ロボットマニピュレータの制御モード切り替え法に関する研究*

(第1報, 位置と力の偏差に基づく制御モード切り替え法の提案)

山崎 容次郎^{*1}, 横川 隆 一^{*2}積 際 徹^{*2}, 原 敬^{*3}A Study on a Method for Switching Control Mode of Robot Manipulators
(1st Report, A proposal of a Method for Switching Control Mode Based
on Position and Force Errors)Yojiro YAMASAKI^{*4}, Ryuichi YOKOGAWA,
Toru TSUMUGIWA and Kei HARA^{*4} Department of Mechanical Engineering, Takamatsu National College of Technology,
355 Chokushi-cho, Takamatsu-shi, Kagawa, 761-8058 Japan

This paper proposes a new switching method of control mode for a robot manipulator coming in contact with environment that has elasticity. First, the basic concept of the switching of the control mode in a robot manipulator is explained. Second, we propose a new method of switching the control mode that selects the control mode at the intersection of "Characteristic curve of position and force" and "Target value of the work composed by the desired value of position and force". Next, the switching algorithm based on this method is obtained about a certain work coordinate with a Multi-DOF robot manipulator. In this paper, the switching method is named "A Method for Switching Control Mode Based on Position and Force Errors". Furthermore, when a One-DOF robot manipulator driven by DC servo motor with reduction gears using an elastic joint came in contact with the object that has elasticity, the simulation and the experiment on various angle and torque controls were done. As a result, it is shown that the proposed switching method is useful and has stable and flexible characteristics.

Key Words: Robot, Manipulator, Motion Control, Force Control, Position Control, Elastic Joint, Control Mode, Method for Switching Control Mode

1. 結 言

ロボットマニピュレータ(以下ロボットと呼ぶ)の一般的な制御法には位置制御と力制御⁽¹⁾があり, これらの制御法を自在に使うことができれば人の手のようにロボットに複雑な作業をさせることができる。他方, 力制御系には位置制御ベース力制御系と呼ばれる内部ループに位置(あるいは速度)制御系を有しその外側に力制御系を付加した力制御系と, トルク制御ベース力制御系と呼ばれる直接関節トルクを指令値とする力制御系の二つ⁽²⁾がある。これらより, 位置制御と力制御を組み合わせる方式には, 位置制御ベース力制御系を用いる方式と, 位置制御系とトルク制御ベース力制御系を用いて制御モードを切り替える二つの方式がある。前者はインピーダンス制御⁽³⁾やコンプライアンス制御⁽⁴⁾が代表的で, 位置制御ベースの

ため位置制御に関する信頼性は高い。しかし, 力を制御するためには環境との距離や環境の形状を正確に把握しておくことが必要であり環境の変化に対して適応性が乏しい。一方, 制御モードを切り替える方式は, トルク制御ベース力制御系を用いるため直接力を制御でき環境の変化に対して適応性は高い。ところが, 切り替え方法について詳しく検討された研究は少ない。

制御モードの従来の切り替え方法では, ある閾値以上の反作用力があれば位置制御から力制御に切り替える手法⁽⁵⁻⁷⁾が用いられている。ハイブリッド制御⁽⁸⁾, モード切り替え型位置/力制御⁽⁹⁾, 位置制御から力制御に移る移行過程での衝突力の低減を目的とした制御モードの決定方法⁽¹⁰⁾, 学習に基づいて接触位置を同定し接触前から力制御に切り替える方法⁽¹¹⁾でも基本的には同様の切り替え法を利用している。

しかし, これらの切り替え法は反作用力が閾値以上になっているかどうかで制御モードが単純に決定されるため, 位置制御と力制御の複雑な切り替えを要する作業には対応できない。例えば, 一旦, 力制御モー

* 原稿受付 2007年9月12日。

^{*1} 正員, 高松工業高等専門学校(☎761-8058 高松市勅使町355)。^{*2} 正員, 同志社大学工学部(☎610-0394 京田辺市多々羅郡谷1-3)。^{*3} 正員, 永年会員, 同志社大学工学部。

E-mail: yamasaki@takamatsu-nct.ac.jp

ドになれば、その後自律的に位置制御モードに戻ることはなく、また、設定した閾値以上に反作用力を受ける場合は位置制御ができないことなどが挙げられる。

そこで、人の指の制御についてあらためて考えると位置制御と力制御を選択的に行っていることに気づく。例えば図1のように、硬くて重い鋼球(図1(a))と柔らかくて軽いゴムボール(図1(b))を2本指で把持する場合を考える。前者では、指で物体に力を加えても物体が硬いため変形せず落下に打ち勝つ摩擦力を得るため力制御で把持する。後者では、指の位置制御により物体を変形させ把持に必要な摩擦力を得る。すなわち、力を加えながら指の位置制御で把持する。このように反作用力が閾値以上になっているかどうかだけで制御モードを切り替えるのではなく、適した制御モードを判断し、位置制御と力制御を自律的に切り替えることのできる制御系を構築する必要がある。

