多剛体系における動力学解法とグラスプレス・マニピュレーションのための 制御系設計に関する考察

Dynamics of Multi-Rigid-Body System and its application for Graspless Manipulation Control Design

○森本洋平 (名大) 尾形和哉 (大同工業大)

早川義一 (名大)

Youhei MORIMOTO, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi

Kazuya OGATA, Daido Institute of Technology, Takiharu-cho, Minami-ku, Nagoya, Aichi

Yoshikazu HAYAKAWA, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi

1. はじめに

ロボットが多目的な作業を実現することを要求されている中で、マニピュレータが把握できない対象物も多く存在する。その際、対象物を把握せず環境を利用して操作するグラスプレス・マニピュレーションは、pick-and-placeを補う存在として、今後その重要性を増していくと考えられる。

しかし、環境との接触を伴う作業では、接触点におけるロボット・対象物・環境間の相互作用がシステムの挙動を決定するため、その接触状態（非接触、動摩擦有り接触、静止摩擦有り接触）を推定することは大変重要な問題となる。この問題を接触状態判別と呼ぶ。さらに、対象物位置とロボット・対象物・環境間に発生する接触力を同時に制御する必要がある。

本論文ではこれらに焦点を当て、多剛体系における接触状態判別に関する動力学解法を提案する。また、タンプリング操作のための位置と力のハイブリッド制御系を設計し、シミュレーションにおいて上記の制御系が有効であることを確認する。

2. 多剛体系における動力学解法

2次元平面上的運動を対象とし、対象物は直方体、環境は水平な床の剛体を、摩擦はクーロン摩擦を仮定する。また、以下では議論を簡単にするため、環境・対象物が一点接触をする場合を考える。

(下図参照)

fig.1 Object and Environment

対象物の運動方程式は次式のように表される。

$$M_o \ddot{X}_o + H_o = J_{oe}^T f_e + J_{of}^T f_f \in R^3 \quad (1)$$

ここで、 $X_o = [x \ y \ \theta]^T \in R^3$ は対象物の位置姿勢、 $f_e \in R^2$ 、 $f_f \in R^2$ はそれぞれ環境から対象物に、ロボットから対象物に加えられる接触力である。また、 M_o, H_o は対象物の慣性項と遠心・コリオリ・摩擦・重力項、 $J_{oe} \in R^{3 \times 2}$ 、 $J_{of} \in R^{3 \times 2}$ はそれぞれ環境との接触点と、ロボットとの接触点から対象物中心へのヤコビアンを表す。

接触状態判別は対象物位置 X_o ・速度 $\dot{X}_o$ が与えられている状態で行うものとする。fig.2はその手順をまとめたものである。図中 z_n は環境から対象物頂点までの距離、 $\hat{z}_n, \hat{z}_t$ は接触点の法線・接線方向速度を表す。図中※は判別が自明である。一方◎◎は参考文献[1]で示された判別であり、◎が本論文で示す判別である。以下では、対象物頂点が環境に接触し、かつ頂点速度が零の場合に、環境と接触する対象物頂点の加速度と、頂点に加わる接触力を求めることで

接触状態を判別する。

はじめに対象物頂点加速度と接触力の関係を導く。対象物頂点位置 z は対象物中心座標系 Σ_o を経由して次式のように表される。

$$z = {}^B p_o + {}^B R^O p_{oe} \in R^2 \quad (2)$$

ここで、 ${}^B p_o = [x \ y]^T \in R^2$ は対象物中心位置、 ${}^O p_{oe}$ は対象物中心座標系を基準に表した対象物頂点位置である。対象物頂点加速度は上式を時間微分して次式のように表される。

$$a = J_{oe} \ddot{X}_o + \dot{J}_{oe} \dot{X}_o \in R^2 \quad (3)$$

(1)(3)式より $\ddot{X}_o$ を消去することで、頂点加速度の接触面法線・接線方向成分 a_n, a_t と接触力法線・接線方向成分 f_n, f_t に関する次式を導くことができる。

$$\begin{bmatrix} a_n \\ a_t \end{bmatrix} = \Phi \begin{bmatrix} f_n \\ f_t \end{bmatrix} + \alpha \in R^2 \quad (4)$$

ここで、 Φ, α は $X_o, \dot{X}_o$ の関数であり既知である。上式は4個の未知変数 a_n, a_t, f_n, f_t に関する2本の式しかないため、本来ならば(4)式だけでは未知変数を求めることができない。しかし、4個の未知変数の中で法線方向加速度 a_n と接触力 f_n に関しては

$$f_n \geq 0, a_n \geq 0, f_n^T a_n = 0 \quad (5)$$

が成り立つ。

一方、接触点において右側に滑りが起こる外部入力に対象物に加えられた場合、右側にのみ滑ることができる接触点と、左右どちらにも滑ることのできる接触点を考慮した際の対象物の挙動は一致する。また、左側に滑りが起こる場合には、左側にのみ滑ることのできる接触点と、左右どちらにも滑ることができる接触点を考慮した際の対象物の挙動が一致する。以上のことに注目すると、接線方向加速度と接触力に関して(5)式に似た条件を次のように求めることができる。

