

6.4 力制御 (本節の担当者吉川恒夫の提出原稿)

6.4.1 力制御の必要性

ロボットにさせたい作業には、作業対象物に加える力の制御を必要とするものが多い。たとえば生産工場においては機械への部品組み付け、取り外し、組立て、研磨、ばり取りなど、また日常生活においては書字や描画、ものの把持と操り、ドアの開閉、ハンドルまわしなどが挙げられる。さらにロボットと他の物体や人間との予期しない衝突時の安全のためには、その衝撃力をなるべく小さくすることが望ましい。本節では、このような力制御のための代表的な方法であるインピーダンス制御法および位置と力のハイブリッド制御法について解説する。

6.4.2 インピーダンス制御法

インピーダンス制御法とは、ロボットの手先の機械インピーダンス特性を適切な値にあらかじめ設定しておく、手先目標位置の調整を通して、手先が対象物に加える力を間接的に制御する方法である [1]。以下では機械インピーダンスについて概説した後、まず 1 自由度系の場合のインピーダンス制御について説明し、ついで多自由度ロボットアームの場合のインピーダンス制御について説明する。

(1) 機械インピーダンス

機械インピーダンスは電気回路分野における電気インピーダンスに対応する概念である。電気インピーダンスとは、電気回路の入力端に加えられた電圧に対する電流の流れにくさを表し、直感的には「電気インピーダンス = 電圧/電流」である。これに対応して機械インピーダンスは加えられた力に対する機械系の動きにくさを表し、直感的には「機械インピーダンス = 力/速度」である。たとえば図 1 のように、ばね k とダンパ d によって固定壁に結合された質量 m の車両が直線上をなめらかに動くものとするとき、車両の平衡位置 0 からの変位 x と車両に加わる外力 f との関係は

$$f = m\ddot{x} + d\dot{x} + kx = m\dot{v} + dv + k \int v dt \quad (1)$$

で与えられる。ただし v は速度であり x の時間微分 dx/dt を表す。したがって機械インピーダンスは、質量、ばね、ダンパの特性によって定まり、数学的には v から f への周波数伝達関数に相当する複素インピーダンス

$$Z(j\omega) = mj\omega + d + \frac{k}{j\omega} \quad (2)$$

で記述される。ここで j は虚数単位、 ω は角周波数である。

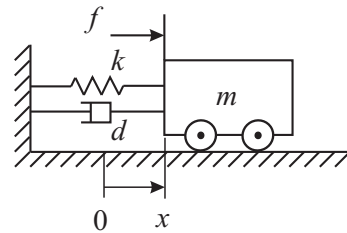


図 1 質量ばねダンパからなる機械系

機械インピーダンスの設計が力の制御を必要とする作業に有効であることを示す例として、RCC (Remote Center Compliance) 装置がある [2]。これは円柱形の軸を公差の小さな穴に挿入するための装置である。ばね要素を用いた巧妙な構造によって、軸の中心線が穴の中心線からずれていてもそのまま RCC 装置をロボットハンドなどで穴の方向に押し込めば、穴の面取り部付近で発生する反力によって自然に中心線が修正され、軸が穴に挿入されるのである。ただし RCC 装置は純粋に機械的な要素を用いているため軸の寸法などが変わると装置自体も作り変える必要があるという点で柔軟性に欠ける。

以下ではロボットのモータへの手先位置や力のフィードバック制御ループを設けることによって、手先の見かけ上の機械インピーダンスをソフトウェア的に望ましいものに変える方法について述べる。なお、RCC 装置のように機械的要素を用いる方法は受動インピーダンス法、フィードバック制御ループを通じてモータの駆動力を用いる方法は能動インピーダンス法と呼ばれる。

(2) 1 自由度系のインピーダンス制御

図 2 のように車輪駆動モータをもつ車両の場合を例にとり、1 自由度系の能動インピーダンス制御法を説明しよう。この力学系の運動方程式が

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + kx = f + f_u \quad (3)$$

で与えられるものとする。ここで f_u はモータによってシステムに加えられる駆動力である。

この系の外力に対する望ましい機械インピーダンス特性が

$$m_d\ddot{x}_e + d_d\dot{x}_e + k_dx_e = f, \quad x_e = x - x_d \quad (4)$$

で与えられるものとする。ここで m_d , d_d , k_d は望ましい質量、減衰係数、ばね定数であり、 x_d は目標位置軌道である。これを実現する駆動力 f_u を与える制御則は、外力 f が測定できる場合については (4) の \ddot{x} を (3) に代入することによって

$$f_u = \left(\frac{m}{m_d} - 1\right)f - \frac{m}{m_d}(d_d\dot{x}_e + k_dx_e) + (d\dot{x} + kx) \quad (5)$$

