

1. はじめに一マニピュレーション問題

現在ロボットの大半は、産業用として用いられるアームタイプのロボットマニピュレータである。産業用途としては、組立、溶接、バリ取り、塗装、パレタイズ、搬送、等々様々な作業がロボットによって行われている。これらの作業のなかで、移動させるべき対象ワークがあるようなもの、例えば組立、パレタイズなど「マニピュレーション」と呼ばれる分野について、ここで着目し、その基礎的な理論について紹介する。

マニピュレーションとは、操作対象物をマニピュレータやハンド等で望みの位置・方向へ動かすことと考えられる(確認の意味を込めて:「マニピュレーション」は動かすこと、を指し、「マニピュレータ」は動かす実機、を指している、混同しないよう願います)。しかしこのような作業は実は、特に単純な搬送など、付加価値を生み出さない無駄な作業、とみなされるケースが多々あり、なるべく早く効率的に作業をこなすことが望まれている。

このような背景と、後に述べるようにマニピュレーション問題がマニピュレータ自体の運動問題に置き換えられやすい、ため、これまで、ほとんど教科書等ではマニピュレーションは取り上げられてはこなかった。それでも解説論文等、いくつかは参考となる文献はあるので、参考としていただきたい¹⁻⁵⁾。

ここで、実際にどのようにしてマニピュレーションが行われているか、考えてみる。実際のロボットのティーチングなどをみると、実は多くの場合は、マニピュレータ自体を望みの位置・方向へ動かすことによって、マニピュレーションが実現されている。これはなぜかといえば、対象物がハンド(グリッパ)によってしっかりと把持(固定)されているために、運動学・機構学的に対象物をマニピュレータのリンクの一部とみなすことができるためである。先端リンク、ハンド、対象物が一つの剛体リンクとみなすことができれば、その先端にツール座標系を設定することで、マニピュレータの動作問題と考えることができるのである。

よって、マニピュレーション問題は多くの場合、(1) 対象物をしっかりと把持(固定)する問題、(2) マニピュレータを望みの位置・方向へ動かす問題、という二つの問題で考えることができる。(2)については、上記のようにマ

ニピュレータ自体の動作問題に帰着できるので、実際に考慮すべきは(1)の把持の問題となる。多くの論文や解説なども、「把持」と「操り」という二つのセットで説明をしている。

2. 物体の把持

マニピュレータが物体を把持し、落とさないための条件を考える。まず、図1のように単純なグリッパで対象物を持ち上げる場合を考える。

グリッパは対象物の両側から各々 F の力で挟み、対象物に働く重力を Mg とする。最大静止摩擦係数を μ とすると、物体を落とさないための条件は、 $2\mu F > Mg$ と書けるため、この結果、 $F_0 = Mg/2\mu$ よりも大きい把持力 F で把持すれば、対象物を安定に把持可能である。ここで、 $F = F_0$ では、わずかな下向きの外乱(力)で滑りを生じる危険性がある。 F を F_0 よりも大きくとることで外乱に対する安定性を増すことができる。

2.1 フォーム・クロージャ

上記のグリッパの例は、摩擦に依存した安定把持を論じていた。しかし摩擦は一般に不確定な要素が多く、クーロン摩擦を仮定したとしても、その係数の大きさが不明であるなどの場合は多々起きる問題である。

これに対し、摩擦に頼らずに幾何的に対象物を拘束し、いずれの方向にも動かなくしている状態を考える。これをフォーム・クロージャ(Form Closure)と呼ぶ。対象物を動かなくし、外乱が加わっても安定にしておく、という点で、フォーム・クロージャは安定な把握の一つと考えられる。

図2のように、対象物に一つの拘束点が接している状況を考える。四角い対象物に点で接触している三角形で、ハンドや他の対象物、壁などの拘束を表している。対象物と拘束点の接点を $P(p_x, p_y)$ 、接触点における接触法線ベ

