関節の加速度コントローラによる ロボットのモーションコントロール

駒 田 諭* 大 西 公 平**

Motion Control of Robot Manipulators by Joint Acceleration Controllers

Satoshi KOMADA Kouhei OHNISHI

This paper proposes a simple and high performance motion control method of robot manipulators in task-oriented coordinates. In the proposed method, it is necessary that each joint generates the specified acceleration by the controller of each joint. To extend the result to multi-degrees-of-freedom robot manipulators, the acceleration tracing orientation method (ATOM) is obtained. The ATOM is a controller design method in task-oriented coordinates. High performance position controller and hybrid position/force controller are easily realized by the ATOM. From the analyses of the controllers, it is known that the precise acceleration controller is the key to improve the performance of the ATOM. The realization of the strict acceleration controller, however, is almost impossible by using the conventional disturbance compensation methods. For example, the inverse dynamics has complicating calculation and is weak against parameter variations. A recent research about disturbance observer enables the realization of the acceleration controller. Contrary to the inverse dynamics, the observer is simple and robust against parameter variations. High performance acceleration controller is realized by the disturbance observer. The effectiveness of the ATOM is shown by some experiments of a three-degrees-of-freedom robot.

Key Words: Robot manipulators, Acceleration controller, Position controller, Hybrid position/force controller, Disturbance observer

1. ま え が き

多関節ロボットには重力や、慣性変動、摩擦力などの様々な干渉力が存在するため高速制御や、正確な力制御を行うには多くの補償を必要としてきた¹⁻⁵⁾。従来のロボットの制御においては、これらの外乱を除去するために各々の外乱を逐次計算する逆動力学を用いる方法が提案されている^{3,4)}。しかし膨大な計算量のため、このようなアルゴリズムを用いる産業用ロボットの実例はない。逆動力学はクーロン摩擦などのパラメータ変動に対してロバストではなく、さらに高性能な制御を望むのは難しい。

もし各関節の全ての外乱を除去できれば、ロボットの各関節は加速度指令通りの加速度を発生する加速度コントローラとすることができる⁴⁾。各関節が加速度コントローラとなるならば、ロボットの高性能化を計ることが容易である。

しかし、逆動力学を用いて各関節の外乱を取り除き加速度コントローラを行うには計算量が多く、マイクロプロセッサレベルによる実現は困難である。実際に実用的な加速度コントローラを構成するためには、計算量が少なくパラメータ変動に対してロバストな外乱除去方法が必要である。インバリアンス制御の考え方を用いて外乱を除去する方法がすでに提案されているが、実用的にその中に必要な加速度を測定する手段がないため実際の制御にこの方法は使われていなかった⁶⁾。

原稿受付 1989 年 7 月 24 日

* 三重大学工学部 ** 慶応義塾大学理工学部

それに対して、関節の速度を用いてオブザーバにより外乱を計算し、それをフィードバックすることで外乱を除去する方法が提案され、その有効性が確認されている⁷⁾。この方法は計算量が少なく、パラメータ変動に対してロバストで、ロボットの制御で一般に用いられている電流センサと速度検出器を用いるだけで簡単に外乱が除去できる。このオブザーバによる方法で高速軌跡制御⁸⁾及び力フィードバック制御^{9,10)}の実現が報告されている。

本論文ではこれを更に発展させ、ロボットの各関節を加速度コントローラとすることにより、作業座標において高性能制御を行うことができる加速度追従法^{11,12)}を提案する。まずロボットの各関節に加わる外乱を示し、加速度コントローラとなるための条件を検討する。さらに、ロボットの作業座標での加速度コントローラの特性を誤差方程式により明らかにする。次に作業座標での特性を用いて、位置コントローラや力コントローラを加速度追従法に基づいて構成し、その有効性を示す。以上の制御に用いられる加速度追従法は、各関節が加速度コントローラとなっていることが基本である。即ち、作業座標で加速度指令を求めるコントローラを構成して、それを等価な関節の加速度に変換し加速度コントローラへの指令とする。加速度コントローラを構成するための実際的な方法として、加速度信号を用いる方法及び、速度信号から外乱を求めるオブザーバを使う方法を紹介し、その特性を検討する。最後に多自由度ロボットでの実験を通じ、その結果を比較検討することにより提案する方法の有効性を示す。