そこで本稿では、最初にロボットの制御モード切り替えの基本概念を説明する。ここで、多関節ロボットの運動制御は各作業座標軸あるいは各関節の運動制御に分解されるので、各座標軸単位あるいは関節単位で位置と力の制御モードを切り替えることを考えればよい。したがって、作業座標軸についての位置と力の制御モード切り替え法について述べる。

次に、弾性を有する環境(未知対象物)への接触を想定し、負荷に感応し適した制御モードに自律的に切り替える新しい制御モード切り替え法を提案する。なお、本稿ではこの制御モード切り替え法を位置と力の偏差に基づく制御モード切り替え法⁽¹²⁾(SCOME法: A Method for Switching Control Mode Based on Position and Force Errors)と呼ぶ。

さらに、弾性関節を有する減速機付DCサーボモータ駆動の1自由度ロボットについて、位置(回転角)と力(トルク)の制御シミュレーションと実機を用いた制御実験を行ない、提案する制御モード切り替え法の有効性を確認、検証する。

2. 制御モード切り替えの基本概念

2.1 ロボットと環境のモデリング n 自由度の剛体リンクからなる多関節ロボットのモデルを図2に

Fig.1 Contacts with object

示す。ロボットの灰色部分は基準姿勢を、黒色は変位後を表す。また、ロボットの基準座標系を Σ_0 、手先の作業座標系を Σ_H とする。図2より、拘束空間でのダイナミクスを式(1)に、ロボットが対象物に作用する接触力 F (ロボットが対象物から受ける反作用力 $F_e = -F$) を式(2)に示す。なお、自由空間でのダイナミクスは式(1)で $F = 0$ としたものに他ならない。

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + J^T F \quad (1)$$

$$F = K_e x + D_e \dot{x} \quad (2)$$

ここで、 $\tau \in R^{n \times 1}$ は関節トルク、 $M(\theta) \in R^{n \times n}$ は慣性行列、 $\theta \in R^{n \times 1}$ は関節角、 $h(\theta, \dot{\theta}) \in R^{n \times 1}$ はコリオリ力、求心力、重力、粘性摩擦等からなる非線形項、 $J \in R^{n \times n}$ はヤコビ行列である。また、 $F \in R^{n \times 1}$ は接触力、 $K_e \in R^{n \times n}$ と $D_e \in R^{n \times n}$ は環境剛性行列と環境粘性行列、 $x \in R^{n \times 1}$ は作業座標系での位置/姿勢を表す。さらに、順運動学 DK と逆運動学 IK とすると、式(1)、(2)は式(3)、(4)に変形できる。ただし、 J は正則 ($\text{rank } J = n, n \leq 6$) と仮定した。

$$\tau = M(IK(x))J^{-1}\ddot{x} - M(IK(x))J^{-1}\dot{J}J^{-1}\dot{x} + h(IK(x), J^{-1}\dot{x}) + J^T F \quad (3)$$

$$F = K_e DK(\theta) + D_e J\dot{\theta} \quad (4)$$

式(1)と式(4)は関節座標系での運動を、式(2)と式(3)は作業座標系での運動を表している。どちらの座標系においても、適当なモータ駆動トルク τ を与えれば、自由空間では位置制御することができ、拘束空間では力制御できることを示している。言い換えれば、関節座標系においては関節単位で、作業座標系では作業座標軸単位で、位置制御と力制御の制御モードの切り替えが可能であることを示唆している。

2.2 位置と力の特性曲線 今、作業座標系で位置と力の制御が安定に実現できる多自由度ロボットを想定し、アームの先端をある作業座標軸 X_1 方向に動

Fig.2 Robot manipulator model

作開始点(原点0)から直線的に変位させ、未知の対象物に点Cで接触させ、その後、力を加え対象物の弾性曲線に添って接触力を変化させることを考える。このとき、手先位置 x と対象物に作用する $\mathbf{X}_1$ 方向の接触力 F を図3に x - F 線図として示す。なお、本稿では位置と力の制御を同一軌道上で考え、位置変位曲線(点0→点C)と力の弾性曲線(点C→点 E_1, E_2, E_3)をあわせて位置と力の特性曲線(Characteristic Curve of Position and Force)と呼ぶ。ここで、対象物の弾性曲線は、作業座標軸 $\mathbf{X}_1$ 方向での対象物の変形量を x' 、剛性を K_e 、粘性係数を D_e とすると、一般に式(5)の3種類に分けられる。式(5)を考慮し、図3には、完全剛体 CE_1 、弾性体 CE_2 、および、ゴムなどの柔らかな粘弾性体⁽⁷⁾ CE_3 の弾性曲線を示した。

$$\left. \begin{aligned} CE_1: \text{完全剛体} \quad F &= K_e x', K_e = \infty \\ CE_2: \text{弾性体} \quad F &= K_e x' \\ CE_3: \text{粘弾性体} \quad F &= K_e x' + D_e \dot{x}' \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

