力制御法の分類と制御システムの設計法

小 菅 一 弘*

1. はじめに

産業用ロボット（マニピュレータ）の発展は目ざましく、塗装・溶接・シーリングなど、様々な作業に応用されている。このような作業では、エンド・エフェクタの軌跡（位置と姿勢）をいかにして高精度に制御するかが問題であり、マニピュレータのサーボ剛性を上げ、外乱に対してマニピュレータを堅く制御することに努力が払われてきた。

バリ取り作業・研磨作業・組立作業といった、マニピュレータと作業環境とが機械的に干渉するような、より一般的な作業を行う場合には、マニピュレータのサーボ剛性を上げ、マニピュレータを外力に対して堅く制御すると、マニピュレータや作業対象が破損してしまう恐れがあるため、目的に合わせて、どのようにマニピュレータを柔らかく制御するかということが問題となる。

一般に、マニピュレータと作業環境との間に生じる干渉力を考慮して、マニピュレータを柔らかく制御することを、“Compliant Motion Control” という¹⁾。マニピュレータを柔らかく制御するということは、結果的に、マニピュレータと作業環境との間に生じる力を、直接的あるいは間接的に制御することになるので、Compliant Motion Control のことを力制御ということも多い。

RCC (Remote Center Compliance)²⁾ デバイスのように、エンド・エフェクタに、マニピュレータと作業環境とのインターフェイス機能を持たせ、マニピュレータは位置決め装置として用いることも多いが、こうしたエンド・エフェクタは、特定の作業にしか用いることができないし、また、RCC デバイスのように、正常に機能させるにはその姿勢に限られるなど問題も多く、より一般的な作業を行うには、マニピュレータそのものの Compliant Motion Control が必要になる。

Compliant Motion Control に関する研究はいろいろと行われてきたが、残念ながら実用化されている例は少

ない。Compliant Motion Control を必要とするような作業は解析が難しく、その作業を行うのに必要な制御戦略を立てることが困難であり、これが Compliant Motion Control の実用化を妨げている一因でもある。本稿では、Compliant Motion Control (以下、本稿では力制御と呼ぶことにする) を整理し、代表的な制御アルゴリズムを紹介するとともに、Compliant Motion Control に関する問題点や最近の話題について考えてみたい。

2. 力制御の分類

マニピュレータの力制御アルゴリズムを考える。制御アルゴリズムという観点から見ると、マニピュレータの力制御 (Compliant Motion Control) は、以下の2つのカテゴリーに分類できる。

(1) 直接的力制御：狭義の力制御で、マニピュレータと作業環境との間に生じる力が、予め与えた目標値と等しくなるように、力を直接制御する方法。

(2) 間接的力制御：マニピュレータに加わる力とマニピュレータの運動との関係を制御することによって、間接的に、マニピュレータと作業環境との間に生じる干渉力を制御する方法。

(1) の制御系としては、力だけを制御することは少なく、位置と力を、幾何学的拘束条件に基づき、矛盾ないように同時に制御する。位置と力のハイブリッド制御が一般的である。(2) の制御系としては、それぞれ位置と力の関係、速度と力の関係、位置・速度・加速度と力の関係を制御する。Stiffness Control¹⁾、Damping Control¹²⁾、Impedance Control¹³⁾ 等がある。以下、順に、代表的な制御アルゴリズムについて解説する。

3. 直接的力制御

3.1 力制御の基本

まず最初に、マニピュレータの関節トルクとマニピュ

¹⁾ 位置制御や力制御の「位置」と「力」は、一般に、それぞれ「位置と姿勢」、「力とモーメント」を意味することが多い。本稿でも、「力」は、力とモーメントを意味し、「位置」は位置と姿勢を意味するものとする。

レータの先端に働く力の関係を求めよう。図1に示すような、多関節型マニピュレータについて考えよう。議論を簡単にするため、ここでは、マニピュレータは冗長自由度を持たないとする。

