの指位置が与えられれば、それを実現するための各口ポット指の望ましい制御モード（もしあれば）、指令指力（力制御指のみ）、およびそのときの対象物の操作の確実性の指標値を求めることができる。

4 操作可能性グラフの生成と探索によるグラスブレス・マニピュレーションの計画

4.1 C-Space の導入

本論文では、対象物と指の自由度を合わせて考えたコンフィギュレーション空間 (C-Space) を考える。ただし、自由空間の明示的な構成は行わない。具体的には、与えられた対象物の経路上に離散的に点をとり、対象物の位置・姿勢を表す。また、対象物の表面上に離散的に点を配置し、操作中の指位置をこれらのサンプル点に限定する。このようにして得られた、離散化された C-Space を、ここでは有向グラフ（操

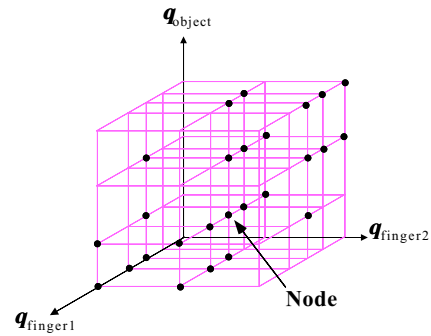


Fig.3: Generation of Nodes

作可能性グラフ⁵⁾と呼ぶことにする)で表現する。計画問題は操作可能性グラフの探索問題となる。

4.2 指の制御モードを考慮したグラフ生成

離散化された C-Space の各点のうち、幾何学的な制約条件を満たすものをグラフのノードとする (Fig. 3)。そして、それぞれのノードから遷移が可能なノードに対しては、アークで接続する。ここでは、3章に示した手続きで求められる操作の確実性の指標の値 z が、ある基準値 z_{\min} 以上であれば、遷移が可能であるとす。

ここでノード間を接続するアークとして、対象物の変位を表すアークと持ち替えを表すアークの2種類が存在する。対象物の変位を表すアークとは、対象物上の指位置を変化させずに対象物のみを動かすことに相当し、C-Space 上では対象物の自由度方向に隣接しているノード間を接続する。この場合、隣接するノード間を細かく P 区間に分割し、各分割点について（指の制御モードを適切に決めた場合の）操作の確実性の指標の値 z を計算する。すべての点において $z \geq z_{\min}$ であった場合のみ、ノード間をアークで結ぶ。滑りのない接触状態の場合は双方向のアークで結んでよいが、滑りがある場合は滑りの方向ごとに別々に調べて有向アークで結ぶ。これは、滑りがある場合は順方向と逆方向で操作の確実性の指標値が異なる場合があるためである。

持ち替えを表すアークとは、対象物の位置・姿勢を変化させることなく1本の指の対象物上の位置を変化させることに相当する。持ち替えによって対象物上の指位置は不連続に変化するので、アークは C-Space 内で隣接していないノード間にも生成する必要がある。したがって、まず持ち替えを行う指を離し、静止した状態での（適切に指の制御モードを決めた場合の）操作の確実性の値 z を調べる。 $z \geq z_{\min}$ ならば持ち替えが可能なので、持ち替え後の状態を表すノードとの間をアークで接続する (Fig. 4)。

以上の手続きによってアークを生成することにより、実現可能なマニピュレーションを表す操作可能性グラフを構築できる。

4.3 グラフ探索のためのコスト設定

操作計画は、初期ノードから目標ノードまでの最小コスト経路を、操作可能性グラフの探索により求めることで行える。前節のグラフ生成も、探索を行う過程で必要な部分だけ行えばよい。グラフ探索のためには、生成される各アークに適当