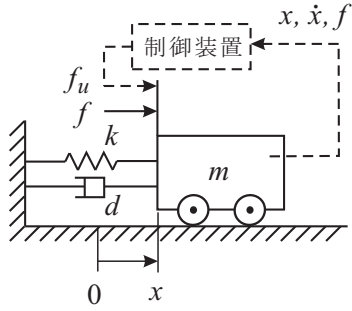


図2 1自由度系の例

で与えられる。

以上の議論から任意に与えられたパラメータ m_d, d_d, k_d に対して理想特性(??)を実現できることがわかった。残る課題はいかにこれらのパラメータを選定するかである。以下に代表的な場合について選定例を示そう。

まず系が対象物や障害物と接触せずに自由運動する場合には物体の位置をなるべく速やかに目標軌道に追従させることが主な目的となる。たとえば $m_d = m$ とすると f の情報が不要となり、(??)の固有角周波数 $\omega_C = \sqrt{k_d/m_d}$ をなるべく大きくし、減衰係数 $\xi = d_d/(2\sqrt{m_d k_d})$ を0.7~1.0と選定すれば、 x が適切な減衰振動のもとに速やかに x_d に収束する。また系が対象物や障害物と接触して拘束された状態で運動する場合には接触力を小さくしたり、目標値に合わせたりすることが主な目的となる。接触力を小さくするには、 m_d, k_d をなるべく小さくし、 d_d を ξ が0.7~1.0となるようにすればよい。また対象物や障害物に一定の目標とする力 f_d を加えたい場合には、目標位置 x_d を対象物の表面から f_d/k_d だけ内部に入り込ませればよい。

(3) 多自由度ロボットアームのインピーダンス制御

多自由度系の代表例として、図??に示すような直列駆動型6関節ロボットアームのインピーダンス制御を考えよう。基準座標系 $\Sigma_R(O_R - X_R Y_R Z_R)$ および手先に固定した手先座標系 $\Sigma_E(O_E - X_E Y_E Z_E)$ を図のように定め、 Σ_E の目標位置姿勢を表す座標系を Σ_{Ed} とする。以下では Σ_E を基準位置とし Σ_{Ed} をばねとダンパに対する目標位置とする目標インピーダンス特性を指定し、それを実現する制御則を導出する。

まずロボットアームの台座に固定された基準座標系 Σ_R から見た手先座標系 Σ_E の位置姿勢を6次元の変数 $r = [p^T \phi^T]^T$ で表現する。ただし p は Σ_E の原点位置、 $\phi = [\phi \theta \psi]^T$ は Σ_E の姿勢のロール・ピッチ・ヨー角表現である。同様に Σ_{Ed} の位置姿勢を $r_d = [p_d^T \phi_d^T]^T$ とする。さらに Σ_E と Σ_{Ed} は互いに近い位置姿勢に

あって、ともに表現上の特異姿勢を取らない(すなわち $|\theta| \neq \pi/2, |\theta_d| \neq \pi/2$ を満たす)ものとする。

以上の準備のもとに、ロボットの動特性を r で表現しよう。まず運動学特性が

$$r = \hat{f}_r(q), \quad \dot{r} = J_r \dot{q} \quad (6)$$

で与えられるものとする。ただし $\hat{f}_r(q)$ は r と6次元の関節変数 q の関係を表す非線形関数であり、 J_r は対応するヤコビ行列である。またロボットの動特性は関節変数 q と関節駆動力 τ を用いて

$$M\ddot{q} + h + g = \tau + J_r^T f \quad (7)$$

で与えられるものとする。ここで $M(q)$ は慣性行列、 $h(q, \dot{q})$ は遠心力とコリオリ力、 $g(q)$ は重力、 f は手先に加わる外力を一般化座標 r に対応する一般化力で表現したものである。すると J_r が正則となる q においては(??)は手先変数 r を用いた表現

$$M_r \ddot{r} + h_r + g_r = J_r^{-T} \tau + f \quad (8)$$

に変換できる。ただし $J_r^{-T} = (J_r^{-1})^T$, $M_r = J_r^{-T} M J_r^{-1}$, $h_r = J_r^{-T} h - M_r \dot{J}_r \dot{q}$, $g_r = J_r^{-T} g$ である。