マニピュレータの各関節にアクチュエータによって加えられる入力トルクを τ_i とし、各関節の変位を θ_i とする。作業座標系の中で、マニピュレータ先端のエンド・エフェクタの位置・姿勢が、

$$x = T(\theta) \quad (1)$$

ただし

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (2)$$

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T \quad (3)$$

と表せるとする。

マニピュレータ先端のエンド・エフェクタに力 F を発生させるのに必要な各関節のトルク

$$\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T \quad (4)$$

を求める問題を考える。

マニピュレータの各関節ならびに先端の仮想変位をそれぞれベクトルで、 $\delta\theta$, δx と表すと、仮想仕事の原理から

$$\tau^T \delta\theta - F^T \delta x = 0 \quad (5)$$

が成り立つことがわかる。また、(1)式から、

$$\delta x = J \delta\theta \quad (6)$$

$$J = \partial T / \partial \theta \quad (7)$$

が成り立つから、(5)式に代入すると

$$\tau^T \delta\theta - F^T J \delta\theta = (\tau - J^T F)^T \delta\theta = 0 \quad (8)$$

となる。(8)式で、 $\delta\theta$ は任意の値を取り得るから

$$\tau = J^T F \quad (9)$$

が成り立つ。

エンド・エフェクタが環境によって完全に拘束されている場合、マニピュレータの各関節に、等価的に(9)式のトルク τ を加えれば、その先端のエンド・エフェクタに力 F が発生できるということがわかる。関節に加えるトルクが、マニピュレータ先端で発生する力になるというのが、力制御の基本である。なお、(9)式の関節トルクは、マニピュレータの慣性力・重力・摩擦などに起因するトルクは含まれていない。

2.2 位置と力のハイブリッド制御

(9)式では、マニピュレータの関節トルクと、マニピュレータ先端のエンド・エフェクタが発生する力の関係を求めた。しかし、マニピュレータを用いて実際に作業を行う場合、エンド・エフェクタと作業環境との間に働く力だけを制御すればよいことは少なく、位置と力を競合しないように制御しなければならない場合がほとんどである。図2に一例を示すが、作業環境(作業対象)によってエンド・エフェクタが拘束されている方向には

力を、それ以外の方向では、エンド・エフェクタの位置・姿勢を制御することを位置と力のハイブリッド制御という。

位置と力のハイブリッド制御アルゴリズムは、RaibertとCraigによって提案された⁴⁾。ハイブリッド制御の基本的な考え方は、Maisonの研究にも見ることができ¹⁾。

RaibertとCraigのアルゴリズムは、力学的・制御理論的に厳密ではなく、いろいろな意味で問題が多い。この問題は、その後、多くの研究者によって力学的・制御理論的に研究されてきた^{6)~9)}。ここでは、Khatibの制御アルゴリズムを紹介しよう。

よく知られているように、図1に示すような、 n 自由度の剛体リンクからなる多関節型マニピュレータのダイナミクスは次式で表すことができる。

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) \quad (10)$$

ここで、 θ , τ はそれぞれ(3)式、(4)式で表され、関節の変位ならびに関節への入力トルクベクトルであり、 $M(\theta)$ は、 $n \times n$ の慣性行列、 $h(\theta, \dot{\theta})$ は、コリオリ力、求心力、重力、粘性摩擦力などからなる非線形項である。

図1 多関節型マニピュレータの関節トルクと先端の力

図2 力と位置のハイブリッド制御

図3 Khatibのハイブリッド制御系

図4 剛性制御の考え方

図5 剛性制御系の構成

いま、マニピュレータの作業座標 x を考え、 x と θ との関係が (1) 式で表されたとする。作業座標 x は、議論を簡単にするため、図2に示すように、拘束座標系とし、そのなかの特定の座標のみが作業対象から拘束を受けるように選んであるとする（より一般的な場合については、5）を参照のこと）。

拘束を受ける座標に対応する要素が1でそれ以外の要素が0の n 次の対角行列を S と考えると、拘束を受ける座標は Sx で表され、拘束を受けない座標は $(I-S)x$ で表すことができる⁴⁾。 I は n 次の単位行列である。

ハイブリッド制御問題では、マニピュレータが作業対象から拘束を受ける座標 Sx では力制御を行い、拘束を受けない座標 $(I-S)x$ では位置制御を行うことになる。

