コンプライアンス制御と柔軟接触問題*

谷江和雄** 福田敏男***

Compliance Control of a Robotic Arm and its Application to Soft Contact Tasks /
Kazuo TANIE and Toshio FUKUDA

Key words: compliance control, compliance motion, direct compliance control, impedance control, stiffness matrix, robotic arm

1. ま え が き

ロボットには一般に多様な作業が要求される。時には精密な位置決め作業が、また時にはソフトに物体の表面を撫でることが要求されるかも知れない。前者のロボットにはサーボ剛性の大きい、高精度な位置制御系を必要とする。しかし、ソフトに対象に働きかけるには高精度な位置制御だけでなく、対象に及ぼす力を微妙に制御することが必要であり、ロボットの分野では古くからその運動制御において、位置と共に力の調節機能をも巧みに取り入れる手法が研究されてきた。本稿では、位置と力の関係を制御するコンプライアンス制御に注目し、その基本的手法を述べる。また、それを柔軟な対象物との力学的相互作用を伴うロボットの運動制御に導入する場合の話題を紹介する。

2. インピーダンス制御と コンプライアンス制御

コンプライアンスとは「柔らかさ」を意味する。力学では剛性（ばね定数）の逆数の専門用語としても使われる。従って、コンプライアンス制御という時、抽象的にロボットに柔らかさを持たせる制御を意味する場合と、システムの剛性制御を示す場合がある。本稿では後者の意味でコンプライアンス制御を用いる。

今、図1(a)に示す1軸のロボットアームを考える。アームの慣性を J 、系の粘性摩擦係数を B 、変位

を x とすると、運動方程式は次のようになる。

$$J\ddot{x} + B\dot{x} = f_m + f_L \quad (1)$$

ここで、 f_m はアクチュエータが発生する力、 f_L はアームに加わる外力である。この系においてある位置目標値 x_r を適当に定め、この値と現在値 x との差に応じて $f_m = k(x_r - x)$ によりアクチュエータ発生力を制御するものとする。この時、運動方程式として、

$$J\ddot{x} + B\dot{x} = k(x_r - x) + f_L \quad (2)$$

を得る。この式は、自然長 x_r 、ばね定数 k のばねで支持された慣性 J 、粘性 B を有する物体の挙動を示す式に等しい(図1(b))。従って、上記 k を適宜設

図1 1軸アームのコンプライアンス制御と等価力学モデル

* 原稿受付 平成元年6月1日

** 機械技術研究所 (つくば市並木1-2)

*** 名古屋大学工学部 (名古屋市千種区不老町)

定することにより、適当な剛性すなわち柔らかさを有するアームが構成できる。このように変位と発生力の関係 k を希望値に調整する制御をコンプライアンス制御と呼ぶ。さて、式(2)では設定される k に応じて力 f_m と変位 $(x_r - x)$ の関係を調整すれば系の剛性が変わる。しかし、慣性や粘性の影響は残る。それを補償するために、次のような速度、加速度を用いた制御則 $f_m = J_c \ddot{x} + B_c \dot{x} + k(x_r - x)$ が導入される。この時、式(2)は

$$(J - J_c) \ddot{x} + (B - B_c) \dot{x} = k(x_r - x) + f_l \quad (3)$$

となり、仮想的に慣性、粘性を $J - J_c$ 、 $B - B_c$ に調整できる。このように、慣性、粘性なども含めて調整する制御法をインピーダンス制御と呼ぶ¹⁾²⁾。通常、慣性、粘性は過度に小さくすると安定性が損なわれるから、適当な有限な値に設定される。また発生できるアクチュエータ力には上限があるから、動作速度と調整できるインピーダンスの範囲には限界がある。この限界内で希望するインピーダンス値を保証するには、動作速度を低くする。例えば、 $J\ddot{x}$ 、 $B\dot{x}$ が微小に抑えられる範囲でアームを運動させれば、 $f_l = k(x_r - x)$ は近似的に保証され、その時アームの柔らかさは k で規定できる。以下では議論を簡単化するために、動項 $(J\ddot{x}, B\dot{x})$ は補償されているものと考え、剛性の項に注目して議論を進めることにする。