2. 加速度コントローラをもつマニピュレータの特性

2.1 関節の外乱と加速度コントローラ

トルク定数 K_t のアクチュエータで駆動されるロボットの各関節のブロック線図は Fig. 1 のように表わされ

Fig. 1 Block diagram of robot joint

Fig. 2 Disturbance compensation of each joint

る。 q は関節の角度を表わしており、関節の速度のラプラス変換を $\dot{q}$ 、加速度のラプラス変換を $\ddot{q}$ と定義している。ここで J は関節の慣性モーメント、 D は粘性係数である。他に外乱として、相互慣性力、遠心力やコリオリ力や重力による干渉トルク T_{int} 、関節の摩擦トルク T_{frc} 、接触作業を行う場合の接触力 T_{ext} が存在する。関節の動きの妨げになるこのような外乱の総和を (1) 式で定義する。

$$T_{dis}^{comp} = T_{int}(q, \dot{q}, \ddot{q}) + (J - J_n)\ddot{q} + D\dot{q} + T_{frc} + T_{ext} + (K_{tn} - K_t)I_a \quad (1)$$

ここで J_n, K_{tn} はノミナルな定数を表わしている。(1) 式の第 1 項目は他の関節からの相互慣性力、遠心力、コリオリ力、重力による干渉力である。第 2 項目以下は自己慣性変動力、関節の粘性力、クーロン摩擦力、ロボットの接触作業による対象物からの反作用力、アクチュエータのトルクリプルである。これらの外乱は関節の角度、速度、加速度をパラメータとして含む関数や、複雑に変動する変数で表現される。また、これらの外乱はマニピュレータの各関節に印加されるが、アクチュエータで決まる最大トルクの範囲に関節の加減速に使われるトルクと外乱トルクの和が収まるならば、全ての外乱を除去することは可能である。

各関節の外乱を抑圧するために Fig. 2 のように T_{dis}^{comp} と、ある周波数特性 $G^{comp}(s)$ の積を K_{tn}^{-1} 倍してフィードバックする。ここで、補償されるべき外乱を (2) 式のように定義する。

$$T_{dis} = T_{int}(q, \dot{q}, \ddot{q}) + (J - J_n)\ddot{q} + D\dot{q} + T_{frc} + T_{ext} + (K_{tn} - K_t)I_a^{ref} \quad (2)$$

(2) 式は (1) 式の外乱の定義式の電機子電流 I_a に対するトルクリプルの項を、電流指令値 I_a^{ref} に対するも

Fig. 3 Equivalent performance of disturbance compensated system

Fig. 4 Block diagram of acceleration controller

のに変えている。この様な外乱の定義に基づいて Fig. 2 のブロック線図を変換すると Fig. 3 となる。ここで、(2) 式の外乱の関節に対する影響 $G(s)$ は、

$$G(s) = \frac{1 - G^{cm}p(s)}{1 - G^{cm}p(s) \left(1 - \frac{K_t}{K_{tn}}\right)} \quad (3)$$

となる。従って、 $|G(j\omega)|$ がなるべく小さくなるように $G^{cm}p(s)$ を選ぶことでロボットの性能の向上が計れる。

Fig. 3 のようにトルク定数と慣性モーメントが公称値に固定されているならば、Fig. 4 のように加速度指令値の J_n/K_{tn} 倍を電流指令値 I_a^{ref} とすることによって加速度コントローラが実現される。このときの周波数領域での加速度の応答は (4) 式で示される。

$$\ddot{q} = \ddot{q}^{ref} - \frac{G(s)}{J_n} T_{ats} \quad (4)$$

この式から、外乱の影響がないか無視できるほど小さいならば、各関節は加速度指令通りの加速度の応答が得られることがわかる。また、この式を時間領域に変換すると、

$$\ddot{q}(t) = \ddot{q}^{ref}(t) - p(t) \quad (5)$$

となる。ここで抑圧外乱加速度 $p(t)$ は外乱の影響を示す要素で、逆ラプラス変換によって

$$p(t) = \mathcal{L}^{-1}[J_n^{-1}G(s)T_{ats}] \quad (6)$$

と定義される。

2.2 作業座標での加速度コントローラ

ロボットの関節の角度を表すマニピュレータの一般化座標 q 、作業座標における 3 自由度並進と 3 自由度回転を表す x の関係は順運動学の座標変換 $L(\cdot)$ によって (7) 式で関係付けられる。