ダランベール原理と仮想仕事の原理を用いて (10) 式を作業座標系で書き直すと、

$$F = A\ddot{x} + \Gamma \quad (11)$$

$$A = J^{-T} M J^{-1} \quad (12)$$

$$\Gamma = J^{-T} M J^{-1} \dot{J} \dot{\theta} + J^{-T} h \quad (13)$$

となる。(11) 式は、マニピュレータのダイナミクスを考慮して、(9) 式を書き直したものと考えることがで

きる。なお、考えている作業領域の中では、 J は正則 ($\text{rank} J = n$) と仮定する。また、 $-T$ は、転置行列の逆行列を表す。 F は、作業座標で考えたマニピュレータへの入力であり、 F と τ には (9) 式の関係が成り立つ。

まず、座標 Sx における力制御について考えよう。

(11) 式の両辺に左から S をかけ、拘束を受けている方向のマニピュレータ先端の加速度 $S\ddot{x}$ は零であることを利用すると、 Sx 方向の運動方程式として次式を得る。

$$SF = SA(I-S)\ddot{x} + S\Gamma \quad (14)$$

座標 Sx で力制御を行うということは、その方向の力 SF そのものを制御することである。そこで、力の目標値を SF_d とし次式の制御則を考える。

$$SF = S\{F_d + K_f(F_d - F)\} + SA\{(I-S)\ddot{x} + SK_f v \dot{x}\} + S\Gamma \quad (15)$$

(15) 式を (14) 式に代入すると、定常状態で $SF = SF_d$ となることがわかる。速度フィードバック $SK_f v \dot{x}$ は、力制御の過渡的な安定性を向上するための Sx 方向のダンピング項である。また、 $(I-S)\ddot{x}$ は、座標 $(I-S)x$ における位置制御則によって与えられる。

次に、座標 $(I-S)x$ における位置制御について考えよう。加速度分解制御¹⁰⁾の考え方をを用いて、制御系を構成する。マニピュレータの目標軌道を $(I-S)x_d$ とすると、 $(I-S)x$ 方向の加速度を、

$$(I-S)\ddot{x} = (I-S)\ddot{x}_d + K_1(I-S)(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_2(I-S)(x_d - x) \quad (16)$$

と制御することができれば、 $(I-S)x$ 方向の位置制御が可能である。

(11) 式の両辺に $(I-S)$ をかけ、拘束を方向のマニピュレータの加速度 $S\ddot{x}$ は零であることを利用すると、 $(I-S)x$ 方向のマニピュレータの運動方程式を得る。

$$(I-S)F = (I-S)A(I-S)\ddot{x} + (I-S)\Gamma \quad (17)$$

この式から、マニピュレータの先端で、 $(I-S)x$ 方向に (16) 式で表せる加速度を発生するためには、マニピュレータ先端で、 $(I-S)x$ 方向に

$$(I-S)F = (I-S)A\{(I-S)\ddot{x}_d + K_1(I-S)(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_2(I-S)(x_d - x + SK_f v \dot{x})\} + (I-S)\Gamma \quad (18)$$

なる力を発生させればよいことがわかる。速度フィードバック項 $SK_f v \dot{x}$ は (15) 式と同様力制御の過渡的な安定性を方向するためのものである。(17) 式に (18) 式を代入すると、

$$\ddot{e}_p + K_1 \dot{e}_p + K_2 e_p = 0 \quad (19)$$

ただし、

$$e_p = (I-S)(x_d - x) \quad (20)$$

となり、ゲイン行列 K_1, K_2 を、正定な行列とすれば、任意の初期状態 $e_p \neq 0$ に対して、

$$e_p(t) \rightarrow 0, (t \rightarrow \infty)$$

となり、座標 $(I-S)x$ で位置制御ができることがわかる。(15)式に(16)式を代入し、(18)式を加えると、を得

$$\begin{aligned} F = & S\{F_d + K_f(F_d - F)\} + A\{(I-S)\ddot{x}_d \\ & + K_1(I-S)(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_2(I-S)(x_d - x) \\ & + SK_{fv}\dot{x}\} + F \end{aligned} \quad (21)$$

