DC サーボモータを用いた異常検出可能な
パワーアシスト制御系設計*

原

進^{*1}Power-Assist Controller Design Permitting Abnormality Detection
by Means of DC ServomotorSusumu HARA^{*2}^{*2} Division of Electronics and Information Engineering, Toyota Technological Institute,
2-12-1 Hisakata, Tempaku-ku, Nagoya-shi, Aichi, 468-8511 Japan

Power-assist system (PAS) technology and its applications to manufacturing systems have attracted special interest recently. In such a man-machine system as PAS, the abnormality detection of the controlled mechanical part of the system, e.g., the collision detection of mechanical part, is extremely important. Some conventional studies have already proposed the collision detection methods for robots or PASs. In this study, we assume that DC servomotors are utilized as actuators. Then, this study proposes a novel power-assist controller design method. This method includes a software-based abnormality detection based on the current dynamics of motor. The controller design utilizes a two-degree-of-freedom control system structure which consists of an on-line linear simulator taking account of the current dynamics, an impedance controller and an LQI servo controller. The abnormality detection is realized by detecting the difference between the simulator's current and the real current of motor. The effectiveness of the method is verified experimentally.

Key Words: Motion Control, Servo Mechanism, Robot, Positioning, Power-Assist System, Man-Machine System, Abnormality Detection, Collision Detection, Impedance Control

1. はじめに

産業用ロボットは各種生産現場において広く普及しているが、ロボットでは自動化が困難であり、人間(作業員)が直接作業を行う工程もなお多い。例えば自動車組み立て工程では、作業員自身が重い対象物を移動させて目的の取り付け位置に位置決めする作業が見られる^{(1), (2)}。そのため、作業員の負担軽減や技能の補助などを目的として、インピーダンス制御⁽³⁾の考え方を導入したパワーアシスト機器の利用が考えられている。山田らは熟練作業員がもともと習得している運動調整機能(スキル)の発揮を支援するスキルアシストの導入を提案している^{(1), (2)}。組み立て工程を考えた他のパワーアシスト機器には林らの研究があり、最適可変インピーダンス制御の適用を図っている⁽⁴⁾。また、近藤らも組み立て工程への応用を念頭に、人間-機械共働系と呼ばれる概念に基づいた、パワーアシストの利用方法を説明している⁽⁵⁾。さらに、三好らはクレーンなど柔軟な構造物に対するパワーアシストの手法を検討している⁽⁶⁾。著者も最近、自動的な搬送過程とパワーアシストを

用いた人間主体の作業過程を同一のアクチュエータによりなめらかに切り換えて実現するための各種制御手法^{(7)~(12)}やパワーアシストシステムのためのロバスト性向上に関する提案⁽¹³⁾などを行っている。特に前者は、制御対象の運動を停止することなく、機械主体の制御から人間主体の制御へ、ないしはその逆になめらかに切り換えることを可能としており、作業効率化のみならず、作業員の快適性を向上させるなど効果は大きい。著者の提案内容ではいずれもDCサーボモータをアクチュエータに使用している。近年、ACサーボモータの採用拡大により利用が減っているものの、特種なドライバなしにパワーアンプで制御できるDCサーボモータは、制御が容易なアクチュエータとして長い間使われてきた。なお、著者の従来の提案では制御を実現するのに制御対象の加速度の計測を必要としていた^{(7)~(13)}。

一般に、パワーアシスト機器を利用することによる最大の恩恵は、実際よりもはるかに軽い物体であるかのように感じながら、作業員が制御対象を移動したり位置決めできる点であろう。しかしながら、この長所が何らかの異常状態を招きやすくなることも考えられる。例えば、制御対象の何らかの障害との衝突や異物の挟み込み等の発生である。これらは機器の故障はもとより、作業員の安全を脅かす事態になり兼ねない。よっ

* 原稿受付 2005年5月19日。

^{*1} 正員、豊田工業大学電子情報系(☎ 468-8511 名古屋市天白区久方2-12-1)。

E-mail: haras@toyota-ti.ac.jp

て、パワーアシスト機器のような人間-機械系では、このような異常状態を機器自身が検出し、それまでの制御を停止し、その後何らかの対応が容易に取り得る対処方法を備えていることが重要である。

加藤らは、床面等への接触時の安定性を考慮したパワーアシスト機器のインピーダンス制御手法を提案し、接触を検出中は開ループ型の力制御に切り換える手法を提案している⁽¹⁴⁾。もともと、自律的なロボットの衝突検出に関しては以前から研究されており、Lumelskyらのセンサを用いる方法⁽¹⁵⁾、センサを用いないソフトウェア的な検出手法としてはTakakura⁽¹⁶⁾、山田⁽¹⁷⁾の外乱オブザーバを用いる方法や小菅らの適応制御を用いる方法⁽¹⁸⁾などがある。