$$x = L(q) \quad (7)$$

これを微分することによって速度、加速度の関係は次式となる。

$$\dot{x} = J_{aco}\dot{q} \quad (8)$$

$$\ddot{x} = J_{aco}\ddot{q} + \dot{J}_{aco}\dot{q} \quad (9)$$

ここで J_{aco} はマニピュレータのヤコビ行列を表わしている。(7)、(8) 式は関節座標での位置と速度を作業座標での位置と速度に変換する。(9) 式を変形して作業座標における加速度指令を関節の加速度指令に変換する式を (10) 式とする。

$$\ddot{q}^{ref} = J_{aco}^{-1}(\ddot{x}^{ref} - \dot{J}_{aco}\dot{q}) \quad (10)$$

一方、各関節が (5) 式のように外乱の補償がなされているならば、マニピュレータの一般化座標における式は次のようになる。

$$\ddot{q} = \ddot{q}^{ref} - p \quad (11)$$

ここで、 p は各関節の外乱の影響を表す加速度ベクトルであり、(6) 式から求めたものである。この p を抑圧外乱加速度ベクトルと呼ぶことにする。(10) 式によ

って各関節の加速度指令が算出されるので、これを (11) 式に代入すると、

$$\ddot{q} = J_{aco}^{-1}(\ddot{x}^{ref} - \dot{J}_{aco}\dot{q}) - p \quad (12)$$

となる。上式を変形して (9) 式の関係を用いれば

$$\ddot{x} = \ddot{x}^{ref} - J_{aco}p \quad (13)$$

となり作業座標の関係が得られる。さらに、(13) 式を変形すれば (14) 式となり、これは作業座標における加速度誤差を表わす。

$$\ddot{x}^{ref} - \ddot{x} = J_{aco}p \quad (14)$$

(14) 式は作業座標の加速度誤差が各関節の抑圧外乱加速度ベクトルをヤコビ行列で各座標に分配した形で表わされることを示している。このとき J_{aco} は XY テーブルなどのマニピュレータを除いて一般的に対角行列とはならないため、抑圧外乱加速度ベクトル p の各要素が零とならなければ、作業座標での各方向の加速度応答はヤコビ行列を通じてあらゆる関節の外乱の影響を受けることがわかる。また、抑圧外乱加速度ベクトル p が無視できるほど小さければ作業座標での加速度指令通りの加速度となることがわかる。

3. 加速度追従法¹⁾

加速度追従法 (Acceleration Tracing Orientation Method: ATOM) は各関節が加速度指令通りの加速度を発生することを前提とするロボットの制御方法であり、その概略は以下の通りである。

- ① ロボットの各関節を加速度指令に追従する加速度コントローラとする。
- ② 作業座標でいくつかのコントローラを構成し加速度指令を計算する。
- ③ 作業座標での加速度指令の和をそれと等価な関節座標での加速度に変換し、加速度コントローラの指令とする。

前章での考察により、各関節が加速度コントローラであれば作業座標での加速度指令通りの加速度応答が得られるので、この方法でコントローラを構成すれば高速な作業座標での応答を期待できる。次に制御系を構成するいくつかの実例を示す。

3.1 位置コントローラ

加速度追従法に基づいて位置コントローラを構成すると Fig. 5 となる。このコントローラは作業座標において位置、速度、加速度ベクトルの 3 つを指令入力としている。作業座標での位置と速度ベクトルは関節座標での位置、速度ベクトルから (7)、(8) 式によって各々求まる。 K_1, K_2 は各々速度偏差、位置偏差のゲイン対角行列である。作業座標では次式のように加速度指令ベクトルを計算する。

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{x}}^{ref}(t) = & \ddot{\mathbf{x}}^{cmd}(t) + \mathbf{K}_1(\dot{\mathbf{x}}^{cmd}(t) - \dot{\mathbf{x}}(t)) \\ & + \mathbf{K}_2(\mathbf{x}^{cmd}(t) - \mathbf{x}(t)) \end{aligned} \quad (15)$$