る。マニピュレータの各関節への入力トルクは、(9)式¹⁾を用いて計算できる。制御系の構成を図3に示す。

4. 間接的な力制御

前章では、マニピュレータの関節トルクを用いて、マニピュレータ先端の力を直接制御する方法について紹介した。本章では、マニピュレータの運動と力の関係を制御することによって、間接的に、マニピュレータと作業環境との間に生じる干渉力を制御する問題を考える。

4.1 剛性制御

マニピュレータの位置と力の関係を制御する問題について考えよう。ここでは、Salisbury によって提案された剛性制御 (Stiffness Control¹¹⁾) を紹介する。剛性の逆数がコンプライアンスなので、剛性制御のことをコンプライアンス制御ということもある。

剛性制御は、マニピュレータの各関節のサーボ剛性を調節することによって、マニピュレータのエンド・エフェクタの見かけの剛性を制御しようとする制御アルゴリズムである。図4にその考え方を示す。

(1)式で表される作業座標系を考える。この作業座標系で、マニピュレータ先端のエンド・エフェクタに力 F が加わる場合を考え、このときのエンド・エフェクタの変位を Δx とする。また、この場合、マニピュレータの各関節には、等価的に (9)式で表される外乱トルクが加わることになるので、この外乱トルク τ によって、各関節に変位 $\Delta \theta$ が生じるとする。ここで、 $\Delta \theta$ は、マニピュレータ関節のアクチュエータのサーボ剛性によってきまる。すなわち、関節を駆動するアクチュエータ系のサーボ剛性を行列 K_J で表すと、

$$\tau = K_J \Delta \theta \quad (22)$$

の関係がある。

剛性制御は、マニピュレータ先端の力 F とその変位 Δx との関係を、制御しようとするものである。マニピュレータのエンド・エフェクタに実現したい剛性を行列 K で表すと、

$$F = K \Delta x \quad (23)$$

となるような、サーボ剛性行列 K_J を求めればよい。(9)式を用いて、(23)式を書き直すと、

$$\tau = J^T K \Delta x \quad (24)$$

となる。一方、エンド・エフェクタの微小変位 Δx と、

そのときのマニピュレータの関節の微小変位 $\Delta \theta$ には、(6)式と同様に、

$$\Delta x = J \Delta \theta$$

の関係があるから、これを(23)式に代入して、

$$\tau = (J^T K J) \Delta \theta \quad (25)$$

となる。ヤコビ行列 J は(7)式で与えられる。

(22)式と(25)式から、マニピュレータ先端の K を実現するための、関節アクチュエータのサーボ剛性 K_J は、

$$K_J = J^T K J \quad (26)$$

で与えられることがわかる。(26)式に示すように、関節アクチュエータのサーボ剛性はヤコビ行列 J を含むので、マニピュレータの姿勢に依存することがわかる。実際には、サーボ系へ外乱トルク τ が加わることになるので、制御系を構成するときには、外乱トルクの補償も考える必要がある。図5に Salisbury が提案した制御系を示す。尚、この制御系には、マニピュレータの先端に力センサーを取り付け、その信号を利用した外乱トルク補償のための補償器が組み込まれている。

4.2 ダンピング制御

次に、速度と力の関係を制御するダンピング制御²⁾について考えてみよう。ダンピング制御は、Acomodation サーボとして、Whitney によって提案された¹²⁾。議論を簡単にするため、ここでは、マニピュレータの各関節は正確に速度制御されていると仮定する。

(1)式で表される作業座標系を考える。ダンピング制御は、作業座標系におけるマニピュレータ先端のエンド・エフェクタの速度 $\dot{x}$ と、エンド・エフェクタに加わる力 F の関係を制御することによって、マニピュレータと環境との干渉を制御しようとするものである、図6にその考え方を示す。