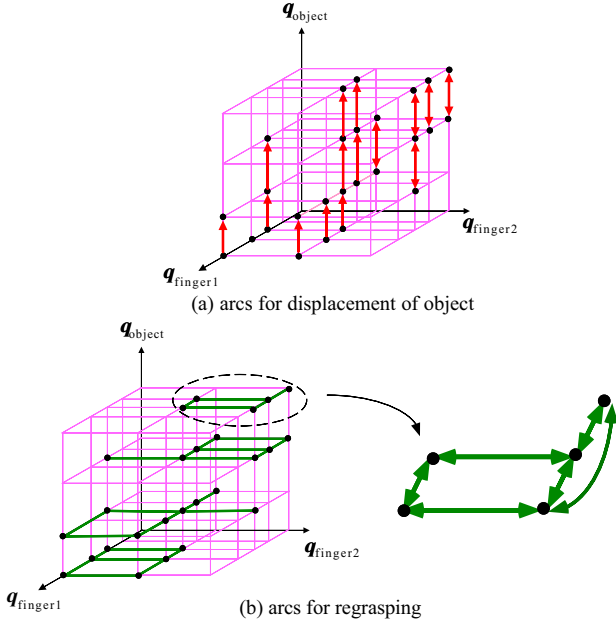


Fig.4: Generation of Arcs

なコスト C を割り振る必要があるが、ここでは

1. 持ち替え回数を最少にする .
2. できるだけロボット指の移動量を小さくする .
3. 操作の確実性をできるだけ大きくする .

という方針（上の条件ほど優先順位が高い）に基づき、以下のように設定する .

まず、対象物変位方向のアークに対して割り当てるコストは、

$$C = \max_i \sum_{j=1}^P \left(1 + \frac{X_{\text{stab}}}{z_j} \right) \|\Delta q_{\text{finger } i, j}\| \quad (7)$$

とする . ただし $\|\Delta q_{\text{finger } i, j}\|$ はこのアークを P 区間に分割したときの、 j 番目の区間におけるロボットの i 番目の指先の（絶対的な）変位の大きさ、 z_j はそのときの操作確実性の値である . また X_{stab} は、 X_{stab}/z_{\min} が 1 より十分小さくなるように決めた定数である .

また、持ち替え方向のアークに割り当てるコストは、 $C = X_{\text{regr}}$ とする . ここで X_{regr} は持ち替えそのもののコストを表す定数とし、式 (7) の値より十分大きくなるようにとる .

4.4 A^* 探索のためのヒューリスティクス

グラフの探索をより短時間に行うため、 A^* 探索¹⁴⁾を用いる . A^* 探索では、実際のコストを越えないようなコストの予測（許容的ヒューリスティック関数）を探索に用いることで、最適性を保ったまま高速化を図ることができる .

ここでは許容的なヒューリスティック関数を、以下のように設計した .

$$H = \begin{cases} \max_i \|\Delta q_{\text{finger } i}^*\| \\ \left(\begin{array}{l} \text{現在の指配置で目標位置に到達しても} \\ \text{指が環境と干渉しない場合} \end{array} \right) \\ n_{\text{viol}} X_{\text{regr}} \\ \left(\begin{array}{l} \text{現在の指配置で目標位置に到達すると} \\ \text{指が環境と必ず干渉する場合} \end{array} \right) \end{cases} \quad (8)$$

ここで $\|\Delta q_{\text{finger } i}^*\|$ は、現在の指配置のまま目標位置に到達した際の、 i 番目の指の変位の予測値（最小値）を表す . また、 n_{viol} は、現在の指配置のまま対象物を目標位置に到達させた場合に、環境と干渉する指の本数である .

今回の問題では、持ち替えに極めて大きいコストを設定しているため、これをいかにうまく予測するかが探索の性能に大きく影響する . ここでは、現在の指配置のまま対象物を目標位置に到達させたとすると指が環境と干渉する場合は、それらの指は必ず持ち替えをしなければならない、という事実を利用して、探索の高速化を図っている .

5 計画例

以上に述べた計画アルゴリズムを、C 言語を用いて実装した . 実装にあたって、線形計画問題のソルバとしてフリーの GLPK (GNU Linear Programming Kit)¹⁵⁾ を用いた . また、操作の確実性の値の計算において用いる、6 次元単位超球に外接する近似超多面体の頂点として、以下の 76 点をとった ($N = 76$) .

$$l_i = \begin{cases} k[\pm 1, 0, 0, 0, 0, 0]^T, & k[0, \pm 1, 0, 0, 0, 0]^T, \\ k[0, 0, \pm 1, 0, 0, 0]^T, & k[0, 0, 0, \pm 1, 0, 0]^T, \\ k[0, 0, 0, 0, \pm 1, 0]^T, & k[0, 0, 0, 0, 0, \pm 1]^T, \\ k\left[\pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}\right]^T \end{cases} \quad (9)$$

ここで $k = 2\sqrt{3 - \sqrt{6}} \approx 1.48$ である .