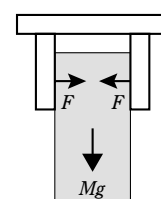


図1 グリッパによる把持

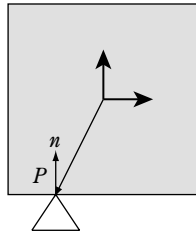


図2 対象物拘束モデル

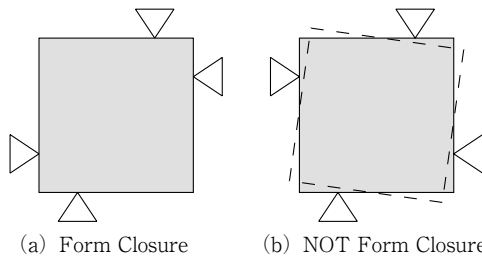


図3 フォーム・クロージャ

クトルを $\mathbf{n} = (n_x, n_y)^T$ とする。この瞬間に対象物が動ける方向を速度ベクトル $\mathbf{v} = (u, v)^T$ および角速度 ω で表す。これは微小変位 $(\Delta u, \Delta v, \Delta \omega)^T$ で書いても同様である。

このとき対象物は拘束点において、干渉する方向へは動けないので、以下の制約条件を満たす方向へのみ動ける。

$$\mathbf{n}(\mathbf{v} + \omega \times \mathbf{p}) \geq 0$$

ここで $\omega \times \mathbf{p}$ は角速度 ω により P 点が動く方向を算出するための演算で、三次元空間中の運動ではベクトルの外積で表されるためここでもそれを用いた。上式を展開し、

$$n_x u + n_y v + (n_y p_x - n_x p_y) \omega \geq 0$$

という三次元の運動空間 $\mathbf{v} = (u, v, \omega)^T$ 中の線形条件式が求められる。この条件を満たす \mathbf{v} が、対象物の動ける方向を表している。

このような拘束点が複数点ある場合には、各々の拘束点における運動可能な範囲の積集合、すなわちすべての拘束に対して動ける方向が、全体として動ける方向となる。

これらの拘束によって動ける方向がない、すなわち運動可能な方向として算出される解が $\mathbf{v} = 0$ のみとなるとき、そのような拘束状態をフォーム・クロージャと定義する。

フォーム・クロージャが成り立つためには、最低でも(運動の自由度) + 1 個の拘束点が必要になることがわかっていて、すなわち平面運動(並進2+回転1)の場合には4点以上、空間運動(並進3+回転3)の場合には7点以上が必要となる。これは、機械加工におけるフィクスチャの拘束点数、ワイヤ張力による物体の拘束に必要なワイヤ本数などの問題と同じ計算モデルとなっている。

図3に平面内で正方形物体を4点で拘束し、フォーム・クロージャになる場合(a)と、ならない場合(b)を示す。

2.2 フォース・クロージャ

対象物の把持・操りにおいて、フォーム・クロージャとともに重要な考え方として、フォース・クロージャ (Force Closure) がある。これは、ハンドとの接触点など

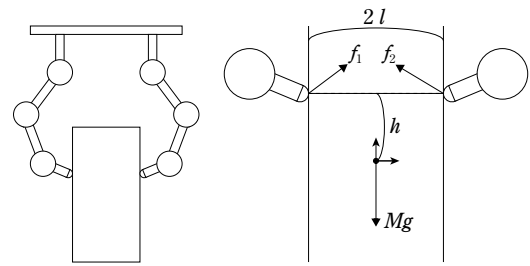


図4 2本指ハンドによる把持

の拘束点から力を加えることで、対象物に任意方向の力を与えられる状態を表す。平面運動の場合のいくつかの例で紹介する。

例1: 2本指ハンド

図4のような2本指ハンドを考える。ハンドの先端の接触点では滑らない範囲で任意方向の力を与えられるものとする。重力 Mg が働き、接触点はいずれも重心から高さ h にあるものとする。各指からは $\mathbf{f}_1 = (f_{1x}, f_{1y})^T$, $\mathbf{f}_2 = (f_{2x}, f_{2y})^T$ の力が伝わるものとする (ただし、 f_{1x} , f_{2x} はいずれも対象物内向きを正とし、 f_{1y} , f_{2y} は鉛直上向きを正とする)。