この位置と力の特性曲線を考慮すれば、ロボットの運動を位置制御から力制御(あるいはその逆)の連続的な運動と捉えることができる。

2.3 位置制御と力制御の切り替えのある制御系

入力を位置と力、出力は位置と力のいずれかとする制御系を図4に示す。図4より、任意の位置制御器と力制御器をラプラス領域で $G_x(s)$ 、 $G_F(s)$ と仮定すると、時刻 $t=t_0$ における各制御器から得られる操作信号 $\Delta x, \Delta F$ は式(6)、(7)で表される。ここで、 x^d, F^d は位置の目標値と力の目標値、 x^r, F^r は位置

Fig.3 Characteristic curves of position and force

Fig.4 A control system with a method for switching control modes

の応答値と力の応答値(位置センサの出力値と力センサの出力値を表し、 $t=t_0$ では定数値とみなす)とし、 $\mathcal{L}^{-1}$ はラプラス逆変換を表す。

$$\Delta x = \mathcal{L}^{-1}\{G_x(s)\}_{t=t_0} (x^d - x^r) \quad (6)$$

$$\Delta F = \mathcal{L}^{-1}\{G_F(s)\}_{t=t_0} (F^d - F^r) \quad (7)$$

位置制御と力制御の切り替えはサーボアンプに入力される操作信号 $\Delta x, \Delta F$ を切り替えることを意味し、各制御器から得られるモード信号 $\Delta x', \Delta F'$ を制御モード選択器で比較することで、切り替えの判断選択を行えばよい。ここで問題となるのが、操作信号 $\Delta x, \Delta F$ とモード信号 $\Delta x', \Delta F'$ の次元(または単位)、および $\Delta x', \Delta F'$ を用いた切り替えアルゴリズムである。安定な切り替えのためには両操作信号 $\Delta x, \Delta F$ の次元が同じで、かつ、制御モードの切り替え時に操作信号 $\Delta x, \Delta F$ が連続することが望ましい。また、モード信号 $\Delta x', \Delta F'$ の次元も同じでなければならない。

そこで、1章に示した位置制御ベース力制御系とトルク制御ベース力制御系の二つの力制御系⁽²⁾の構造を考慮し、制御モード切り替え時の操作信号の次元が同じとなるように選択器の挿入位置に配慮した2入力1出力制御系をあらためて図5に示す。図5(a)は力制御に位置制御ベース力制御系を、図5(b)は力制御にトルク制御ベース力制御系を用いた場合である。ここで、図中の Velocity Servo Amp は速度制御型アンプを、Torque Servo Amp はトルク制御型アンプを表わしている。図5(a)より、位置制御ベース力制御系にも制御モード切り替え機能を付加できることがわかる。

なお、図5(a)、(b)の両図ともに、選択器に入力される信号のうち一方は目標値となっている。このように、選択器に入力される $\Delta x, \Delta F$ が目標値であっても、本稿では便宜的に $\Delta x, \Delta F$ を「操作信号」、あるいは「信号」と呼ぶことに注意されたい。

(a) Force control system based on position control

(b) Force control system based on torque control

Fig.5 Control systems with a method for switching control modes

また、図 5(a) の操作信号 ΔF の次元は、式 (7) により偏差 $(F^d - F^r)$ の次元 [N] から [m] に次元変換され、同様に、図 5(b) の操作信号 Δx の次元は、式 (6) により [m] から [N] に次元変換されている。したがって、選択器に入力される信号 Δx と ΔF の次元は図 5(a) では位置 [m]、図 5(b) では力 [N] となる。これらより、図 5(a)、(b) とともにそれぞれの選択器に入力される信号の次元は同じになり制御モードの切り替えは可能となる。

さらに、位置制御系と力制御系の両方が安定であり、かつ、制御モードの切り替え時に操作信号が連続していれば、制御モードを切り替えた後も制御系全体は安定と判断できる。したがって、制御モードの切り替え時に操作信号が「連続する」かどうかが重要な問題となる。操作信号が連続するためには任意の時刻で各制御器から得られる操作信号が過去の履歴とは無関係に一意に決まる必要がある。すなわち、図 5(a)、(b) の外部ループの制御器に積分要素がないことが必要条件となる。この条件を満たさない制御系には、図 5(a) では力制御器にインピーダンス制御やコンプライアンス制御を用いた場合、図 5(b) では位置制御器に IP 制御や PI 制御を用いた場合が該当する。

以上より、制御モードの切り替え時に操作信号が連続しないタイプの制御系を除けば、図 5(a) と図 5(b) の制御系の制御モードの切り替えは可能である。また、図 5(a)、(b) の両図とともに、次の 3 章に示す同じ制御モード切り替え法が適用できる。