ダンピング制御では、エンド・エフェクタの速度 $\dot{x}$ を次式のように制御する。

$$\dot{x} = \dot{x}_d + K_F F \quad (27)$$

ここで、 $\dot{x}_d$ は、マニピュレータの目標速度であり、 K_F はアドミッタンス行列である。

マニピュレータが環境によって拘束されると、

$$\dot{x} = 0 \quad (28)$$

が成り立つから、エンド・エフェクタに加わる力 F と、その目標速度 $\dot{x}_d$ との間には、

$$F = -K_F^{-1} \dot{x}_d \quad (29)$$

の関係が成立する。また、マニピュレータが、拘束されていないときには、

$$F = 0 \quad (30)$$

なので、マニピュレータの速度は、

$$\dot{x} = \dot{x}_d \quad (31)$$

となり、マニピュレータは予め定めた目標速度で運動す

図6 ダンピング制御の考え方

図7 ダンピング制御系の構造

る。

作業座標系におけるエンド・エフェクタの速度とマニピュレータの関節速度の間には、(1)式から

$$\dot{x} = J\dot{\theta} \quad (32)$$

の関係が成り立つから、マニピュレータ各関節の速度は、

$$\dot{\theta} = J^{-1}(\dot{x}_d + K_F F) \quad (33)$$

で与えられる。図7に制御系の構図を示す。

4.3 インピーダンス制御

インピーダンス制御は、剛性制御やダンピング制御を一般化したもので、マニピュレータの位置・速度・加速度と力の関係を制御しようとするものであり、Hoganによって提案された¹³⁾。

(10)式において、マニピュレータの各関節への入力トルクベクトル \$\tau\$ を、アクチュエータによって制御入力として関節に加えられるトルク \$\tau_a\$ と、作業環境との機械的干渉によってマニピュレータ先端に加わる \$F\$ に関する成分

$$\tau_f = J^T F \quad (34)$$

とに分けて考え、(10)式を書き直すと、

$$\tau_a = M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) - \tau_f \quad (35)$$

となる。(1)式で表される作業座標系 \$x\$ を考え、(35)式を書き直すと、

$$\tau_a = M(\theta)J^{-1}\{\ddot{x} - \dot{J}\dot{\theta}\} + h(\theta, \dot{\theta}) - \tau_f \quad (36)$$

式を得る。ここで、ヤコビ行列 \$J\$ は、正則であると仮定した。

いま、マニピュレータの先端エンド・エフェクタに加わった力 \$F\$ によって、エンド・エフェクタの位置がその目標軌道 \$x(t) = x_d(t)\$ から、

$$\Delta x(t) = x(t) - x_d(t) \quad (37)$$

だけ変位したとする。インピーダンス制御では、図8に

$$M_0 \Delta \ddot{x} + D_0 \Delta \dot{x} + K_0 \Delta x = F$$

図8 インピーダンス制御の考え方

図9 インピーダンス制御系の構成

示すように、力 \$F\$ と変位 \$\Delta x(t)\$ との関係が、次式を満たすように、マニピュレータを動的に制御しようとするものである。

$$M_0 \Delta \ddot{x} + D_0 \Delta \dot{x} + K_0 \Delta x = F \quad (38)$$

(38)式の関係を満たすように、マニピュレータを制御するには、エンド・エフェクタの加速度 \$\ddot{x}\$ が次式となるように、マニピュレータを制御すればよいことがわかる。

$$\ddot{x} = \ddot{x}_d - M_0^{-1} D_0 (\dot{x} - \dot{x}_d) - M_0^{-1} K_0 (x - x_d) + M_0^{-1} F \quad (39)$$

加速度分解制御¹⁰⁾の考え方をを用いると、マニピュレータの制御入力 \$\tau_a\$ は、

$$\tau_a = M(\theta)J^{-1}\{\ddot{x}_d - M_0^{-1} D_0 (\dot{x} - \dot{x}_d) - M_0^{-1} K_0 (x - x_d) + M_0^{-1} F - \dot{J}\dot{\theta}\} + h(\theta, \dot{\theta}) - \tau_f \quad (40)$$

となる。(40)式を(36)式に代入すれば、(39)式が満たされることは容易にわかる。図9に制御系の構成を示す。

5. 力制御系の実現と問題点

3章、4章では、いろいろな力制御法について紹介した。実際に、これらの制御則を用いて制御系を構成し、ロボットを制御しようとするといろいろな問題に遭遇する。ここでは、制御系の実現の問題と、システムの安定性に関するアクチュエータとセンサの Collocation について考える。

5.1 制御系の実現

力制御のアルゴリズムは一般に複雑で、実際には、マイクロプロセッサを用いて制御を行うことになる。マニピュレータは、非線形システムなので、厳密に離散時間で制御系を設計することができない。そこで、連続時間