さて(??)に対する理想インピーダンス特性が

$$M_d \ddot{r}_e + D_d \dot{r}_e + K_d r_e = f, \quad r_e = r - r_d \quad (9)$$

で与えられるものとする。ここで M_d, D_d, K_d は理想特性の慣性行列、粘性係数行列、ばね係数行列である。この理想特性を実現する制御則は f が測定できる場合には、(??)の \ddot{r} を(??)に代入し、整理することにより

$$\tau = M J_r^{-1} \{ M_d^{-1} (f - D_d \dot{r}_e - K_d r_e) - \dot{J}_r \dot{q} \} - J_r^T f + h + g \quad (10)$$

で与えられる。

理想特性(??)のパラメータ M_d, D_d, K_d は作業内容に応じて定めることができる。たとえば外部拘束の方向が目標手先座標系のいずれかの軸方向とほぼ一致して

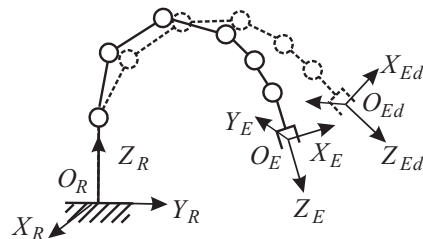


図3 6関節ロボットアーム

いる場合には M_d , D_d , K_d を対角行列とし、外部拘束の状況に応じて \mathbf{r} の各変数毎に 1 自由度系の場合と同様に定めればよい。

以上の方法の問題点としては、手先姿勢の表現に ϕ を用いているため表現上の特異姿勢が生じ得ること、および Σ_R と Σ_E の 3 軸方向が異なる場合に回転のインピーダンスの設定が ϕ の値によって定まる斜交座標系での設定になることが挙げられる。これらの問題点への対応策であるが、与えられた作業実行中を通じて必要な手先姿勢に対するロール・ピッチ・ヨー角 ϕ がある一定値 ϕ_s に近い場合には、原点位置が Σ_R に等しく姿勢が ϕ_s で与えられる直交座標系 Σ_{R_s} を Σ_R に代わる新たな基準座標系とすればよい。また、手先姿勢から見て一定のインピーダンス特性を持たせたい場合や、与えられた作業の実行中に必要な手先姿勢が大きく変化して表現上の特異姿勢が問題になる可能性がある場合に対しては、表現上の特異姿勢の問題点を持たないように手先座標系の角速度ベクトルを基本的な変数に取り、加速度分解法を利用して望みのインピーダンスを実現する方法も提案されている [3]。

6.4.3 位置と力のハイブリッド制御法

前項のインピーダンス制御法は、基本的には手先座標系で表現したインピーダンス特性を目標特性に一致させるために、全方向に関して \mathbf{r} に対する位置制御則を用いるものである。これに対し本項で説明するハイブリッド制御法は、手先の位置制御方向と力制御方向を明確に区別し力制御方向には力制御則を用いる方式である。以下ではまず位置方向と力方向の目標値からの誤差をフィードバックする誤差フィードバック制御法について説明し、ついでロボットの動特性を考慮してこれを補償する動的ハイブリッド制御法について説明する。

(1) 誤差フィードバックによるハイブリッド制御法

ハイブリッド制御法は Raibert と Craig によって提案された [4]。これはロボット手先の位置と手先が対象物に加える力の目標値からの誤差を関節変数レベルでフィードバックして目的を達成しようとする直観的な方法である。

図 ?? に示すような平面内を動く 2 自由度アームの手先を、斜線を施した対象物のなめらかな表面に接触させた状態で、面に沿う方向には指定された目標軌道に沿って移動させると同時に、垂直な方向には指定された目標力で押しつけたい場合を考える。このような状況を扱うためには、 X_C が位置制御方向を、 Y_C が力制御方向を指すような座標系 $\Sigma_C(O_C - X_C Y_C)$ を定めるのが便利である。座標系 Σ_C は拘束座標系と呼ばれる。この