3. 位置と力の偏差に基づく制御モード切り替え法

3-1 位置と力の偏差に基づく制御モード切り替え法の提案 具体的な制御モード切り替え法として、著者の一人がその開発当初から関わってきた油圧ポンプの流量制御と圧力制御に関する制御モード切り替え法^(13,14)を本稿のロボット制御に応用する。油圧ポンプの制御に用いた制御モード切り替え法では制御モードの切り替えの判断に用いるモード信号は実操作信号でなくてもよいとされたが、制御モードの切り替え時

に操作信号が連続することが望ましい。そこで、時刻 $t = t_0$ のモード信号に式 (6)、(7) の実際の操作信号 $\Delta x, \Delta F$ を用いる。そして、時刻 $t = t_0$ において位置制御中の動作点 $A(x^r, F^r)$ (ただし、図 6 では $F^r = 0$) に対して目標点 $D(x^d, F^d)$ を与えた場合の柔らかな粘弾性体⁽⁷⁾に対する $x-F$ 線図を図 6 に示し、制御モードの切り替え方法を検討する。なお、目標点の与え方を変え、ロボットの動作を次の 3 つの場合に分けて考える。図 6(a) はロボットが対象物に非接触のまま位置変化するように目標点 D を与えた場合、図 6(b1)、(b2) はロボットが対象物に接触するように目標点 D を与え、また、目標点 D が位置と力の特性曲線の上側と下側になる場合である。

今ある状態 $A(x^r, F^r)$ で制御されたロボットに、位置と力の両方の目標値を含む目標点 $D(x^d, F^d)$ を与えることは、ロボットが環境に働きかける仕事の目標(目標エネルギー)を与えたことを意味する。そして、ロボットにこの仕事の目標(目標エネルギー)に合致するように駆動させることを考える。しかし、実際にロボットが動作できるのは位置と力の特性曲線上(図 6 の各図の太い実線部分)だけなので、目標点 D が位置と力の特性曲線上にない限り動作点 A を目標点 D に合致させることはできない。そこで、位置と力の目標値で囲まれる境界部分(図 6 の各図の細い実線部分)と位置と力の特性曲線との交点の制御モードでロボットを制御することを提案する。言い換えれば、ある時刻における制御モードの切り替え方法として、位置と力の偏差から計算される位置操作信号と力操作信号のうち、小さい方の操作信号の制御モードを選択する、すなわち、先に目標値に達した方の制御モードを選択せればよいことに他ならない。なお、この制御モード切り替え法を、本稿では位置と力の偏差に基づく制御モード切り替え法(SCOME法)と呼ぶ。

図 6(a) を例にとると、動作点 A を位置目標点 P まで位置制御させるか、力目標点 B まで力制御させるかの二つの制御が考えられるが、この場合、提案する

Fig.6 The reference points and the characteristic curve

制御モード切り替え法を実現するため位置目標点 P で位置制御させればよい。同様に、図 6(b1)では位置目標点 P で位置制御させ、図 6(b2)では力目標点 B で力制御をさせればよい。

3.2 切り替えアルゴリズム 時刻 $t = t_0$ において動作点 A が目標点 D の近傍にある場合をあらためて図 7(a), (b)に示す。ここで、位置と力の両操作信号 $\Delta x, \Delta F$ が等しくなる境界線を考え、式 (6), (7)を連立させ、式 (8)を得る⁽¹⁴⁾。

$$F^r = \frac{\mathcal{L}^{-1}\{G_x(s)\}_{t=t_0} x^r + \left[F^d - \frac{\mathcal{L}^{-1}\{G_x(s)\}_{t=t_0} x^d}{\mathcal{L}^{-1}\{G_F(s)\}_{t=t_0}} \right]}{\mathcal{L}^{-1}\{G_F(s)\}_{t=t_0}} \quad (8)$$

式 (8)は、時刻 $t = t_0$ で目標点 D を通る直線を表しておりこれを図 7 に破線で示す。3.1 節で示した提案する制御モード切り替え法に従えば、図 7(a)では動作点 A が式 (8) より下にあるので位置制御を、図 7(b)では動作点 A が式 (8) より上にあるので力制御を選択すればよいことがわかる。以上を整理し、式 (9)に示す切り替えアルゴリズムを得る。

$$\left. \begin{array}{l} \text{Mode} = \text{Position Control} \quad (\text{if } \Delta x \leq \Delta F) \\ \text{Mode} = \text{Force Control} \quad (\text{if } \Delta x > \Delta F) \end{array} \right\} \quad (9)$$

また、この制御モードの切り替えを実現する選択器を図 8 に示す。図 8 の破線を選択信号 ΔS と呼ぶ。

$$\Delta S = \Delta x - \Delta F \quad (10)$$

式 (9) と式 (10) から選択信号 ΔS の符号と制御モードが連動していることがわかる。なお、以上の議論は、位置 x を回転角 θ に、力 F をトルク T に置換えれば関節サーボ系にも同様に適用できる。