3. 多自由度アームのコンプライアンス制御

ロボットアームの剛性は一般に、作業対象に作用を及ぼすアームの先端部に希望値に設定される必要がある。アクチュエータは関節部に配置されるから、コンプライアンス制御では、アーム先端の希望剛性に応じて関節をいかに制御するかが課題である。ここで、アームの関節間の要素は剛体で、アーム構造体の剛性は関節部のアクチュエータによってのみ変化できるものとする。アームに期待される先端剛性を関節空間でのトルクと角変位の関係に変換する方法は、Salisburyによって定式化された³⁾。まず図2に示すような各関節にトルク指令型のアクチュエータを内蔵した6自由度のアームを考える。先端に作業座標系 $(o-xyz)$ を設定し、その上で記述される剛性行列を $[K_d]$ とすると、これは一般に次式で表される。

$$[K_d] = \begin{pmatrix} k_{xx} & \cdots & k_{xn} \\ \vdots & k_{yy} & \vdots \\ & k_{zz} & \vdots \\ & & k_{uu} & \vdots \\ & & & k_{mm} & \vdots \\ k_{nx} & \cdots & k_{nn} \end{pmatrix} \quad (4)$$

図2 6自由度ロボットアーム

ここで座標系 $o-xyz$ で記述される先端における力、変位ベクトルをそれぞれ F 、 dR とすると、 $F = [K_d]dR$ である。一方、関節 j ($j=1 \sim 6$)のトルク τ_j 及び微小変位 $d\theta_j$ を要素とするベクトルをそれぞれ τ 、 $d\theta$ とすると、関節空間での次の関係が得られる。

$$\tau = J^T(\theta) [T] [K_d] [T]^{-1} J(\theta) d\theta \quad (5)$$

ただし、 $J(\theta)$ はヤコビ行列、 $[T]$ は座標系 $o-xyz$ の諸量を絶対座標系 $O-XYZ$ の諸量に変換する行列で、絶対座標系で記述された、 dR に対応する先端微小変位を dr とすると、 $dr = J(\theta) d\theta$ 、 $dr = [T] dR$ である。また添字 T は行列の転置を表す。従って、関節における仮想位置目標値ベクトルを θ_r 、現在の関節角ベクトルを θ とすると、 $d\theta = \theta_r - \theta$ として、上式から τ を計算し関節トルクを制御すれば、先端に剛性 $[K_d]$ を有するアームを得ることが出来る。式(5)の関節トルクベクトルと関節角変位ベクトルとを関係づける行列 $[K_a] = J^T(\theta) [T] [K_d] [T]^{-1} J(\theta)$ を関節剛性行列とよぶ。一般に先端剛性行列 $[K_d]$ は対処する作業の性質に応じて設定される。多くの作業ではアーム先端に想定される座標系の座標軸方向に対しある値を設定し、座標系間の干渉成分は零にする。すなわち $[K_d]$ は対角行列とする。しかし、式(5)の形から、 $[K_d]$ が対角でも $[K_a]$ は対角行列にならないことがわかる。このことは、各関節の制御トルクを決定する際、すべての関節の角変位を計測する必要があることを意味する。

最近、この関節剛性行列を任意の $[K_d]$ に対し、対角にすることができるダイレクトコンプライアンス制御法が提案されている⁴⁾。この方法は行列 $[K_d]$ を含む独立な要素の数に等しい剛性可変な関節をロボットアームに用意する。まずアーム先端における剛性行列 $[K_d]$ は、 $6 \times 6 = 36$ の要素を含む。しかしアーム構造

図3 障害物が存在する場合の軌道制御

体は一般に保存系と考えることができるから、行列は対称になり、独立な要素は21になる⁶⁾。そこで21の剛性可変な要素を含むアーム構造体を用意し、各関節のトルク τ_j ($j=1\sim 21$) をそれぞれの関節の変位 $d\theta_j$ ($j=1\sim 21$) に応じて次式のように制御することを考える。

$$\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \vdots \\ \tau_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & k_{21} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\theta_1 \\ \vdots \\ d\theta_{21} \end{pmatrix} = [K_D] \begin{pmatrix} d\theta_1 \\ \vdots \\ d\theta_{21} \end{pmatrix} \quad (6)$$