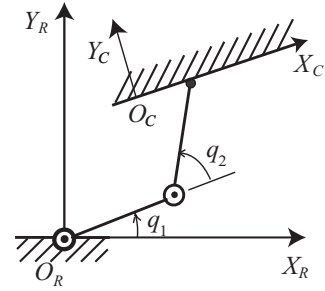


図 4 ハイブリッド制御法

Σ_C から見た手先位置を ${}^C\mathbf{r}$ とし、手先速度 ${}^C\dot{\mathbf{r}}$ と関節速度 $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_1 \ \dot{q}_2]^T$ の関係が、ヤコビ行列 \mathbf{J}_C を用いて ${}^C\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{J}_C \dot{\mathbf{q}}$ と表せるものとする。またロボットに取り付けた位置センサと力センサで Σ_C 座標系から見た手先位置 ${}^C\mathbf{r}(t)$ と押しつけ力 ${}^C\mathbf{f}(t)$ が計測できるものとする。

まず、手先位置および押しつけ力の目標軌道を ${}^C\mathbf{r}_d(t)$ および ${}^C\mathbf{f}_d(t)$ とし、それらの方向性を考えた誤差を

$${}^C\mathbf{r}_e = \mathbf{S}_P({}^C\mathbf{r}_d - {}^C\mathbf{r}) \quad (11)$$

$${}^C\mathbf{f}_e = \mathbf{S}_F({}^C\mathbf{f}_d - {}^C\mathbf{f}) \quad (12)$$

によって求める。ここで \mathbf{S}_P は位置制御方向選択行列、 \mathbf{S}_F は力制御方向選択行列と呼ばれ、

$$\mathbf{S}_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_F = \mathbf{I} - \mathbf{S}_P = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

で与えられる。したがって (??) は手先位置誤差の X_C 軸方向成分のみを取り出し、(??) は力誤差の Y_C 軸方向成分のみを取り出す操作を意味する。

次に、これらの誤差を減少させるためのフィードバック制御則を関節変数空間で与える。 ${}^C\mathbf{r}_e$ に対応する関節角誤差 \mathbf{q}_e およびその微分 $\dot{\mathbf{q}}_e$ は $\mathbf{q}_e \cong \mathbf{J}_C^{-1} {}^C\mathbf{r}_e$ および $\dot{\mathbf{q}}_e = \mathbf{J}_C^{-1} {}^C\dot{\mathbf{r}}_e$ で与えられ、 ${}^C\mathbf{f}_e$ に対応する関節駆動力誤差 $\boldsymbol{\tau}_e$ は、 $\boldsymbol{\tau}_e = \mathbf{J}_C^T {}^C\mathbf{f}_e$ で与えられる。これらの関節角誤差および力誤差を補償するための関節駆動力 $\boldsymbol{\tau}_P$ および $\boldsymbol{\tau}_F$ をそれぞれ適当なフィードバック制御則より求める。たとえば PD (比例および微分) 動作による位置制御則

$$\boldsymbol{\tau}_P = \ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{K}_{Pd}\dot{\mathbf{q}}_e + \mathbf{K}_{Pp}\mathbf{q}_e \quad (14)$$

と I (積分) 動作による力制御則

$$\boldsymbol{\tau}_F = \boldsymbol{\tau}_d + \mathbf{K}_{Fi} \int_0^t \boldsymbol{\tau}_e(t') dt' \quad (15)$$

を取ればよい。ただし \mathbf{K}_{Pp} , \mathbf{K}_{Pd} , \mathbf{K}_{Fi} は正定対称なフィードバックゲイン行列であり、 $\ddot{\mathbf{q}}_d = \mathbf{J}_C^{-1} \mathbf{S}_P {}^C\ddot{\mathbf{r}}_d$

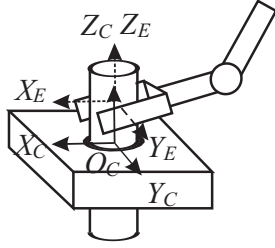


図5 軸挿入作業に対する拘束座標系の例

および $\tau_d = J_C^T S_F^C f_d$ は目標軌道を考慮したフィードフォワード項である。そしてこれらの和

$$\tau = \tau_P + \tau_F \quad (16)$$

を各関節に加えれば目標とする位置と力がほぼ達成されると期待できるというのが誤差フィードバックによるハイブリッド制御法である。

以上は2自由度アームの場合であったが、高自由度のアームについても同様な制御則が得られることを6関節アームの場合について以下に示そう。

まず実行したい作業に対して拘束座標系を設定する方法を、図??に示す軸挿入作業を例にとって説明する。円柱の軸は公差の小さな丸穴に挿入され穴の中でなめらかに運動でき、ロボットは軸をしっかりと握っているものとする。この場合にはたとえば図に示すように丸穴の中心線上の適当な位置に原点 O_C をもち、穴の中心線方向に Z_C 軸、それと右手系をなすように X_C 軸、 Y_C 軸をもつ直交座標系 $\Sigma_C(O_C - X_C Y_C Z_C)$ を拘束座標系とすればよい。すると Z_C 軸に沿う並進と Z_C 軸まわりの回転のみが位置制御方向となり、それ以外の X_C 、 Y_C 軸に沿う並進と X_C 、 Y_C 軸まわりの回転の方向が力制御方向となる。したがってこの場合の S_P および S_F は