左右どちらかのみ滑るという条件から、右側にのみ滑る接触点では右側を正として表した接触点接線方向加速度を a_r 、左側にのみ滑る接触点では左側を正として表した接触点接線方向加速度を a_l と表すことによって、接線方向加速度に関する次式の条件が成り立つ。

$$a_r \geq 0, a_l \geq 0 \quad (6)$$

次に、新たに次式の変数を導入する。

$$\tilde{f}_r = \mu_s f_n + f_r, \tilde{f}_l = \mu_s f_n + f_l \quad (7)$$

ただし、 f_r, f_l はそれぞれ右向き、左向きを正として表した接線方向接触力であり、 μ_s は静止摩擦係数である。

(7)式を(4)式に代入して次式を得る。

$$\begin{bmatrix} a_n \\ a_r \end{bmatrix} = \hat{\Phi}_r \begin{bmatrix} f_n \\ \bar{f}_r \end{bmatrix} + \hat{\alpha}_r, \quad \begin{bmatrix} a_n \\ a_{ll} \end{bmatrix} = \hat{\Phi}_l \begin{bmatrix} f_n \\ \bar{f}_l \end{bmatrix} + \hat{\alpha}_l \quad (8)$$

このとき、接触点において滑りが起こらない場合には、静止摩擦力は静止摩擦円錐内にあるというクーロン摩擦の条件から、次式の条件が成り立つ。

$$\bar{f}_r \geq 0, \bar{f}_l \geq 0 \quad (9)$$

また、接触力が静止摩擦円錐稜線上に達した場合に滑りが起こることから次式の関係が成り立つ。

$$\bar{f}_r a_r = 0, \bar{f}_l a_{ll} = 0 \quad (10)$$

$\hat{\Phi}_r, \hat{\alpha}_r, \hat{\Phi}_l, \hat{\alpha}_l$ は $X_o, \dot{X}_o$ の関数であり既知であることから、(5)(6)(8)(9)(10)式が成り立つ際に $a_n, a_r, f_n, \bar{f}_r(a_n, a_r, f_n, \bar{f}_r)$ を求める問題を線形相補性問題³⁾と呼ぶ。

したがって、Lemke 法³⁾を用いて左右どちらかにのみ滑る接触点を持つシステムに関する線形相補性問題をそれぞれ解くことによって、元のどちらにも滑るシステムの接触点加速度と接触力を得ることができる。

得られた加速度・接触力から、下図のように接触状態を判別する。

fig.2 Contact condition discrimination

3. タンブリング操作のための制御系設計

グラスブレス・マニピュレーションの一種であるタンブリング操作のための位置と力のハイブリッド制御系²⁾を設計する。ただし、簡単のためにマニピュレータを2自由度の質点系で近似する。

fig.3 Tumbling

タンブリング操作を行う際のマニピュレータの運動方程式は次式で表される。

$$M_f \ddot{X}_f + H_f = u - {}^B f_f \in R^2 \quad (11)$$

ただし、 ${}^B f = \begin{bmatrix} {}^B f_f^T & {}^B f_e^T \end{bmatrix} \in R^4$ であり、 $X_f \in R^2$ はマニピュレータの位置、 $u \in R^2$ は制御入力である。また、 M_f, H_f はマニピュレータの慣性項と遠心・コリオリ・摩擦・重力項を表す。

タンブリング操作を行う際にシステムに加わる運動学的拘束は次式で表される。

$${}^B p_o + {}^B R^O p_{oe} = X_f \in R^2 \quad (12)$$

$${}^B p_o + {}^B R^O p_{oe} = {}^B p_e \in R^2 \quad (13)$$

ただし、 ${}^O p_{of} \in R^2$ は対象物中心座標系を基準に表したロボットとの接触点位置、 ${}^B p_e \in R^2$ は基準座標系 Σ_B を基準に表した環境との接触点位置である。

今、対象物の位置姿勢 $X_o \in R^3$ とマニピュレータの位置 $X_f \in R^2$ をシステムの座標として考えれば、(12)(13)式はシステムの座標に関する4本の従属式となることから、システムの座標を表す5変数を対象物の姿勢 θ の一変数を用いて表し、 θ を位置制御変数とする。

同様に、対象物の運動方程式(1)式は ${}^B f$ に関する3本の従属式となることから、 ${}^B f$ を接触点を結ぶ方向の内力の一変数を用いて表し、これを力制御変数とする。

上記の考えを基に、マニピュレータの運動方程式(11)式から位置・力制御変数と制御入力の関係を導き、位置・力制御変数を独立に制御する。

4. シミュレーション

タンブリング操作 (fig.3 参照) のシミュレーションを行った。動作時間は8秒、対象物姿勢の目標回転角度は45度とした。また、接触状態の確認のために2章において示した接触状態判別法を用いた。

以下にシミュレーション結果の位置制御変数 (上)・力制御変数 (下) 偏差を示す。ここで、位置制御変数が対象物の姿勢 θ (fig.3 参照) であることから、位置制御変数偏差より対象物が希望の挙動をとっているかを確認できる。

fig.4 Control variable desired orbit

fig.5 Control variable deviation

fig.5より位置制御変数 θ の目標値との偏差が十分小さいことから、目標の角度まで対象物を回転させることができたことを確認できる。また、fig.5より力制御変数の目標値との偏差も十分小さく、操作を行う上で問題ない程度であると考えられる。

5. おわりに

本論文では多剛体系における動・静止摩擦を考慮した接触状態判別問題を線形相補性問題に帰着させる方法を提案した。

また、タンブリング操作のための位置と力のハイブリッド制御系を設計し、その有効性をシミュレーションにおいて確認した。

6. 参考文献

- [1] 八島, 山口, 平野: “線形相補性問題に基づく剛体操り系の接触状態遷移に関する動力学解法”, 計測自動制御学会, Vol.36, No.3, 283-289, 2000
- [2] 吉川恒夫: ロボット制御基礎論, コロナ社, 1988
- [3] “相補性と不動点”, 産業図書