ただし、 k_j ($j=1\sim 21$) は関節 j の剛性、 $[K_D]$ は関節剛性行列で Salisbury 方式の $[K_0]$ に相当する。この時、アーム先端の21個の独立な要素 k_{xx} , k_{yy} , k_{zz} , k_{xy} , ... は近似的に k_j の線形関数として次のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} k_{xx} \\ k_{yy} \\ k_{zz} \\ k_{xy} \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \cdots & \alpha_{121} \\ \vdots & & \vdots \\ \alpha_{211} & \cdots & \alpha_{2121} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ \vdots \\ k_{21} \end{pmatrix} \quad (7)$$

(α_{ij} は姿勢の関数)

ここでもし、 k_j の要素の数がアーム先端剛性の要素の数に等しい時、上式は与えられた先端剛性に対して、関節剛性 k_j を未知数として解くことが可能である。すなわちこうして求めた関節剛性 k_j を用いれば、式(6)に従って関節空間での剛性行列 $[K_D]$ を対角に定められ、結果として各関節独立に剛性の制御則を構成することができる。この方法は、関節数が増加する反面、剛性の制御則の計算が単純化される利点がある。

4. 柔軟接触問題

ロボットアームの剛性を可変にするコンプライアンス制御は対象との間に作用する力の調節を必要とする作業において有効に利用できる。力の調節を伴う作業のためのアームの制御技術としては、アーム先端に定められる作業座標軸の各方向に対し力を指令する力制御、あるいは力と位置の指令を使い分けるハイブリッド制御がある。これらとコンプライアンス制御が異なる点は、動作の指令形態の違いにある。コンプライアンス制御では動作は位置（あるいは角度）をベースに指令される。一方、力制御、位置と力のハイブリッド制御では位置だけでなく力の直接的な指令を伴う。この指令形態の相違は、自由空間中の運動と物体への接触運動とが混在するアームの動作を計画する際、制御アルゴリズムの設計者に異なる対応を要求する。例えば図3に示すように、作業空間中の未知の位置に障害物が存在し、それを横切るようにロボットアームの移動目標軌道が設定されているものとする。アームが物体に衝突してもそれに大きな衝撃を与えることなく軌道上を移動させるには、まずコンプライアンス制御においては、軌道に沿ってアーム剛性を大きく、軌道に垂直な方向に沿っては剛性を低く設定しつつ、仮想目標値を目標軌道に沿って与えればよい。この時アームが物体に接触すると、物体が強く拘束されている場合は、アームは軌道に垂直な方向に柔軟になっているから、仮想目標値の変化に伴ってアーム自身に変形し、物体の表面にソフトに接触しつつ移動する。この動作を力と位置のハイブリッド制御で行う場合、力制御モードでは、アームは先端が拘束されていないとその位置が定まらないから、自由空間中を移動させる時は、全軸方向に位置制御モードを採用しなければなら

図4 パラレルリンクアーム

ない。そしてアームが物体に接触した時、それを何らかのセンサで検知して、物体表面に垂直な方向に対し力制御を行うように制御モードを切り換える必要がある。こうした方法は、不意に出現する物体への接触に対処するには、あらゆる衝突の可能性を考慮したセンサとアーム間の行動制御アルゴリズムを用意しなければならず、制御論理の設計が複雑になる。また、柔軟障害物を対象とする場合、センサの剛性や感度によっては衝突の検知が困難になる場合もあり、システムの性能はセンサの特性に左右されることになる。コンプライアンス制御によれば、一つの制御モードで物体の出現に対処することができる。図の動作では物体表面に垂直な方向のアーム剛性を K_n 、目標軌道からアームがずれる量を $\Delta\epsilon$ とすると、物体表面には $K_n\Delta\epsilon$ の押付け力が働く。ここで、対象への押付け力の許容値を α とすると、 $K_n < (\alpha/\Delta\epsilon)$ とすれば、対象の強度に応じたソフトな接触が保証される。

次に筆者らによるパラレルリンク型のアームのダイレクトコンプライアンス制御の実施例を示す⁴⁾。図4に示すような5角形型の平面内で動くアームを考える。問題を簡単にするために、アームの先端の回転はフリーとする。アームの先端に設定した作業座標系を P-XY とするとこの座標軸上における剛性行列 $[K_P]$ は次式となる。

$$[K_P] = \begin{pmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{pmatrix} \quad (8)$$