この作業座標の加速度指令を (10) 式を用いて関節座標での加速度指令ベクトルに変換する。この加速度追従法に基づく位置コントローラの特性を検討するために、(15) 式を作業座標での加速度コントローラの特性を示す (13) または (14) 式に代入すると、

$$\begin{aligned} (\ddot{\mathbf{x}}^{cmd} - \ddot{\mathbf{x}}) + \mathbf{K}_1(\dot{\mathbf{x}}^{cmd} - \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{K}_2(\mathbf{x}^{cmd} - \mathbf{x}) \\ = \mathbf{J}_{aco}\mathbf{p} \end{aligned} \quad (16)$$

となる。従って、右辺の外乱の項が $\mathbf{0}$ または無視できるほど小さいならば指令通りの位置、速度、加速度応答が得られ、定常的にも過渡的にも指令に追従する。また、作業座標の各方向間の干渉もない。

これをラプラス領域で表現すると (17) 式となる。

$$(\mathbf{S}^2 + \mathbf{K}_1\mathbf{S} + \mathbf{K}_2)(\mathbf{x}^{cmd} - \mathbf{x}) = \mathcal{L}[\mathbf{J}_{aco}\mathbf{p}] \quad (17)$$

ここで $\mathbf{S}$ はラプラス演算子 s を要素として持つ対角行列を表わしている。また、ブロック図で表現すれば Fig. 6 となる。ここで $\mathbf{J}_n$ は各関節の公称慣性モーメントを、 $\mathbf{G}$ は外乱の除去特性をそれぞれ対角要素として持つ行列を表わしている。 $\mathbf{t}_{dis}$ は各関節の外乱 T_{dis} を示すベクトルである。この様に外乱の項には非線形なヤコビ行列が存在するが、その他は作業座標で線形な関係で表わすことができる。従って外乱が零かまたは無視できるほど小さいならば、作業座標において線形コントローラが構成できる。 $\mathbf{p} = \mathbf{0}$ であれば (17) 式右辺は $\mathbf{0}$ となり、

$$\det(\mathbf{S}^2 + \mathbf{K}_1\mathbf{S} + \mathbf{K}_2) = 0 \quad (18)$$

の全ての固有値が複素平面の左半平面に存在すれば、安定に位置指令と同じ位置の応答が得られる。また、

$$\lim_{s \rightarrow 0} \mathbf{S} \mathcal{L}[\mathbf{J}_{aco}\mathbf{p}] = 0 \quad (19)$$

ならば

$$\lim_{s \rightarrow 0} (\mathbf{S}\mathbf{x}^{cmd} - \mathbf{x}) = 0 \quad (20)$$

となる応答が得られる。過渡誤差は (18) 式で示されるコントローラの固有値と (17) 式で示される外乱に対する特性の相互作用によって決まる。(19) 式から、外乱除去特性 $G(s)$ は収束性の良い、カットオフ周波数の高

Fig. 5 Multi-degrees-of-freedom position controller based on the acceleration tracing orientation method

いハイパスフィルタが要求される。具体的な設計例は後節で示す。

3.2 位置と力のハイブリッドコントローラ⁵⁾

前節と同様に加速度追従法で位置と力のハイブリッドコントローラを構成する場合を Fig. 7 に示す。図の上側は新しく加わった力コントローラで、下側は Fig. 5 で示した位置コントローラである。ここで $\mathbf{H}$ はコンプライアンス選択対角行列であり、その対角要素により位置制御、力制御の選択をする。すなわち、対角要素が 1 ならばその方向に位置制御を行い、逆に 0 ならば力制御を行う。力コントローラでは力偏差を任意の対角質量行列 $\mathbf{M}$ の逆行列を用いて加速度指令としている。このときの作業座標の加速度指令は、

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{x}}^{ref}(t) = & \mathbf{H}\{\ddot{\mathbf{x}}^{cmd}(t) + \mathbf{K}_1(\dot{\mathbf{x}}^{cmd}(t) - \dot{\mathbf{x}}(t)) \\ & + \mathbf{K}_2(\mathbf{x}^{cmd}(t) - \mathbf{x}(t))\} \\ & + (\mathbf{I} - \mathbf{H})\{\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{f}^{cmd}(t) - \mathbf{f}(t)) \\ & - \mathbf{K}_1\dot{\mathbf{x}}(t)\} \end{aligned} \quad (21)$$