任意方向の目標力 f_{dx} , f_{dy} , τ_d が出せる、すなわちフォース・クロージャとなる条件は、任意の f_{dx} , f_{dy} , τ_d に対して以下のすべての条件を満たす \mathbf{f}_1 , \mathbf{f}_2 が存在することである。

$$\begin{cases} f_{1x} - f_{2x} = f_{dx} \\ f_{1y} + f_{2y} - Mg = f_{dy} \\ -hf_{1x} - lf_{1y} + hf_{2x} + lf_{2y} = \tau_d \\ |f_{1y}| \leq \mu f_{1x} \quad f_{1x} > 0 \\ |f_{2y}| \leq \mu f_{2x} \quad f_{2x} > 0 \end{cases}$$

これを解くと、

$$\begin{cases} f_{1y} = \frac{1}{2}Mg - \frac{h}{2l}f_{dx} + \frac{1}{2}f_{dy} - \frac{1}{2l}\tau_d \\ f_{2y} = \frac{1}{2}Mg + \frac{h}{2l}f_{dx} + \frac{1}{2}f_{dy} + \frac{1}{2l}\tau_d \\ f_{2x} \geq \frac{1}{\mu}|f_{2y}| + \max\left(0, \frac{|f_{1y}| - |f_{2y}|}{M} - f_{dx}\right) \\ f_{1x} = f_{2x} + f_{dx} \end{cases}$$

となる。このような \mathbf{f}_1 , \mathbf{f}_2 は任意の f_{dx} , f_{dy} , τ_d に対して求められるので、この場合はフォース・クロージャとなる。

例2: 正方形摩擦なし4点把持

図5(a), (b)のように正方形物体を摩擦のない4本の指先で把持するものとする。正方形の一边の長さを4とし、各接触点の位置は各々中心軸より正または負の方向に1ずつずれている。また重力は働いていないものとする。

各接触点から内向き法線方向への力を f_1 , f_2 , f_3 , f_4 と

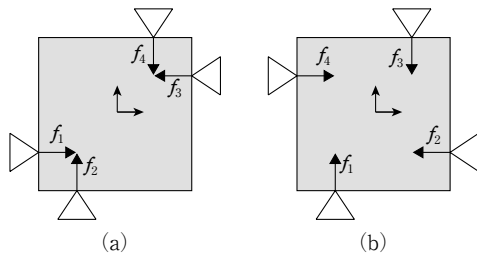


図5 フォース・クロージャ

書くと、望みの f_{dx} , f_{dy} , τ_d に対して f_1 , f_2 , f_3 , f_4 が満たすべき条件は各々次のように表される。

(a) の場合：

$$\begin{cases} f_1 - f_3 = f_{dx} \\ f_2 - f_4 = f_{dy} \\ f_1 - f_2 + f_3 - f_4 = \tau_d \\ f_1 \geq 0 \quad f_2 \geq 0 \quad f_3 \geq 0 \quad f_4 \geq 0 \end{cases}$$

と書ける。これを整理すると、

$$\begin{cases} f_1 = f_{dx} + f_3 \geq 0 \\ f_2 = \frac{f_{dx} + f_{dy} - \tau_d}{2} + f_3 \geq 0 \\ f_3 \geq 0 \\ f_4 = \frac{f_{dx} - f_{dy} - \tau_d}{2} + f_3 \geq 0 \end{cases}$$

となる。これより、

$$f_3 \geq \max\left(-f_{dx}, \frac{-f_{dx} - f_{dy} + \tau_d}{2}, 0, \frac{-f_{dx} + f_{dy} + \tau_d}{2}\right)$$

と求められる。任意の f_{dx} , f_{dy} , τ_d に対して、この条件を満たす f_3 が存在し、 f_{dx} , f_{dy} , τ_d が発生できるため、この場合はフォース・クロージャである。

(b) の場合：

同様に、

$$\begin{cases} f_1 - f_3 = f_{dx} \\ f_2 - f_4 = f_{dy} \\ -f_1 - f_2 - f_3 - f_4 = \tau_d \\ f_1 \geq 0 \quad f_2 \geq 0 \quad f_3 \geq 0 \quad f_4 \geq 0 \end{cases}$$

と書ける。これを上記と同様に整理すると、

$$\min\left(\frac{-f_{dx} + f_{dy} - \tau_d}{2}, \frac{-f_{dx} - f_{dy} - \tau_d}{2}\right) \geq f_3 \geq \max(0, -f_{dx})$$