$$S_P = \text{diag}\{0, 0, 1, 0, 0, 1\}, S_F = I - S_P \quad (17)$$

で与えられる。ただし $\text{diag}\{\}$ は $\{\}$ 内の要素を対角要素として持ち他の要素が全て0の対角行列を意味する。

なお、 Σ_C に関連して以下の点を補足しておく。現在時刻における Σ_C で表した手先の速度と角速度を ${}^C v = [v_x \ v_y \ v_z \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ 、手先がハンドルに加える力とモーメントを ${}^C f = [f_x \ f_y \ f_z \ n_x \ n_y \ n_z]^T$ と置こう。すると上述の軸挿入作業の場合には、位置に関する拘束条件から必然的に $v_x = v_y = \omega_x = \omega_y = 0$ となるとともに、これらの方向にはロボットから任意の力 $f_x = f_{x0}$ 、 $f_y = f_{y0}$ 、 $n_x = n_{x0}$ 、 $n_y = n_{y0}$ (f_{x0} 、 f_{y0} 、 n_{x0} 、 n_{y0} は任意定数) を加えることができる。また v_z と ω_z 方向には位置の拘束がないので任意の運動 $v_z = v_{z0}$ 、 $\omega_z = \omega_{z0}$ (v_{z0} 、 ω_{z0} は任意定数) を行

うことができる。このことから $v_x = v_y = \omega_x = \omega_y = 0$ 、 $f_z = n_z = 0$ は自然拘束、 $v_z = v_{z0}$ 、 $\omega_z = \omega_{z0}$ 、 $f_x = f_{x0}$ 、 $f_y = f_{y0}$ 、 $n_x = n_{x0}$ 、 $n_y = n_{y0}$ は人工拘束と呼ばれる。

以上の準備のもとに6自由度アームのハイブリッド制御則を与えよう。まず図??に示すようにハンドで把持した軸が穴に理想的に挿入された状態で Σ_C と Σ_E の3軸方向が合致するように Σ_E の3軸方向を定める。また手先速度 ${}^C v$ と関節速度 \dot{q} との間のヤコビ行列 J_C を求める。そして(??)から(??)までと同様な議論を行い、それらをまとめるとハイブリッド制御則が

$$\begin{aligned} \tau = & J_C^{-1} S_P^C \ddot{r}_d + K_{Pd} J_C^{-1} S_P ({}^C \dot{r}_d - {}^C \dot{r}) \\ & + K_{Pp} J_C^{-1} S_P ({}^C r_d - {}^C r) + J_C^T S_F^C f_d \\ & + K_{Fi} \int_0^t J_C^T S_F ({}^C f_d(t') - {}^C f(t')) dt' \end{aligned} \quad (18)$$

で与えられる。ただし ${}^C r$ としては、 Σ_C から見た Σ_E の原点位置ベクトル ${}^C p$ と Σ_E のロール・ピッチ・ヨー角表現 ${}^C \phi = [\phi \ \theta \ \psi]^T$ (X 、 Y 、 Z 軸周りの順) を用いて、 ${}^C r = [{}^C p^T \ {}^C \phi^T]^T$ を選ぶ。その理由は以下の通りである。上式右辺第2項の $({}^C \dot{r}_d - {}^C \dot{r})$ は前述の拘束座標系の考え方に従えば $({}^C v_d - {}^C v)$ で与えられるべきものであるが、 ${}^C v$ 中の角速度成分 $[\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ の積分に厳密に対応する姿勢の表現法が存在しないため右辺第3項の姿勢表現項と整合させることができない。この困難に対処するための一方法として上記の ${}^C r$ を取った。こうすれば ${}^C \phi$ の時間微分 ${}^C \dot{\phi}$ と角速度ベクトル ${}^C \omega$ の関係が

$${}^C \omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sin \theta \\ 0 & \cos \theta & -\sin \phi \cos \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} {}^C \dot{\phi} \quad (19)$$

で与えられるので、少なくとも ${}^C \phi \simeq 0$ のときには ${}^C \dot{r} \simeq {}^C v$ が成立するからである。