となっている。上式の右辺第 2 項目は力制御の加速度指令を計算しており、速度フィードバックは力制御の安定化のために加えられている。加速度追従法に基づく位置コントローラの解析は前節で行ったので、ここでは力コントローラの解析を行う。(21) 式と (13) または (14) 式から次の関係が求まる。

$$\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{f}^{cmd} - \mathbf{f}) - (\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_1\dot{\mathbf{x}}) = \mathbf{J}_{aco}\mathbf{p} \quad (22)$$

力制御の力の応答は力を加える物体の特性によって影響を受ける。そこで、力を加える対象をバネ係数 $\mathbf{K}_e$ と粘性係数 $\mathbf{D}_e$ でモデル化すると力の応答は、

$$\mathbf{f} = \mathbf{D}_e\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_e\mathbf{x} \quad (23)$$

となる。ただし、ここでの $\mathbf{x}$ は力を加えた対象物体の押下距離を表わしている。(22) 式に (23) 式を代入すると、

$$\begin{aligned} \mathbf{M}^{-1}\mathbf{f}^{cmd} - \{\ddot{\mathbf{x}} + (\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D}_e + \mathbf{K}_1)\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}_e\mathbf{x}\} \\ = \mathbf{J}_{aco}\mathbf{p} \end{aligned} \quad (24)$$

となり、力指令 $\mathbf{f}^{cmd}$ に対する位置の応答 $\mathbf{x}$ が求まり、それを (23) 式に代入すれば力の応答が得られる。この式より、右辺の外乱の影響が十分に小さければ定常的に

Fig. 6 Block diagram of position controller in task-oriented coordinates

Fig. 7 Hybrid position/force controller based on the acceleration tracing orientation method

力指令どおりの力の応答が得られることがわかる。さらに、力を加える物体の特性がわかっているならば力制御の動特性も自由に決めることが可能である。また、前節の位置コントローラと同様に作業座標でも各方向の干渉はないことがわかる。

位置コントローラと同様に、この力コントローラを周波数領域で表現すると Fig. 8 となる。この図より、対象が (23) 式で表わされる限り外乱以外は全て線形となることがわかる。(23) 式と (24) 式から力指令と力の応答の関係は

$$f^{cmd} - \frac{MS^2 + (D_e + MK_1)S + K_e}{D_e S + K_e} f = M L [J_{aco} p] \quad (25)$$

となる。これによって力を加える対象の動特性からコントローラのパラメータを求め、さらに (19) 式のように外乱の影響が除去できるならば、所望の応答を実現することが可能である。

4. 外乱の除去方法

外乱の除去方法としては逆力学を用いるのが一般的であるが、この方法で (2) 式の外乱全てを取り除くことは計算量の点で実用的ではなく、摩擦力のようなパラメータ変動に対して弱いなどの欠点がある。ここでは加速度情報に基づく外乱補償方法を用いることにする。

4.1 関節の加速度を用いる場合

Fig. 9 のように各関節の加速度と電機子電流を用いて計算すると $G^{cmp}(s) = 1$ となり、(1) 式の外乱を遅れなく計算できる⁹⁾。そしてその値をフィードバックすると Fig. 3, Fig. 4 の外乱に対する伝達関数 $G(s)$ は (3) 式より零伝達関数になり、外乱の影響が零になる。従って位置コントローラの (16), (17) 式の右辺とカコ

Fig. 8 Block diagram of force controller in task-oriented coordinates

ントローラの (24), (25) 式の右辺の外乱の項が全て 0 となり、作業座標の各方向での干渉はまったく見られない。この方法は外乱除去方法としては理想的なものであるが、実際にロボットの制御に適用されていない。角加速度を求めるには加速度計を用いる方法が考えられるが、理想的な加速度計は現状では難しい。また、タコジェネレータの微分ではノイズのない加速度を得ることは不可能である。これらの理由から、この方法で加速度コントローラを構成することは現状では難しいといえる。