図 10 Khatib の制御系実現方法

系で設計した制御則を近似して、マイクロプロセッサで実現することになる。サンプリング周波数をどれくらい高くできるかによって、制御系の性能が大きく左右される。近年のマイクロプロセッサの発達で実験室レベルの、自由度の少ないマニピュレータの制御では、あまり問題とならないが、6自由度のマニピュレータを制御しようとなると、通常マイクロプロセッサでは、サンプリング周波数を十分高くできない。

位置と力のハイブリッド制御則や、インピーダンス制御則は、次式のように表せる。

$$\tau = H_p(\theta)u + H_f(\theta)v + G(\theta, \dot{\theta}) \quad (41)$$

$H_p(\theta)$, $H_f(\theta)$, $G(\theta, \dot{\theta})$ は、逆動力学とヤコビ行列 J に関する項であり、 u , v は、それぞれ位置と力に関する線形の制御則である。

こうした制御則に対して、複数のマイクロプロセッサを用いた並列計算法や、逆動力学や逆運動学の高速の演算法もいろいろと考案されているが、ここでは、簡単な Khatib⁵⁾の方法を紹介しよう。Khatib は、(41) 式の計算において、サンプリング周波数を高くすると $H_p(\theta)$, $H_f(\theta)$, $G(\theta, \dot{\theta})$ のサンプリング毎の変化が小さくなることに着目し、計算量が少ないフィードバック則 u , v の計算と、計算量が多い非線形関数 $H_p(\theta)$, $H_f(\theta)$, $G(\theta, \dot{\theta})$ の計算を違うサンプリング間隔で計算することを考えた。すなわち、これらの非線形関数は、サンプリングを高速にすると、サンプリング毎の変化が小さいので、ある間は一定と考え、フィードバック則を高速に計算する方法である。この方法を用いると、比較的簡単にサーボレートを上げることができる。図 10 にその構造を示す。

5.2 アクチュエータとセンサの Collocation の問題

力制御を行う場合、マニピュレータの先端に力センサを取り付け、その信号をフィードバックに用いる場合が多い。ほとんどの力制御アルゴリズムは、力センサから

のフィードバックを前提として構成されている。また、本稿で紹介したマニピュレータの制御則は、すべて、マニピュレータは剛体リンクからなると仮定して設計されている。

マニピュレータが、作業空間内を拘束されずに運動している場合や、比較的柔らかい（剛性が低い）作業環境と接触している場合には、マニピュレータは剛体リンクからなると仮定しても問題はないが、マニピュレータが堅い（剛性の高い）環境と接触する場合には、マニピュレータの減速器やリンクの剛性が無視できなくなり、マニピュレータは剛体リンクからなるといふ仮定が成り立たなくなる。

マニピュレータの力制御アルゴリズムでは、マニピュレータ先端で測定された力情報に基づいて制御入力进行計算するが、マニピュレータが剛性の高い環境と接触し、マニピュレータが剛体リンクからなるといふ仮定が崩れると、マニピュレータを駆動するアクチュエータとマニピュレータ先端のセンサとの間に考慮していない動特性が現れ、場合によっては制御系が不安定になることが知られている¹⁷⁾。

この問題を解決する一つの方法として、アクチュエータとセンサを同じ場所に置くことが有効であることが知られている。これを、アクチュエータとセンサの Collocation という¹⁸⁾。アクチュエータとセンサの Collocation を実現する方法にはいろいろあるが、マニピュレータのパラメータが完全に既知であると仮定して、加速度情報からインピーダンス制御系を構成する館らの方法を紹介しよう¹⁹⁾。

まず、(38) 式のインピーダンスモデルを、(34) 式と (1) 式の関係を用いて、関節座標系で書き直すと、

$$J^T M_0 \ddot{\theta} + J^T M_0 \dot{J} \dot{\theta} + J^T D_0 \dot{J} \dot{\theta} + J^T K_0 (T(\theta) - x_d) = \tau_f \quad (42)$$