(2) 動的ハイブリッド制御

前項のハイブリッド制御法ではアームの動特性を考慮していない。また手先が対象物と2箇所接触する場合などのように、直交型拘束座標系を定義することが困難な作業も存在する。本項ではより一般的な拘束が記述でき、アームの動特性を正確に補償する動的ハイブリッド制御法について述べる [5, 6]。

動的ハイブリッド制御法ではまず直交型拘束座標系に代わって、手先が対象物から受ける拘束を大局的に反映した作業座標系(一般的には曲線座標系)を定める。ついでアームの動特性をこの作業座標系で記述し、さらに位置制御方向と力制御方向に線形非干渉化する。最後に

これら2つの方向に適当なサーボ補償制御則を与える。以上の手順によって目標位置軌道と目標力軌道への収束性が保証された制御系が構成される。

以下では図??に示すような6関節アームの手先を対象物の滑らかな曲面に押し付けて動かす場合を例にとって説明しよう。まず手先が受ける拘束が基準座標系 Σ_R から見た Σ_E の6次元位置姿勢ベクトル \mathbf{r} を用いて、 \mathbf{r} が m 個の超曲面

$$\mathbf{s}_F(\mathbf{r}) = \mathbf{0} \quad (20)$$

に拘束されているという形で記述できるものとする。ここで $\mathbf{s}_F(\mathbf{r})$ は m 次元 ($6 \geq m \geq 1$) の関数である。そして手先が拘束を受けながら運動するときの手先位置姿勢が $(6-m)$ 次元の関数

$$\mathbf{r}_{GP} = \mathbf{s}_P(\mathbf{r}) \quad (21)$$

で表現できるものとする。ただし $\mathbf{s}_F(\mathbf{r})$ および $\mathbf{s}_P(\mathbf{r})$ の計6つの要素はいずれも、目的とする作業に必要な \mathbf{r} を含む(6次元ユークリッド空間の)ある部分領域 S で定義された2回微分可能な関数であり、互いに一次独立であると仮定する。また部分領域 S は手先姿勢の表現上の特異姿勢を含まないものとする。

さて $\mathbf{r}_{GF} = \mathbf{s}_F(\mathbf{r})$ と置き、 \mathbf{r}_{GP} と合わせて $\mathbf{r}_G = [\mathbf{r}_{GP}^T \ \mathbf{r}_{GF}^T]^T = [\mathbf{s}_P^T(\mathbf{r}) \ \mathbf{s}_F^T(\mathbf{r})]^T$ と表示する。すると \mathbf{r}_G は \mathbf{r} に代わる手先位置の一般化座標の役割を果たす。また運動学特性 $\mathbf{r} = \hat{\mathbf{f}}_r(\mathbf{q})$ を用いれば

$$\mathbf{r}_G = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_P(\hat{\mathbf{f}}_r(\mathbf{q})) \\ \mathbf{s}_F(\hat{\mathbf{f}}_r(\mathbf{q})) \end{bmatrix} = \hat{\mathbf{f}}_G(\mathbf{q}) \quad (22)$$

と表せ、これを微分すると $\dot{\mathbf{r}}_G = \mathbf{J}_G \dot{\mathbf{q}}$ が得られる。ただし \mathbf{J}_G はヤコビ行列である。さらに \mathbf{J}_G を $\mathbf{J}_G = [\mathbf{J}_{GP}^T \ \mathbf{J}_{GF}^T]^T$ と表現するとき、(??)より

$$\dot{\mathbf{r}}_G = \mathbf{J}_G \dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{GP} \\ \mathbf{J}_{GF} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}}_{GP} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (23)$$

が成立する。また一般化座標 \mathbf{r}_G に対応する一般化力を $\mathbf{f}_G = [\mathbf{f}_{GP}^T \ \mathbf{f}_{GF}^T]^T$ とすると、 \mathbf{f}_G と関節駆動力 $\boldsymbol{\tau}$ の