と求められる。任意の f_{dx} , f_{dy} , τ_d に対して、この条件を満たす f_3 が存在するとは限らないため、この場合はフォース・クロージャではない。

図3のフォーム・クロージャの場合と、図5のフォース・クロージャの場合を比較しても分かる通り、このような摩擦なし点接触の場合には、両者の条件は同じ問題となることが知られている。

2.3 安定把持

マニピュレーションにおいて対象物をしっかりと把持することはとても重要なことである。このため、上記のようなフォーム・クロージャ、フォース・クロージャの概念が重要となる。摩擦を含まないフォーム・クロージャでは接

触点が多く必要になってしまうため、多くの場合、摩擦を含めたフォース・クロージャの状態を作り出すことで安定な把持を実現している。これは、把持している対象物にどんな方向の外乱（外力）が働いたとしても、それをキャンセルしてその場に留まらせる力を働かせることができる、という考え方である。

安定把持の概念には他の考え方も存在する。一つは、対象物にどのような方向の変位を与えたとしても、もとの位置へ戻る復元力が働く場合を安定である、とする考え方である。バネで対象物をつりあいの位置に固定させている場合などが相当する。このようなポテンシャル場をもとにした安定把持の考え方も存在する。どのような「安定」を考慮するのかは、対象ごとに使い分ける問題である。

3. 対象物と環境の接触制御

最初に述べたように、マニピュレーションにおいて、対象物をしっかりと把持することは重要な問題である。しかしマニピュレーションを行う目的である組立やパレタイズなどを考えると、把持して運ぶだけでなく、他のワークやパレットなどの周辺環境との接触を伴うのが一般的である。しかし、一般的なマニピュレータで環境と接触を伴う作業を行うことには大きな問題が存在する。一般的なマニピュレータは高減速比で高剛性の関節角度制御が行われている。外部環境と接触する際にわずかな位置誤差でも存在すると、その剛性により対象物を環境に大きな力で押し付けたり、逆に環境から対象物が離れてしまう危険がある。

この問題を避けるためには、(1) 手首部などに受動関節など低剛性部を導入する、(2) 接触力を計測し、能動的に目標値に制御する、という手法がとられる。

3.1 受動コンプライアンス機構

上記のような問題が発生するのは、ハンドで対象物の運動を完全に拘束しているのに環境によってさらに拘束を増やし過拘束の状態を作り出しているためと考えることができる。そこで、手首部にバネ関節やフリージョイントなどの低剛性部を入れることによって、対象物は環境による拘束に沿った動きが可能となり、問題を回避できる。

このような目的で広く実用的に用いられている例として、図6のようなRCC (Remote Center Compliance) 機構がある。

RCC機構は図(a)のような構造となっている。最上部(手首)のプレートから、接続箇所が柔軟に傾く接続部を2段介して、最下部(グリッパ)のプレートがつながれている。(b)のように挿入する穴の位置がずれていても、(c)のように姿勢がずれていても、接続部が柔軟に変形して、過大な押し付け力が発生することなく、挿入作業が達成される。

3.2 接触力の制御

上記のように機構で回避する方法とは別の方法として、制御によって、同様の低剛性部を作る方法や、接触方向については位置ではなく力为目标値へ制御する方法がある。

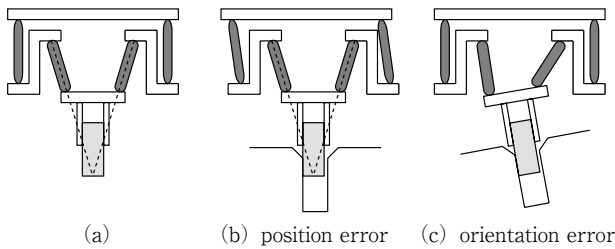


図6 RCC機構による位置姿勢誤差吸収

前者をインピーダンス特性（慣性，粘性，弾性）を制御する「インピーダンス制御」，もしくは弾性（コンプライアンス）を制御する「コンプライアンス制御」と呼ぶ．後者は接触力を制御する「力制御」，もしくはある方向には力を，他の方向には位置を制御する「位置と力のハイブリッド制御」などと呼ばれる．