となる。ただし、議論を簡単にするため、

$$\ddot{x}_d = \dot{x}_d = 0 \quad (43)$$

とした。インピーダンス制御を実現するためには、(35) 式のシステムが、(42) 式と同じ動特性を持つように τ_a を設計すればよいから、制御入力は

$$\tau_a = (M - J^T M_0 J) \ddot{\theta} - (J^T M_0 \dot{J} + J^T D_0 J) \dot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) - J^T K_0 (T(\theta) - x_d) \quad (44)$$

とすればよいことがわかる。図 11 に制御系の構造を示す。加速度情報の利用には賛否両論があるが、マニピュレータの各関節の加速度情報が得られ、かつ、マニピュレータのモデルがほぼ正確にわかる場合には、この方法は有効であると思われる。

図 11 加速度情報を用いたインピーダンス制御系

6. 仮想内部モデルに基づく制御系

前章まで、いろいろな力制御アルゴリズムについて紹介した。塗装作業・シーリング作業などは、エンド・エフェクタの位置・姿勢を高精度に制御できれば、ティーチン・プレイバックによって容易にロボット化できる。しかし、力制御を必要とするより一般的な作業、たとえば、バリ取り作業や研磨作業などでは、作業プロセスの状態に応じて、力を微妙に調節する必要があるため、力そのものが制御できるとしても、簡単には作業を行うことができない。

力制御を必要とするような一般的な作業のロボット化の本質は、力そのものを直接的・間接的に制御することではなく、マニピュレータの運動を作業の状態に応じていかに制御するかということにある。このような作業のロボット化を行うには、力制御問題は避けて通れない問題であるが、力は、作業プロセスの一つの状態であり、作業プロセスに関するいろいろな状態をうまく制御して、はじめて作業は可能になる。

著者らは、仮想内部モデル²⁰⁾を用いた、マニピュレータの Task-Oriented 制御²¹⁾を提案してきた。図 12 に示すように、仮想内部モデルは、一種の規範モデルで、モデル追従制御系の規範モデルに、いろいろなセンサからの情報をフィードバックすることで、作業状態に応じたマニピュレータの制御を行おうとするものであり、Reg-in-Hole 問題²¹⁾、視覚を用いたボルトの締め作業²²⁾、マスタ・スレイマニピュレータの制御²³⁾、双腕マニピュレータの制御²⁴⁾等に適用されている。

☆ ☆

J. Duffy は、最近、直交補空間の考え方に基づくハイブリッド制御の理論は間違っていると警告している²⁵⁾。ハイブリッド制御では、マニピュレータの作業空間を、環境によって拘束される空間と、そうでない空間とに分け、拘束される空間では力制御を、そうでない空間では

図 12 仮想内部モデルに基づく制御系

位置制御を行うが、このときに用いる直交補空間の概念が意味がないと指摘している。詳しい内容の説明は文献¹⁵⁾にも紹介されているので省略するが、残念ながら、彼の指摘は本当で、直交補空間の概念に基づく力制御アルゴリズムは、もう一度見直す必要があり、現在、多くの研究者がこの問題に取り組んでいる。

本稿では、力制御(Compliant Motion Control) アルゴリズムを分類し、代表的なアルゴリズムについて解説した。力制御は、多数のマニピュレータの協調制御問題や、指の協調制御問題など、いろいろな制御問題に共通の、重要な基本的な問題である。しかし、一般に、力制御を必要とするような複雑な作業では、どのように力制御を実現するかという方法がわかっている、それだけでは、作業を実現することはできない。より本質的なのは、作業プロセスの状態に応じて、どのように力や運動を調節するかということである。複雑な作業を行うのに必要な力制御技術はほぼ体系化された。力制御を要素技術とし、より一般的な作業の実現に必要な、階層的な制御系の提案や、上位レベルの制御系の設計法を確立することが望まれる。

参考文献

- 1) M. T. Mason, "Compliance and force control for computer controlled manipulators," IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics, Vol. SMC-11, No. 6, 418-432, 1981
- 2) D. E. Whitney, "Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control," International Journal of Robotics Research, Vol. 6, No. 1, pp. 3-14, 1987
- 3) D. E. Whitney, "Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts," Trans. of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 104, pp. 65-77, 1982
- 4) M. H. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators," Trans. of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 102, pp. 126-133, 1981
- 5) O. Khatib, "A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators: The Operational Space Formulation," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 1, pp. 43-53, 1987