一般に $k_{xy} = k_{yx}$ であるから、独立な剛性の要素は3個である。そこで、図4のアームの関節 k_{L1} , k_{L2} , k_{R1} に可変剛性要素を配置すると、式(7)に従ってこれら剛性要素間に次の関係が得られる。

$$\begin{pmatrix} k_{L1} \\ k_{L2} \\ k_{R1} \end{pmatrix} = [A] \begin{pmatrix} k_{xx} \\ k_{xy} \\ k_{yy} \end{pmatrix} \quad (9)$$

ここで $[A]$ はアーム先端剛性と関節剛性を関係づける行列である。式(9)で $k_{xy} = k_{yx} = 0$ とし、 k_{xx} , k_{yy} に適当な値を設定して k_{L1} , k_{L2} , k_{R1} を求めれば、アームの先端の作業軸方向に独立に任意の剛性を与えるた

図5 実験例

めの関節剛性が得られる。実験に使用したアームでは、関節 k_{L1} , k_{L2} , k_{R1} にトルク指令型モータを取り付けた。また各関節への指令トルクは $\tau_j = k_j(\theta_{rj} - \theta_j)$ によって与えられた。ここで τ_j , k_j , θ_{rj} , θ_j はそれぞれ関節 j の指令トルク、目標剛性、仮想目標値、角度現在値で、 $j = L1, L2, R1$ である。図5に実験例を示す。図(a)に示すように、アーム先端Pにある剛性値を設定した後、円軌道を仮想目標として与える。そして、その軌道の一部で剛体の固定壁に衝突させてY方向の運動を拘束する。この時アーム先端は拘束を受けない軌道上では壁に $f_y = -k_{yy}\delta Y$ (k_{yy} : Y方向のアーム先端剛性) なる力を作用させつつ、その表面をならって動くことが想定される。図(b)は $k_{xx} = 1000 \text{ N/m}$, $k_{yy} = 1000 \text{ N/m}$, $k_{xy} = k_{yx} = 0$ となるように k_{L1} , k_{L2} , k_{R1} を調整した時のアーム先端移動軌跡と発生力の記録である。ほぼ予測された動作になっていることが確認される。図6は直線目標軌道を設定し、その途中で柔らかい物体として豆腐を置き(図(a)), それを崩さずにアームを軌道に沿って移動させる実験を行っている様子を示している。この実験で

図6 豆腐との柔軟接触実験

は、図5の実験の約1/10に軌道に垂直な方向の剛性を設定したところ、豆腐との接触時において、アームは軌道から垂直方向に変位し、豆腐を崩さず滑らかにその表面をトレースしつつ動作することが確認された。

一般にインピーダンス制御されたアームが種々の剛性の環境に接触する場合、接触後のアームの挙動は環境のインピーダンス（図1(a)の点線部分）の影響も受ける。そのため柔軟接触問題では、アームのイン

ピーダンスを環境のそれをも考慮して制御する必要がある。こうした問題への対応として、モデル規範型の適応制御で、システムの挙動を指定値に保つ方法などが検討されているが⁵⁾、本格的な取扱いは今後の課題である。

5. む す び

コンプライアンス制御は元来、組立作業など環境から拘束を受ける動作の計画を効率的に作成する上で有効な制御技術である。しかしそれはまた自身の柔らかさを調節できることから対象にソフトに接触する技術としての可能性も備えている。今後、人と作業空間を共有する分野へロボットを適用していく時、柔軟な対象にそれを破壊することなく接触する問題は、対人安全性を確保する上で重要な要素技術となろう。なお本稿では力制御型のアームを対象に解説したが、コンプライアンス制御は位置や速度指令型のアームに対しても検討例がある。それらについては別途文献を参照されたい。

文 献

- 1) 荒井裕彦ほか：直接駆動マニピュレータの人力操作における操作力検出と能動的力補助，日本ロボット学会誌，4，3（1986）209.
- 2) N. Hogan：Impedance Control：An Approach to Manipulation, Part I, II, III, J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, (1985) 1.
- 3) J. K. Salisbury：Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates, Proc. 19th IEEE Conf. on Decision and Control, 95, (1980).
- 4) K. Yokoi et al.：A Compliance Control Method Suggested by Muscle Networks in Human Arms, Proc. 1988 IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, 385, (1988).
- 5) 福田敏男ほか：対象物の特性を考慮したロボットの力制御方式，日本機械学会論文集（C編），53，496（1987）2577.