4.2 関節の速度を用いる場合

加速度を用いると前節のように理想的なコントローラが構成できる。しかし、実際に加速度を測定するには困難が伴う。そこで、速度検出器を用いて外乱を除去する方法を示す。Fig. 10 では (1) 式の外乱を

$$G^{cmp}(s) = \frac{g}{s+g} \quad (26)$$

の様に一次遅れで計算する最小次元オブザーバを用いている⁷⁾。計算された外乱をフィードバックすると Fig. 3,

Fig. 9 Block diagram of disturbance compensation by joint acceleration signal

Fig. 10 Block diagram of disturbance compensation by disturbance observer

Fig. 4 の外乱に対する伝達関数 $G(s)$ は、

$$G(s) = \frac{s}{s+g'} \quad (27)$$

の低域遮断フィルタとなる。ここで g' は

$$g' = \frac{K_t}{K_{tn}} \quad (28)$$

となっている。従って遮断周波数 g' が外乱の周波数成分よりも十分大きければ、外乱の影響はほとんど零とみなしても差し支えない。特に、定常的な外乱は $G(0)=0$ という性質によって g' にかかわらず零に収束する。オブザーバの遮断周波数の上限は速度検出器のノイズにより制限されるため、制御系の要求する性能に応じて速度検出器を選択する必要がある。外乱オブザーバはここで紹介した1次元オブザーバだけでなく次数の高いオブザーバとすることも可能である¹³⁾。以下ではこの1次元オブザーバで加速度追従法を実現している。

5. 実験結果

加速度追従法の実験で明らかにするため、Fig. 5, Fig. 7 の位置コントローラ、位置と力のハイブリッドコントローラを Fig. 11 の3自由度ロボットに適用する。

Fig. 11 Tested manipulator

Fig. 12 のように座標の原点をロボットの先端の目標位と置とし、その座標の方向を x, y, z の3自由度並進にする。ロボットの先端には3自由度力センサが取り付けられ、3方向の力を測定する。ここでは Fig. 13 のような姿勢で実験を行い、ハイブリッド制御では垂直な壁に先端を接触させて実験を行った。システム構成は Fig. 14 のようになっている。各関節の 16bit 8086 CPU はオブザーバで外乱補償を行い、直流サーボモータに指令を与える。その他の作業座標でのコントローラ、座標変換は DSP (NEC- μ PD 77230 digital signal processor) で計算され、各関節の 8086 CPU へ指令を出す。

オブザーバのカットオフ周波数を約 700rad/sec, サンプリングタイムを 1msec とした。位置コントローラの K_1, K_2 の対角要素はそれぞれ $90\text{sec}^{-1}, 2,000\text{sec}^{-2}$, 力コントローラの質量行列 M の対角要素は 10kg とした。

加速度追従法に基づくロボットの制御の実験を行った。Fig. 15 は y 方向に位置制御を行ったときの位置・速度の指令とそれらの応答を示している。速度の過渡応答で少し偏差が存在するが、その他では遅れなく指令に追従している。Fig. 16 は Fig. 15 の実験に z 方向の力制御を加えてハイブリッド制御にし、同時に各々の指令値を変化させた結果である。上側は力指令と力の応答であり、指令に対してほぼ同じ力が発生している。下側の位置指令と位置の応答は重なって測定されている。また、力制御と位置制御の間には干渉とみられるような応答がない。このことから加速度追従法に基づく制御法は外乱に対してロバストで応答性が良く、作業座標の各方向での干渉はほとんどないことが確認された。

Fig. 12 Schematic figure of tested robot

Fig. 13 Experimental method

Fig. 14 Total system of robot control

6. 結 論

ロボットの各関節を加速度指令通りの加速度を発生することができる加速度コントローラとする方法を提案した。これを作業座標に拡張した加速度追従法を提案し、位置コントローラと位置と力のハイブリッドコントローラを実例として示した。このコントローラの特徴は応答性がよく、外乱に対してロバストでコントローラの構成

Fig. 15 Experimental result of position controller

upper side : position command and response
lower side : speed command and response

Fig. 16 Experimental result of hybrid position/force control

upper side : force command and response
lower side : position command and response