3.3 制御モード切り替え時の安定性 制御モードの切り替え機能を有した制御系では、一般的に制御モード切り替え時の安定性が問題となる。そこで、その安定性について検討する。まず、本稿で提案する制御モード切り替え法は、2.3 節から位置制御系と力制御系の両方が安定な図 5(a) または図 5(b) の制御系を用い、かつ、3.2 節から図 8 に示した制御モード選択器を有

していることを前提としている。これより、本手法を用いる場合、制御モードの切り替え時に操作信号が連続するので、基本的には制御モードの切り替え後も制御系は安定であると判断できる。ただし、制御モードの切り替え後の安定性を保証するものではないことに注意されたい。

例えば、目標点 D が位置と力の特性曲線近傍にあるとき、制御モードが連続的に切り替わることでチャタリングが起こることが予測される。これは、3.2 節より、操作信号の微小変動あるいは位置や力の応答値に変動があれば制御モードが変動し、位置制御と力制御が断続的に切り替わりやすくなることから理解できる。しかし、本手法を用いる場合、目標点 D が位置と力の特性曲線近傍に設定されることは稀だと考えられる。仮に、目標点 D が位置と力の特性曲線近傍にあると推測される場合でも、所望のロボットの制御方法が位置制御であれば図 7(a) のように力の目標値 F^d を大きく、所望のロボットの制御方法が力制御であれば図 7(b) のように位置の目標値 x^d を大きくすることで、目標点 D を位置と力の特性曲線から遠ざけることができ安定化が図れる。

このように、本手法を用いる場合、所望のロボットの制御方法を考慮した上で、制御モード切り替え時の安定化を図るために、目標点 D を位置と力の特性曲線から遠ざけるように位置の目標値と力の目標値を設定すればよい。

4. 制御器の設計

4.1 解析モデル 提案する制御モード切り替え法の有効性を検証するため、シミュレーションと実験を行う。図 5(b) の制御系が適用でき、かつ、ロボットが対象物に接触したときの衝突力の低減化を考慮し、図 9 の弾性関節を有する 1 自由度ロボットを解析モデルに選定した。モータ、減速機、弾性体、アームおよび対象物で構成された図 9 の解析モデルから、式 (11) を得る⁽¹⁵⁾。また、対象物から受ける反作用力

Fig. 7 A operating point and the equation (8)

Fig. 8 A selector of control modes

F_e 、および反作用力によるトルク T_e は式 (12) で表される。

$$J_m \ddot{\theta}_m = K_t I_m - D_m \dot{\theta}_m - T_f - \frac{K}{N} \left(\frac{\theta_m}{N} - \theta_a \right) \quad (11)$$

$$F_e = \frac{T_e}{L} = K_e L \dot{\theta}_a' + D_e L \dot{\theta}_a' \quad (12)$$

ここで、 J, θ, T はそれぞれ慣性モーメント、回転角とトルクを、下付きの添え字 $m, a, e, 0$ はモータ、アーム、対象物、対象物の初期位置を、 T_f, D はクーロン摩擦と粘性摩擦、 N, K は減速比とトルクセンサの剛性を表す。また、 J_m はモータ側から見たモータと減速機の等価慣性、 K_t, I_m をモータのトルク定数と電機子電流とし、アームが対象物に接触した時のアームの回転中心から接触位置までの長さを L 、対象物の変形量を θ_a' とした。

4.2 トルクコントローラ トルク制御系には、金子らが導いた加速度コントローラを用いたトルク制御法⁽¹⁵⁾を用いる。まず、モータに作用する外乱 T_{mdis} を式 (13) のように定義する。ただし、式 (13) では電機子電流 I_m はノミナルな参照電流値 I_m^{ref} に置き換えている。ここで、第1項は慣性変動トルク、第2項は粘性摩擦トルク、第3項はクーロン摩擦トルク、第4項はトルクリプル、第5項は弾性関節によるねじれ反力を表し、下付きの添え字 n はノミナル値を表す。

$$T_{mdis} = (J_m - J_{mn}) \ddot{\theta}_m + D_m \dot{\theta}_m + T_f + (K_t - K_{tn}) I_m^{ref} + \frac{K}{N} \left(\frac{\theta_m}{N} - \theta_a \right) \quad (13)$$

式 (13) の外乱 T_{mdis} を除去するため、電機子電流 I_m とモータ回転角 θ_m は計測または計算可能とし、図 10 に示す外乱オブザーバで推定外乱 $\hat{T}_{mdis}$ を直接算出し、参照電流値側に補償電流 I_{cmp} としてフィードバックする。図 10 から外乱が系に与える影響を表す式 (14)

Fig.9 Simulation model

の感度関数 $G_s(s)$ が得られ、外乱等価加速度 $P^{(16)}$ を用いると、解析モデルのブロック線図は図 11 のように表される。

$$G_s(s) = \frac{s^2 + \alpha_1 s}{s^2 + \alpha_1 s + \frac{K_t}{K_{tn}} \alpha_2} \quad (14)$$