上記のような背景を踏まえ、本研究でもソフトウェア的に異常状態を検出可能なパワーアシスト制御系の設計法を提案する。異常検出は前述の他の研究内容^{(15)~(18)}を付加することでも可能であるが、本研究では、著者がこれまでに提案した制御系と同様の構成のままで異常検出可能な手法を提案する。本研究においてもDCサーボモータの使用を前提とする。ただし、制御対象の加速度の計測が不要な制御則を考える。その上で、モータ電流の動特性を導入して推定した電流と実際の電流との差から異常状態を検出する手法を提案する。すなわち、本手法では障害との衝突や異物の挟み込み等によりモータに負担が生じ、実際の電流が大きく変化する種類の異常に対応できる。本手法により、従来著者が提案した各種制御手法をソフトウェア上の小さな変更のみで、より安全性を向上しながら実装することが可能となる。よって、著者の従来手法の実用性は大きく向上する。X-Yテーブルを改造した簡単なロボットシステム^{(9)~(12)}を選び、実験により提案する手法の有用性を検討している。

2. 制御対象例とインピーダンス制御則

2.1 制御対象例 本研究では、市販のX-Yテーブルを改造した図1のような簡単なロボットシステムを制御対象として採用する。実際のロボットシステムの写真を図2に示す。本システムはエンコーダ付きDCサーボモータとタイミングベルトから成る駆動系により駆動されるテーブルと、テーブル上の台の頂上に設置されたハンドルのついた力覚センサ、制御演算に必要なDSP(Digital Signal Processor, TMS320C31)やパワーアンプなどから構成される。この構成を図3に示す。本研究では運動方向を1軸に限定して議論する。実験時にはモータのエンコーダからテーブル変位を検出し、それを差分近似してテーブル速度を得る。作業者は台上のハンドルを握って操作する。ハンドル直下にあ

Fig. 1 Robotic system in this study

Fig. 2 Photo of the robotic system

Fig. 3 Control system diagram of the robotic system

る力覚センサから作業者の操作力が検出される。DSPではサンプリング周期1.0 msで制御演算が行われ、制御入力がモータに対する電圧信号としてパワーアンプに送られる。パワーアンプがモータを駆動することで制御が実現される。

図1の制御対象は駆動系の固体摩擦などを無視すると、これまでの研究を参考にして図4のようにモデル

Fig. 4 Controlled object model

Table 1 Parameters of the robotic system

m_n	Equivalent mass of the table and stand	28.0 kg
J_b	Moment of inertia (Base side gear and the pulley)	$3.57 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
J_m	Moment of inertia (Motor)	$8.33 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
J_g	Moment of inertia (Motor side gear)	$8.33 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
r	Radius of the pulley	0.0159 m
α	Gear ratio ($= r_g/r_m$)	11.0
L	Inductance of the motor	2.0 mH
R	Resistance of the motor	1.0 Ω
K_T	Torque constant of the motor	0.215 N·m/A
K_E	Back electromotive force constant of the motor	0.215 V·s/rad
f_r	Coulomb friction force of the driving system	131.4 N

Fig. 5 Simple model

化できる^{(19), (20)}. モータ回転角変位 $\theta_m(t)$ および角速度 $\dot{\theta}_m(t)$, モータ電流 $i(t)$ を状態量とし, モータ電圧 $e(t)$ を制御入力と考える. また, 作業者操作力を $F_h(t)$ とした場合の制御対象の状態方程式は次のようになる.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t) + hF_h(t) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$x(t) = [\theta_m(t) \quad \dot{\theta}_m(t) \quad i(t)]^T, \quad u(t) = e(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\alpha K_T}{r I_l} \\ 0 & -\frac{K_E}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix}, \quad h = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{I_l} \\ 0 \end{bmatrix}$$

ただし, $I_l \equiv \frac{r}{\alpha} m_n + \frac{\alpha}{r} (J_m + J_g) + \frac{1}{\alpha r} J_b$ である. 図4および式(1)中の各パラメータは表1中に示す意味を持つ. パラメータの具体的な値については実際の装置を参考にする, 表1中のような値となる.

本研究の制御対象のように, インダクタンスの影響が比較的小さいモータを使用する場合には, ほぼ次の関係が成り立つことが知られている⁽²¹⁾.

$$i(t) = -\frac{K_E}{R} \dot{\theta}_m(t) + \frac{1}{R} e(t) \quad \dots \dots \dots (2)$$

式(2)を用いると, 状態量から電流を省くように式(1)の状態方程式は次のように書き換えられる.

$$\dot{x}_c(t) = A_c x_c(t) + b_c u(t) + h_c F_h(t) \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$x_c(t) = [\theta_m(t) \quad \dot{\theta}_m(t)]^T, \quad u(t) = e(t)$$

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{\alpha K_T K_E}{r I_l R} \end{bmatrix}, \quad b_c = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\alpha K_T}{r I_l R} \end{bmatrix}, \quad h_c = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{I_l} \end{bmatrix}$$

著者の従来の提案^{(7)~(13)}では, 図5のような単純な2重積分系のモデルに基づいて制御則を導いていた. このモデルの状態方程式は

$$\dot{x}_{dim}(t) = A_{dim} x_{dim}(t) + b_{dim} F(t) + h_{dim} F_h(t) \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$x_{dim}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}, \quad A_{dim} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$b_{dim} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{m_n} \end{bmatrix}^T, \quad h_{dim} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{m_n} \end{bmatrix}^T$$