- 6) 高瀬, “束縛運動の表現と束縛下にあるマニピュレータの動的制御,” 計測自動制御学会論文集, Vol. 21, No. 5, pp. 86-91, 1985.
- 7) 吉川, “ロボットアームの位置と力の動的ハイブリッド制御—手先拘束の記述と関節駆動力の算出—” 日本ロボット学会誌, Vol. 3, No. 6, pp. 531-537, 1985
- 8) N. H. McClamroch and D. Wang, “Feedback Stabilization and Tracking of Constrained Robots”, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-33, No. 5, pp. 419-426, 1988
- 9) R. K. Kankaanranta and H. N. Koivo, “Dynamics and Simulation of Compliant Motion of a Manipulator”, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 2, 1988
- 10) J. Y. S. Luh, W. M. Walker and R. P. C. Paul, “Resolved Acceleration Control of Manipulators”, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-25, No. 3, pp. 468-474, 1980
- 11) J. K. Salisbury, “Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates”, Proc. of the 19th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 95-100, 1980
- 12) D. E. Whitney, “Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions”, Trans. of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, June 1977, pp. 91-97, 1977
- 13) N. Hogan, “Impedance Control Part 1-Part 3”, Trans. of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 107, pp. 1-24, 1985
- 14) 古田, 小菅, “マニピュレータの力制御アルゴリズムとその実現”, 日本ロボット学会誌, Vol. 7, No. 3, pp. 131-136, 1989
- 15) 吉川, “マニピュレータの力制御”, 計測と制御, Vol. 30, No. 5, pp. 383-388, 1991
- 16) 橋本, “逆ダイナミクスの新しい計算法”, 計測と制御, Vol. 30, No. 5, pp. 406-411, 1991
- 17) S. D. Eppinger, W. P. Seering, “On Dynamic Models of Robot Force Control”, Proc. of 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 29-34, 1986
- 18) R. H. Cannon, E. Schmits, “Initial Experiments on the End-Point Control of a Flexible One-Link Robot”, International Journal of Robotics Research, Vol. 3, No. 3, pp. 62-75, 1984
- 19) 館, 榊, 荒井ほか, “力センサを用いないダイレクト・ドライブ・マニピュレータのインピーダンス制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 7, No. 3, pp. 60-71, 1989
- 20) 小菅, 古田, 横山, “ロボットの仮想内部モデル追従制御系, メカニカルインピーダンス制御への応用”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 21, No. 1, pp. 55-62, 1988
- 21) K. Kosuge, A. Sato and K. Furuta, “Task-Oriented Control of Master-Slave Manipulators,” Proc. 1990 Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, pp. 387-393, 1990
- 22) J. Ishikawa, K. Kosuge and K. Furuta, “Intelligent Control of Assembling Robot Using Vision Sensor”, Proc. of 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1904-1909, 1990
- 23) 古田, 小菅, 塩手, 秦野, “仮想内部モデルに基づくマスタスレイブマニピュレータの制御”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 24, No. 2, pp. 70-76, 1988
- 24) 小菅, 古賀, 古田, 野崎, “仮想内部モデルに基づくロボットアームの協調制御”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 93-100, 1991
- 25) J. Duffy, “The Fallacy of Modern Hybrid Control Theory that is Based on Orthogonal Complements of Twist and Wrench Space”, Journal of Robotic Systems, Vol. 7, No. 2, pp. 139-144, 1990

小菅一弘 (Kazuhiro KOSUGE)

昭和30年10月2日生。昭和53年東京工業大学工学部制御工学科卒業, 55年同大学大学院修士課程終了。同年日本電装株式会社勤務。57年東京工業大学工学部制御工学科助手。平成2年9月から名古屋大学工学部機械工学第二学科助教授, 現在に至る。この間, 平成元年9月から平成2年8月まで米国MIT客員研究員。双腕アームの制御, テレオペレーション, ロボットのインテリジェント制御, マイクロマシンの制御などの研究に従事。日本ロボット学会, 計測自動制御学会, IEEEなどの会員。
(日本ロボット学会正会員)