ここで、外乱オブザーバの2次フィルタの遮断周波数を制御系の動作周波数領域以上に十分大きくすると $P \rightarrow 0$ ($G_s(s) \rightarrow 0$) とでき、図 11 のモータ側は外乱の影響を受けないロバストな系となる。さらに、モータの参照指令値を式 (15) とし、微分プロセスを避け高域のノイズを低減するために式 (16) に示す二次遅れ要素 $G_d(s)$ を挿入すれば、システムが持つねじれ反力の機械的フィードバックを打ち消すことができる。ただし、 K_{Tp}, K_{Tv} はトルク制御器での比例ゲインと速度ゲインである。この二次遅れ要素の遮断周波数を所望の動作周波数よりも大きく、すなわち、所望の動作周波数範囲で $G_d(s) = 1$ とできれば理想的なトルク制御系を表す式 (17) が得られる。

$$\ddot{\theta}_m^{ref} = \left\{ \left(\frac{\ddot{T}_a^d}{K_n} + \ddot{\theta}_a \right) N + K_{Tv} \left\{ \left(\frac{\dot{T}_a^d}{K_n} + \dot{\theta}_a \right) N - \dot{\theta}_m \right\} + K_{Tp} \left\{ \left(\frac{T_a^d}{K_n} + \theta_a \right) N - \theta_m \right\} \right\} G_d \quad (15)$$

$$G_d(s) = \frac{\beta_2}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} \quad (16)$$

$$J_a \ddot{\theta}_a = \frac{K}{K_n} T_a^d - T_e \quad (17)$$

Fig.10 Observer-based joint system

Fig.11 Equivalent block diagram of control system

4.3 アーム回転角コントローラ 式(17)のダイナミクスで示されるアームに対して、 $K_{\theta p}$ ・ $K_{\theta v}$ を回転角制御器での比例ゲインと速度ゲインとして、PD制御による回転角コントローラを設計する。しかし、単に式(17)を用いただけではアームが力を受けながら回転角制御する場合に大きな定常位置偏差を生じる。そこで、式(12)から算出されるトルクを用いてトルクフィードバック⁽¹⁷⁾し、アームに加わる外乱を補償する。ただし、起動時に発生する慣性トルクなどを過補償しないために高周波数成分の影響を除く必要があり、トルクフィードバック上に、式(16)と同様の2次フィルタ $G_T(s)$ (係数は γ_1, γ_2)を挿入する。

4.4 制御モード切り替え法の適用 図 9 の解析モデルに 4.2 節と 4.3 節の制御器、および位置と力の偏差に基づく制御モード切り替え法を適用した制御系全体のブロック線図を図 12 に示す。なお、図 12 の破線部は、図 8 の制御モード選択器を示す。

5. シミュレーション

提案する制御モード切り替え法の有効性を検証するため、また 6 章の実機実験で用いる制御パラメータを決定するために図 9 のモデルについて MATLAB を用いてシミュレーションを行った。計算に用いたパラメータを表 1 に示す。減速機付 DC サーボモータのパラメータは、市販されている定格出力 18.5 W の DC サーボモータのカタログから引用した。ただし、クーロン摩擦係数 T_f 、粘性係数 D_m は推測値である。また、接触する対象物はゴムとし、その剛性は志村らの 1 自由度ロボットの実験結果⁷⁾を平面剛性に換算し $K_e = 30000 \text{ N/m}$ とし、対象物の粘性係数は不明なため $D_e = 1 \text{ Ns/m}$ とした。制御には、モータ側とアーム側の回転角センサ出力だけを利用した。アームはその先端の球体部を対象物に接触するものと考え、アームに作用する摩擦力等の非線形項と対象物との衝突力は無視し、接触力は対象物の変形に要する値とした。さらに、モータと減速機の慣性モーメント、モータのトルクリプルおよびトルクセンサの剛性変動はないものと考え、 $J_m = J_{mm}$ 、 $K_f = K_{fn}$ 、 $K = K_n$ とした。

5-1 トルク制御とアーム回転角制御 アームを対象物に接触させた状態を想定しトルク制御シミュレーションを行なった。速応性とオーバーシュートを考慮し、比例ゲイン K_{Tp} と速度ゲイン K_{Tv} を表 1 のように決めた。次に、アームを自由応答させ、回転角制御の位置ゲイン $K_{\theta p}$ と速度ゲイン $K_{\theta v}$ を、速応性と安定性の両面を考慮し表 1 のように決めた。ところで、アームに加わる外乱トルクを補償するためトルクフィードバックを施し 2 次フィルタ $G_T(s)$ を挿入しているが、トルクフィードバックを強く（フィルタの遮断周波数を高く）すればする程、自由応答時にアーム慣性により発生する外乱トルクを過補償する恐れがある。そこで、速応性と安定性の観点から、このフィルタの係数 γ_1 と γ_2 を表 1 のように決定⁽¹²⁾ した。