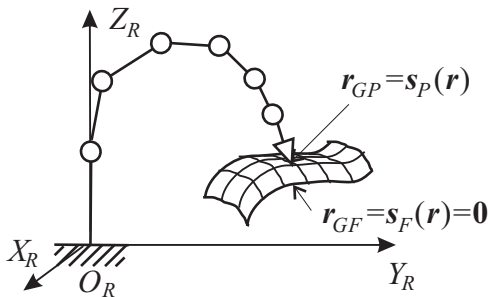


図6 動的ハイブリッド制御法

間に $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}_G^T \mathbf{f}_G$ という関係が成立する。なお $\dot{\mathbf{r}}_G$ の $\dot{\mathbf{r}}$ に関するヤコビ行列を \mathbf{J}_{Gr} とするとき、 $\dot{\mathbf{r}}$ の $\dot{\mathbf{q}}$ に関するヤコビ行列 \mathbf{J}_r を用いて \mathbf{J}_G が $\mathbf{J}_G = \mathbf{J}_{Gr} \mathbf{J}_r$ で与えられることに注意されたい。

つぎに位置制御方向と力制御方向に分割した形で線形非干渉化するための制御則を与えよう。アームの動特性は(??)と同様に

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h} + \mathbf{g} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}_{GF}^T \mathbf{f}_{GF} \quad (24)$$

で与えられるものとする。このアームに線形非干渉化補償器として

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_P + \boldsymbol{\tau}_F \quad (25)$$

$$\boldsymbol{\tau}_P = \mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}}_P + \mathbf{h} + \mathbf{g}, \quad \boldsymbol{\tau}_F = \mathbf{J}_{GF}^T \mathbf{u}_F \quad (26)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_P = \mathbf{J}_G^{-1} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{u}_P \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} - \dot{\mathbf{J}}_G \dot{\mathbf{q}} \right) \quad (27)$$

を用いると(??), (??)より

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_P - \ddot{\mathbf{r}}_{GP} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{GP} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}_{GF}^T (\mathbf{u}_F - \mathbf{f}_{GF}) \\ \mathbf{J}_{GF} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}_{GF}^T (\mathbf{u}_F - \mathbf{f}_{GF}) \end{bmatrix} \quad (28)$$

が成り立つ。そして $\mathbf{J}_{GF} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}_{GF}^T$ が正則であることから、線形化補償器適用後のシステムの動特性が

$$\ddot{\mathbf{r}}_{GP} = \mathbf{u}_P, \quad \mathbf{f}_{GF} = \mathbf{u}_F \quad (29)$$

という線形非干渉系になり、 \mathbf{r}_{GP} の位置制御と \mathbf{f}_{GF} の力制御を別個に行えることが分かる。

最後に位置制御と力制御のためのサーボ補償制御則を与える。たとえば、位置サーボ補償器としてPD制御則

$$\mathbf{u}_P = \ddot{\mathbf{r}}_{GPd} + \mathbf{K}_{Pd}(\dot{\mathbf{r}}_{GPd} - \dot{\mathbf{r}}_{GP}) + \mathbf{K}_{Pp}(\mathbf{r}_{GPd} - \mathbf{r}_{GP}) \quad (30)$$

を用い、力サーボ補償器としてI制御則

$$\mathbf{u}_F = \mathbf{f}_{GFd} + \mathbf{K}_{Fi} \int_0^t (\mathbf{f}_{GFd}(t') - \mathbf{f}_{GF}(t')) dt' \quad (31)$$

を用いるとよい。ただし \mathbf{r}_{GPd} は目標位置軌道、 \mathbf{f}_{GFd} は目標力軌道である。このとき位置偏差を $\mathbf{r}_{GPe} = \mathbf{r}_{GPd} - \mathbf{r}_{GP}$ とし力偏差を $\mathbf{f}_{GFe} = \mathbf{f}_{GFd} - \mathbf{f}_{GF}$ とすると、閉ループ系の特性は

$$\ddot{\mathbf{r}}_{GPe} + \mathbf{K}_{Pd} \dot{\mathbf{r}}_{GPe} + \mathbf{K}_{Pp} \mathbf{r}_{GPe} = \mathbf{0} \quad (32)$$

$$\dot{\mathbf{f}}_{GFe} + \mathbf{K}_{Fi} \mathbf{f}_{GFe} = \mathbf{0} \quad (33)$$

となる。したがって $\mathbf{K}_{Pp}, \mathbf{K}_{Pd}, \mathbf{K}_{Fi}$ が正定対称であれば $t \rightarrow \infty$ のとき

$$\mathbf{r}_{GP} \rightarrow \mathbf{r}_{GPd}, \quad \mathbf{f}_{GF} \rightarrow \mathbf{f}_{GFd} \quad (34)$$

が成立し, (??), (??), (??), (??), (??) で与えられるハイブリッド制御則によって位置軌道と力軌道の目標軌道への収束が実現されることが示された。