2 本のロボット指によるグラスプレス・マニピュレーションについて、提案したアルゴリズムによる計画例を示す . 指は半径 1 の球で表し、指力の上限を 10 とする . また、 $X_{\text{regr}} = 10^2$, $X_{\text{stab}} = 10^{-2}$, $z_{\min} = 0.2$, $P = 3$ とし、重力加速度は 9.8 とする . C-Space の離散化は、対象物の自由度については 31 区間に分割、指配置点としては、対象物の各面を 7×7 のグリッドに切って設定した . これにより、最大 $7 \times 7 \times 6 C_2 \times 31 = 1,335,201$ 個のノードから成る操作可能性グラフを探索することになる . なお、以下の例の計算時間は Pentium4-2.8GHz の PC を用いた場合の結果である .

まず、立方体対象物の滑らせ操作を考える . 立方体の大きさは $5 \times 5 \times 5$ 、質量は 1 で均質であるとする . また、対象物と指の間の摩擦係数を 0.7、対象物と環境との間の摩擦係数を 0.5 と設定した . この場合、Fig. 5 に示すように、対象物を両側からつまんで引っ張るような操作が計画された . このとき、左側の指が力制御モード、右側の指が位置制御モードとなっている . 計算時間は 616 CPU 分であった .

次に、直方体対象物の転がし操作を考える . 直方体の大きさは $5 \times 5 \times 10$ 、質量は 1 で均質であるとする . また、上記の例と同様に対象物と指の間の摩擦係数を 0.7、対象物と環境との間の摩擦係数を 0.5 と設定した . 対象物の背後に障害物がある場合、計画結果は Fig. 6 のようになり、対象物を両側からつまんで倒す操作が計画された . このとき、片方の指が位置制御モード、もう片方の指が力制御モードとなっている . 計算時間は 188 CPU 分である .