5.2 アーム回転角とトルクの制御

提案する制御モード切り替え法を用いて、アーム初期位置から対象物までの距離 θ_0 を変化させた場合の 2 段階ステップ応答を図 13 に示す。ここで、選択信号 ΔS が正であればトルク制御を、0 または負であれば回転角制御になっていることを意味する。なお、選択信号 ΔS は $+1 \text{ Nm}$ に制限して示した。また、前もってロボット

Table 1 System Parameters for simulation

DC Servo Motor with Reduction Gears	Inertia	J_m, J_{mn}	0.0000081	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$
	Torque Constant	K_t, K_{tn}	0.0576	Nm/A
	Damping	D_m	0.005	Nm · s/rad
	Friction	T_f	0.02	Nm
	Gear Ratio	N	100	—
Elastic Body	Stiffness	K, K_n	100	Nm/rad
Robot Arm	Inertia	J_a	0.0046	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$
	Length of Arm	L	0.1	m
Torque Controller	Prop. FB Gain	K_{Tp}	1000	1/s ²
	Velocity FB Gain	K_{Tv}	200	1/s
	Filter of Observer	α_1	1950	rad/s
		α_2	950000	rad ² /s ²
		β_1	1950	rad/s
		β_2	950000	rad ² /s ²
Position Controller	Prop. FB Gain	$K_{\theta p}$	100	Nm/rad
	Velocity FB Gain	$K_{\theta v}$	10	Nm · s/rad
	Filter G_T	γ_1	93	rad/s
		γ_2	2170	rad ² /s ²
Object	Stiffness	K_e	30000	N/m
	Damping	D_e	1	Ns/m

Fig.12 Block diagram of the total control system with the proposed method for switching control modes

に対象物の位置情報を与えている訳ではなく、ロボットにとって対象物の位置は未知である。図 13 より、1 段目の $\theta_a^d = 0.02$ rad の応答は全て回転角制御になっているが、2 段目の $\theta_a^d = 0.05$ rad の応答では、 $\theta_0 = 0.04$ rad だとトルクを受けながらの回転角制御であり、 $\theta_0 = 0.03$ rad 以下だとトルク制御に切り替わっていることがわかる。また、回転角制御では整定するまでに 0.5 秒程度の遅れがあるが、大きな振動は見られず回転角制御とトルク制御の制御モードが安定して切り替わっていることが確認できる。

さらに、図 14 に、トルク目標値を 4 Nm とした上で、まずアーム角度を 0.1 rad に定回転角制御し、その後、対象物を振幅 0.1 rad、0.2 Hz の正弦波状の運動でアームに繰り返し接触させた結果を示す。なお、図中の細い実線は制御モードの閾値 $T_S = 2$ Nm とした従来の切り替え法を用いた場合であり、この場合に限り選択信号 ΔS に代わる信号として $T_a - T_S$ を示した。従来の切り替え法(細い実線)では、一旦トルク制御に

切り替われば、対象物が回転角目標値から離れる場合もトルク制御を保持しようとして接触したまま対象物に追随する。しかし、提案する制御モード切り替え法(太い実線)では、選択信号 ΔS が振動なく正から負に変化していることから、トルク制御から回転角制御にスムーズに切り替わっていることが確認できる。

6. 実 験

弾性関節を有する 1 自由度ロボットを用いて実機実験を行い、提案する制御モード切り替え法の有効性を検証する。実験装置を図 15 に、実験装置のパラメータを表 2 に示す。駆動部にはハーモニックドライブギア式の減速機付 DC サーボモータを使用し、アームの対極にカウンタウエイトを取り付けアームの重力項の影響を小さくした。弾性体には $\phi 5.2$ mm、長さ 50 mm の鉄製丸棒を用いた。制御にはモータ側とアーム側のエンコーダ出力のみを利用し、弾性体に取り付けたトルクセンサは弾性体の剛性 K を求めるための予備実験とトルクのモニタのためだけに用いた。また、対象物に接触するアーム先端部分にステンレスの球体部(袋ナット)を取付け、実験には厚み 20 mm のゴム板を対象物として用いた。なお、対象物への接触実験に先立ち、弾性体の剛性を実験的に求め $K = 97.6$ Nm/rad を得た。

図 16 に、アームと対象物までの距離を約 20 mm とし、トルク目標値を 4 Nm とした上で、アームを振幅 0.262 rad、0.2 Hz の正弦波状の運動でゴム板に接触させた場合の実験結果を示す。なお、制御のサンプリング時間は 2 ms とした。従来の切り替え法では、一旦トルク制御に切り替われば、何らかの外的な判断機能を用いて強制的に制御モードを切り替えなければ回転

Fig.13 Simulation results of step response

Fig.14 Simulation results of the object moving

Fig.15 Experimental setup

Table 2 System parameters for experiment

DC Servo Motor with Reduction Gears	Rated Output	18.5	W
	Rated Torque	5.9	Nm
	Torque Constant	5.76	Nm/A
	Gear Ratio	100	—
	Rotary Encoder	1000	pulses/rev
Robot Arm	Length of Arm	0.10	m
	Rotary Encoder	81000	pulses/rev