なお, 本定式化の基礎となる (??) の $\mathbf{s}_F(\mathbf{r})$ と (??) の $\mathbf{s}_P(\mathbf{r})$ の選び方の一例を, 図 ?? に示すような平面 2 関節アームの手先で, 中心位置が $\mathbf{r}_0 = [r_{0x} \ r_{0y}]^T$ で半径が R の円板を扱う場合について与えておこう。この場合にはたとえば

$$\mathbf{s}_F(\mathbf{r}) = R - \sqrt{(r_x - r_{0x})^2 + (r_y - r_{0y})^2} \quad (35)$$

$$\mathbf{s}_P(\mathbf{r}) = \arg\{(r_x - r_{0x}) + i(r_y - r_{0y})\} \quad (36)$$

ととればよい。ただし \arg は偏角を表す。これは図に示すような曲線座標系を定めたことに対応する。そして

$$\mathbf{J}_{Gr} = \begin{bmatrix} -(r_x - r_{0x})/R_r & -(r_y - r_{0y})/R_r \\ -(r_y - r_{0y})/R_r^2 & (r_x - r_{0x})/R_r^2 \end{bmatrix} \quad (37)$$

が得られる。ただし $R_r = \sqrt{(r_x - r_{0x})^2 + (r_y - r_{0y})^2}$ である。またロボットアームの関節変数 \mathbf{q} と手先変数 \mathbf{r} の関係

$$\mathbf{r} = \hat{\mathbf{f}}_r(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} l_1 C_1 + l_2 C_{12} \\ l_1 S_1 + l_2 S_{12} \end{bmatrix} \quad (38)$$

から

$$\mathbf{J}_r = \begin{bmatrix} -l_1 S_1 - l_2 S_{12} & -l_2 S_{12} \\ l_1 C_1 + l_2 C_{12} & l_2 C_{12} \end{bmatrix} \quad (39)$$

が得られる。ただし $S_1 = \sin q_1$, $C_1 = \cos q_1$, $S_{12} = \sin(q_1 + q_2)$ などとしている。さらに $\mathbf{J}_G = \mathbf{J}_{Gr} \mathbf{J}_r$ によって \mathbf{J}_G が算出でき, これを用いてハイブリッド制御則が計算できる。

6.4.4 まとめ

本節ではロボットの力制御のための代表的な方法であるインピーダンス制御法とハイブリッド制御法の基本的考え方とその定式化に焦点を絞って解説した。力制御に関連する多様な考え方や歴史について知りたい読者にはまずは [7] およびその中で引用されている参考文献を見ら

れることをお勧めする。また多指ハンドによる物体の操りにおける力制御については [8] が参考になろう。

<吉川恒夫>

参考文献

- [1] N. Hogan, Impedance Control; An Approach to Manipulation, Parts I ~III, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 107, No. 1, p.1-24 (1985)
- [2] T.L. De Fazio, D.S. Seltzer, and D.E. Whitney: The Instrumented remote center compliance, The Industrial Robot, vol.11, No. 4, December, p.238-242 (1982)
- [3] F. Caccavale et al: Six-DOF Impedance Control Based on Angle/Axis Representations, IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.15, no.2, pp.289-300 (1999)
- [4] M.H. Raibert and J.J. Craig : Hybrid Position/Force Control of Manipulators, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 103, 2, p.126-133 (1981)
- [5] T. Yoshikawa: Dynamic Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators — Description of Hand Constraints and Calculation of Joint Driving Force, IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA-3, no.5, pp.386-392 (1987)
- [6] T. Yoshikawa, T. Sugie, and M. Tanaka: Dynamic Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators — Controller Design and Experiment, IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA-4, no.6, pp.699-705 (1988)
- [7] L.Villani and J. De Schutter: Force Control, in: B. Siciliano and O. Khatib Eds., Springer Handbook of Robotics, Springer-Verlag, Berlin (2008), pp.161-185
- [8] T. Yoshikawa: Multifingered Robot Hands: Control for Grasping and Manipulation, Annual Reviews in Control, vol. 34, pp.199-208 (2010)

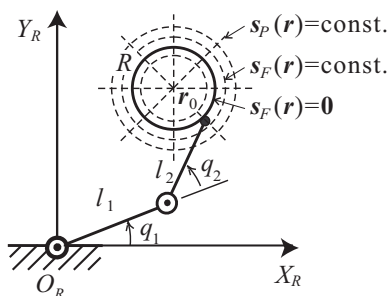


図 7 2 自由度アームによる曲面做い