例えばインピーダンス制御系は次のように実装される．例えばもとのシステム（実機）の特性を

$$M_o\ddot{x} + D_o\dot{x} = F + u$$

で表されるものとする． x が位置を表し， M_o ， D_o はそれぞれ慣性と粘性を表す行列である． F はシステムにかかる外力であり， u は制御系からシステムにかかる駆動力である．

このシステムに対して，望みのインピーダンス特性を，

$$M_d\ddot{x} + D_d(\dot{x} - \dot{x}_d) + K_d(x - x_d) = F$$

とする． x_d ， \dot{x}_d は目標とする位置，速度であり， M_d ， D_d ， K_d はそれぞれ目標とする慣性，粘性，弾性である．

このような特性となるような制御入力 u を求めると，

$$u = -(M_o M_d^{-1} D_d + D_o)\dot{x} - M_o M_d^{-1} K_d x + M_o M_d^{-1} D_d \dot{x}_d + M_o M_d^{-1} K_d x_d + (M_o M_d^{-1} - I)F$$

と計算される．このような制御力をシステムに入力することにより，システムは望みのインピーダンス特性の通りに振舞うことになる．

4. 接触状態遷移計画

これまでに，マニピュレータで対象物をしっかりと把持し，望みの運動（環境との接触を含む）をさせる手法の紹介を行ってきた．最後に，「望みの運動」をどのように作り出すのか，簡単に紹介する．

組立を例にすると，二つの物体の接触状態を非接触の状態から目標の接触状態へと変化させることが望みの運動である．しかし例えば図7のような軸-穴挿入を考えた際に，非接触の状態から直接目標状態（挿入状態）へ遷移しようと計画しても，実際にはマニピュレータや物体の据付

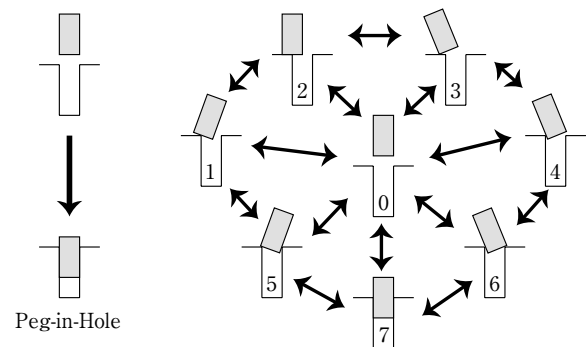


図7 接触状態遷移グラフ

位置誤差などが存在するため，引っかかってしまう場合がある．

図7右側は，軸-穴挿入問題における，軸と穴の接触状態とその遷移をグラフで表したものである（一部のみ抜粋）．この場合，状態0から状態7へ遷移しようとしたが，実際には引っかかり，状態1，2，3，4，5，6のいずれかになるのだが，それがどの状態か判別することは困難な問題である．

もちろんこのような問題に対応するために面取りを行いRCC デバイスを用いるのだが，据付誤差などは面取りでは吸収しきれない場合がある．

このため，最初からわざと位置姿勢をずらして，遷移する接触状態を決めて実行する手法が用いられることが多い．例えば，状態0→状態1→状態5→状態7といった具合である．このような状態遷移計画を行うことで「望みの運動」を生成する．

5. おわりに

以上，非常に簡単にかいつまんで，ロボット・マニピュレーションに関する基礎的なトピックを紹介した．把持，制御，計画，いずれも専門の研究分野があるので，詳しくはそれらの論文等を参考にいただきたい．

参考文献

- 1) 中村仁彦：把持とあやつり，計測と制御，**29**，3（1990）206．
- 2) 吉川恒夫：把持と操りの基礎理論1．受動拘束と能動拘束，日本ロボット学会誌，**13**，7（1995）950．
- 3) 吉川恒夫：把持と操りの基礎理論2．指先力，日本ロボット学会誌，**14**，1（1996）48．
- 4) 吉川恒夫：把持と操りの基礎理論3．制御，日本ロボット学会誌，**14**，4（1996）505．
- 5) 平井慎一，若松栄史：ハンドリング工学（ロボティクスシリーズ14），コロナ社，（2005）．