が簡単なことである。さらに、作業座標の各方向で別のコントローラを構成した場合でも、各軸間の干渉が存在しないということも特徴の一つである。ここでは各関節を加速度コントローラとするために、計算が簡単でパラメータ変動に強い外乱オブザーバを用いる方法を提案した。これらの特徴をロボットマニピュレータの実験で確認し、有用性を示した。

参 考 文 献

- 1) Paul, R.P., "Robot Manipulators-Mathematics, Programming, and Control", pp.209, MIT Press, 1981
- 2) Luh, J.Y.S., "Conventional Controller Design for Industrial Robots-A Tutorial-", IEEE Trans. Syst., Man Cybernetics, Vol.SMC-13-3, pp.298-316, 1984
- 3) Freunt, E., "Fast Nonlinear Control with Arbitrary Pole-Placement for Industrial Robots and Manipulators", Int. J. Robotic Research, Vol.1-1, pp.65-78, 1982
- 4) Luh, J. et al., "Resolved-Acceleration Control of Mechanical Manipulators", IEEE Trans. Automatic Control, Vol.AC-25-3, pp.468-474, 1980
- 5) Raibert, M.H., "Hybrid Position/Force Control of Manipulators", Trans. ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.102, pp.126-133, 1981
- 6) Hewit, J.R. et al., "Dynamic Coordination of Robot Movement", 4th CISM IFTOMM Int. Symp.

- on Theory and Practice of Robots and Manipulators Ro-Man-Sy, pp.77-88, 1981
- 7) Nakao, M. et al., "A Robust Decentralized Joint Control Based on Interference Estimation", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Vol.1, pp. 326-331, 1987
 - 8) Hoshinaka, T. et al., "Fast Motion Control of Mechanical Manipulator for Path Tracking", Proc. IEEE Int. Conf. IECON '88, Vol.1, pp. 163-168, 1988
 - 9) Komada, S. et al., "Robust Force and Compliance Control of Robotic Manipulator", Proc. IEEE Int. Conf. IECON '88, Vol.1, pp. 20-25, 1988
 - 10) 駒田他, "加速度に基づく多自由度ロボットの力フィードバック制御", 電気学会論文誌D分冊, Vol.109-5, pp. 325-332, 1989
 - 11) Komada, S. et al., "Force Feedback Control of Robot Manipulator by Acceleration Tracing Orientation Method", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. IE-37, pp. 6-12, 1989
 - 12) Ohnishi, K. et al., "Applications of Advanced Control Techniques in Electrical Drives", Proc. Int. Workshop on Microcomputer Control of Electric Drives, A1, 1989
 - 13) Umeno, T. et al., "Generalized Robust Servo-system Design Based on the Parameterization of Two Degrees of Freedom Controllers", Proc. IEEE PESC '89, pp. 945-951, 1989

Table 1 Nomenclature

D =viscosity of manipulator joint	p =suppressed disturbance acceleration vector
D_e =viscosity matrix of environment	q =manipulator position in joint coordinates
f =translational force	q =manipulator position vector in joint coordinates
f =force vector specifying 3 translational and 3 rotational degrees of freedom	s =Laplace operator
f_s =force vector of force sensor	S =diagonal matrix of Laplace operators
G =elimination characteristics of disturbance	T_{dia} =disturbance of manipulator joint
G =elimination characteristics matrix of disturbance	$\hat{T}_{dia}$ =estimated torque of the disturbance
g, g' =cut-off frequency of disturbance observer	t_{dia} =disturbance vector of manipulator joint
H =compliance selection matrix	T_{ext} =reactive torque of manipulator joint in contact task
I_a =torque current	T_{frc} =Coulomb friction of manipulator joint
J =inertia of manipulator joint	T_{int} =interference of manipulator joint observer
J =inertia matrix of manipulator joint	x =position vector specifying 3 translational and 3 rotational degrees of freedom
J_{aco} =jacobin matrix	x, y, z =Cartesian direction
K_s =stiffness matrix of environment	Subscript
K_t =torque constant	n =nominal value
K_1 =speed feedback gain matrix	x, y, z =Cartesian direction
K_2 =position servo gain matrix	Superscript
L =direct kinematics	cmd =command value
M =mass matrix	cmp =compensated value
p =suppressed disturbance acceleration	ref =reference value