一方、対象物の背後だけでなく片方の側面にも障害物がある場合は、対象物を両側からはさむように指を配置すること

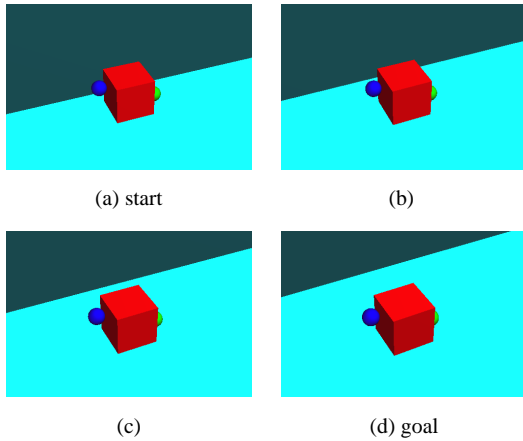


Fig.5: Planned Pulling Operation

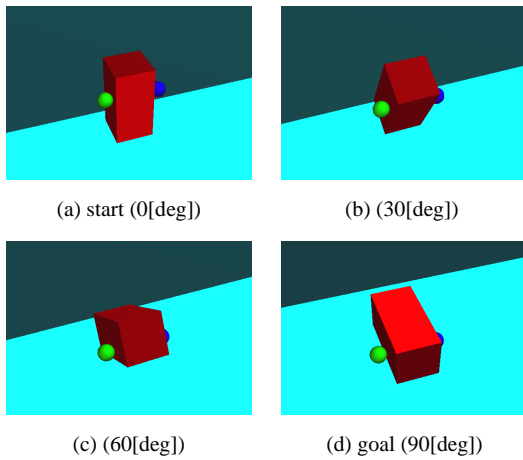


Fig.6: Planned Tumbling Operation

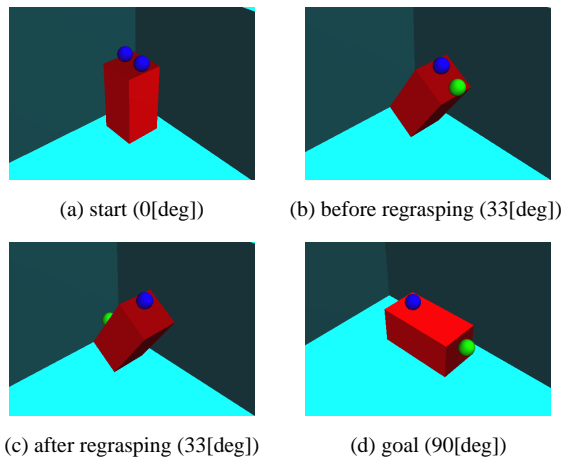


Fig.7: Planned Tumbling Operation with Regrasping

ができない。この場合について計画を行ったところ, Fig.7 のように, 途中で持ち替えを 1 回行って, 対象物を転がす操作が生成された。計算に要した時間は 1,220 CPU 分であった。

6 結論

本論文では 3 次元空間内におけるグラスプレス・マニピュレーションについて, 指の制御モードを考慮した動作計画を行った。提案した計画手法により, 滑らせ操作, 転がし操作

など, 多様なグラスプレス・マニピュレーションによって対象物を操るための指の動作の生成が可能になった。

現状の計画手法の問題点としては, かなりの計算量を要する点が挙げられ, 一層の高速化が今後の重要な課題である。また, 現在の手法では指と対象物間の滑り・転がりを許容していないが, 特に指と対象物間の転がりの利用は, 操りの能力を高める上で重要である。これを併せて扱えるようにすることも課題の 1 つである。

謝辞

本研究の一部は, 日本学術振興会科学研究費補助金 (奨励研究 (A) / 若手研究 (B): No. 13750210) の援助を受けた。

参考文献

- 1) 相山ほか: グラスプレス・マニピュレーションの研究: 操作形態の分類とピボット操作の実現, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 1, pp. 114–121, 1996.
- 2) 沢崎, 井上: 多指ハンドによる物体の転がし操作, 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 5, pp. 560–571, 1991.
- 3) 栗栖, 吉川: 押し作業における対象物の軌道計画, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 8, pp. 1115–1121, 1995.
- 4) K. Lynch and M. Mason: Stable Pushing: Mechanics, Controllability, and Planning, Int. J. of Robotics Research, Vol. 15, No. 6, pp.533–556, 1996.
- 5) 前田ほか: 複数のロボット指による平面内グラスプレス・マニピュレーションの計画, 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 8, pp. 1010–1017, 2001.
- 6) Y. Maeda and T. Arai: A Quantitative Stability Measure for Graspless Manipulation, Proc. of 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2473–2478, 2002.
- 7) 平井: 凸多面錐理論に基づくマニピュレーションの運動学・静力学とそのマニピュレーション計画問題への応用, 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 1, pp. 68–83, 1999.
- 8) M. H. Raibert and J. J. Craig: Hybrid Position/Force Control of Manipulators, ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 102, No. 2, pp.126–133, 1981.
- 9) 余, 吉川: ‘物体間の接触の安定性に関する評価’, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 7, pp. 1026–1033, 2000.
- 10) 小侯, 永田: 多指ハンドによるパワーグラスプの力学的特性, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 4, pp. 525–531, 1995.
- 11) 小侯, Daengtamai: パワーグラスプの不静定把持力計算法, 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 7, pp. 874–881, 2001.
- 12) 前田ほか: ロボットによる接触作業における内力の解析, 精密工学会誌, Vo. 67, No. 12, pp. 1996–1999, 2001.
- 13) 余ほか: ロボットハンドによるパワーグラスプの最適化, 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 4, pp. 557–566, 1999.
- 14) 古川 (監訳): エージェントアプローチ 人工知能, 共立出版, 1997.
- 15) A. Makhorin: GLPK (GNU Linear Programming Kit), <http://www.gnu.org/software/glpk/glpk.html>.