角制御に切り替わることはないが、提案する手法では、回転角目標値の変化に追従しトルク制御から回転角制御にフレキシブルに制御モードが切り替わっていることが確認できる。

7. 結 言

ロボットの位置制御と力制御の制御モード切り替え法について検討し、以下の結果を得た。

(1) 位置制御系と力制御系と制御モードを切り替える選択器を有する位置と力の制御系を2種類に分類し、制御モードの切り替え時に位置制御と力制御の操作信号が連続する制御系があることを示した。なお、制御モードの切り替え時に操作信号が連続し、かつ、それぞれの制御系が安定であるとすれば、制御モードを切り替えても制御系の安定性には影響しないと判断できる。

(2) 位置と力の偏差から計算される位置操作信号と力操作信号のうち、小さい方の操作信号の制御モードを選択する、すなわち、先に目標値に達した方の制御モードを選択する位置と力の偏差に基づく制御モード切り替え法(SCOME法)を提案した。

(3) 提案する制御モード切り替え法はシンプルなアルゴリズムで実現できることを示し、弾性関節を有する1自由度ロボットに対する回転角とトルクの切り替え制御系を設計した。

(4) 弾性関節を有する1自由度ロボットのシミュレーションと実機実験により、回転角制御からトルク制御に、トルク制御から回転角制御にとフレキシブルに制御モードが切り替えられることを示し、提案する制御モード切り替え法の有効性を示した。

謝 辞

本研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業「医工学研究の新展開」の支援を受けた。ここに記して謝意を表する。また、本研究の一部は、(財)南海育英会の支援を受けた。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- (1) Kosuge, K., Force Control of Manipulators, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.9, No.6 (1991), pp.751-758.
- (2) Kobayashi, H., et al., *Actual robot control* (in Japanese), (1997), pp.118-130, The Society of Instrument and Control Engineers.
- (3) Hogan, N., Impedance Control, Part I-III, *Transaction of the ASME, Journal of DSCM*, No.107 (1985), pp.1-24.
- (4) Yokoi, K., Maekawa, H., Tanie, K., A Method of Compliance Control for a Robotic Arm with Redundant Degrees of Freedom, *Transactions of the Robotics Society of Japan*, Vol.11, No.1 (1993), pp.121-130.

Fig.16 Experimental results

- (5) Hyde, J.M. and Cutkosky, M.R., Contact Transition Control: An Experimental Study, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1993), pp.363-368.
- (6) Yangming, X., Hollerbach, J.M. and Donghai, M., Force and Contact Transient Control Using Nonlinear PD Control, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1994), pp.924-930.
- (7) Shimura, K., and Hori, Y., Robustified Force and Collision Control for Robot Manipulator, *Transactions of the Robotics Society of Japan*, Vol.11, No.2 (1993), pp.235-245.
- (8) Raibert, M.H., and Craig, J.J., Hybrid Position/Force Control of Manipulators, *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol.102, (1981), pp.126-133.
- (9) Shimada, A., et al., *Next Generation's Motion Control and The practical use of it* (in Japanese), Technical report of the Institute of Electrical Engineers of Japan, No.734 (1999), pp.56-59.
- (10) Yamada, T., and Yabuta, T., Changing Method of Control Mode for Manipulators at Impact of Objects, *Proceedings of the 20th ISIR*, (1989), pp.593-600.
- (11) Itabashi, K., Yamada, K., Suzuki, T., Okuma, S., Contact Force Control Based on Learning Operation without Switching the Servo Mode at the Instant of the Impact, *Transactions of the Japan Society Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 62, No.596 (1996), pp.1473-1479.
- (12) Yamasaki, Y., Yokogawa, R., Hara, K., A Changing Method of Position and Force Control Modes for an Articulated Manipulator Coming in Contact with Soft Objects, *The Science and Engineering Review of Doshisha University*, Vol.39, No.1 (1998), pp.21-32.
- (13) Suhara, M., Miyagi, J., Yamasaki, Y., "A Feedback Controller of Hydraulic Pump", Japanese Patent No.2011322.
- (14) Kayukawa, H., Yamada, H., Muto, T., Fundamental Study of Power-Match Control of Hydraulic Power Systems (Power-Match Control Applied to a Physical Model of Injection Molding Machine), *Transactions of the Japan Society Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 61, No.588 (1995), pp.3295-3302.
- (15) Kaneko, K., Suzuki, N., Ohnishi, K., Tanie, K., A Study on the Torque Control of a DC Motor With Reduction Gears (2nd, Report), *Transactions of the Japan Society Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 58, No.546 (1992), pp.484-491.
- (16) Ohnishi, K., Robust Motion Control by Disturbance Observer, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.11, No.4 (1993), pp.486-493.
- (17) Hashimoto, M., Motion Control of Robot Arms with Reducers Based on Joint Torque Feedback, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineer*, Vol.25, No.2 (1989), pp.188-193.