であるから, 式(3)と(4)を比較し, モータに次のような電圧 $e(t)$ を与えることで式(4)の動特性を実現した.

$$e(t) = \frac{R}{K_T} \left(J_m + J_g + \frac{J_b}{\alpha^2} \right) \ddot{\theta}_m(t) + K_E \dot{\theta}_m(t) + \frac{rR}{\alpha K_T} F(t) \quad \dots \dots \dots (5)$$

しかしながら, この場合には式(5)中のモータ回転角速度 $\dot{\theta}_m(t)$ のみならずモータ回転角加速度 $\ddot{\theta}_m(t)$ を計測し, フィードバックできるものとしていた. この仮定では加速度センサの設置などが求められる. 本研究ではより容易に制御を実現するために加速度の計測を必要としない定式化をしておく. 具体的には, 式(3)のモデルから直接制御則を導く. 詳細は次節で述べる.

2.2 インピーダンス制御則

インピーダンス制御を用いる研究では, 作業者にとって式(6)のインピーダンス特性が得られるようにインピーダンス制御入力を考えるものが多い^{(1), (7)~(13)}.

$$m_d \ddot{x}(t) + c_d \dot{x}(t) = F_h(t) \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで, m_d と c_d はそれぞれ作業者に対して呈示されるインピーダンス特性上の質量[kg]と粘性減衰係数[N·s/m]を意味する. m_d, c_d をまとめてインピーダンスパラメータと呼ぶ. 式(4)の制御対象に対して, 式(6)の特性を得るために与えるべき $F(t)$ は次のようになる.

$$F(t) = -\frac{m_n}{m_d} c_d \dot{x}(t) - \left(1 - \frac{m_n}{m_d} \right) F_h(t) \quad \dots \dots \dots (7)$$

このことは式(7)を式(4)に代入して式(6)の特性が得られることから容易に理解できる. 本研究では式(6), (7)を用いずに, 式(3)の制御対象に対して下記のインピーダンス特性が得られることを目指す.

$$I_{id} \ddot{\theta}_m(t) + D_d \dot{\theta}_m(t) = F_h(t) \quad \dots \dots \dots (8)$$

ただし, $I_{id} = \frac{r}{\alpha} m_d + \frac{\alpha}{r} (J_m + J_g) + \frac{1}{\alpha r} J_b$, D_d は定数である. 式(8)の特性を得るために与えるべき式(3)の $u(t)$ は次のようになる.

$$u(t) = \left(K_E - \frac{rR}{\alpha K_T} \frac{I_l}{I_{ld}} D_d \right) \dot{\theta}_m(t) - \frac{rR}{\alpha K_T} \left(1 - \frac{I_l}{I_{ld}} \right) F_h(t) \quad \dots \dots (9)$$

このことも式(7)同様、式(9)を式(3)に代入して式(8)の特性が得られることから理解できる。式(5)は式(3)左辺の角加速度と右边第1項の逆起電力に関わる項を打ち消すことで、式(4)の2重積分系モデルと同等になるような制御入力電圧を求めており、その上で式(7)のインピーダンス制御入力を考えている。一方、式(9)は式(3)と(8)の連立方程式から $\ddot{\theta}_m(t)$ を消去するように直接インピーダンス制御入力電圧を求めている。

式(9)では、 $\dot{\theta}_m(t)$ と $F_h(t)$ のフィードバックのみでインピーダンス制御が実現され、 $\ddot{\theta}_m(t)$ の計測は不要となる。式(8)は $\theta_m(t) = (\alpha/r)x(t)$ から、

$$\frac{\alpha}{r} I_{ld} \ddot{x}(t) + \frac{\alpha}{r} D_d \dot{x}(t) = F_h(t) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (10)$$

のように書け，さらに，次のように書き換えられる．

$$m'_d \ddot{x}(t) + c_d \dot{x}(t) = F_h(t) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (11)$$

$$m'_d = m_d + I_J, \quad I_J = \frac{1}{r^2} [\alpha^2 (J_m + J_g) + J_b], \quad c_d = \frac{\alpha}{r} D_d$$

すなわち、式(6)ないしは図5のような1質点のモデルに例えれば、式(11)はそのモデルに対し、 m_d' 、 c_d のインピーダンス特性を実現する制御入力 u_d が式(9)に相当することを意味する。 I_{dd} や D_d と比較して、オペレータが希望する m_d' 、 c_d の値は従来の研究を参考にして決めやすい。そこで、インピーダンス制御の設計では、設計者が m_d' 、 c_d の値を選ぶ。 I_f や α/r が定数であることから m_d や D_d が決定できる。ゆえに式(9)から必要な制御入力 u_d が求められる。本研究ではこの手順で制御器設計を行う。

3. 異常検出可能なパワーアシスト制御系設計

3・1 制御系の構造 著者は文献(13)において、主に駆動系に存在する不確かな固体摩擦の影響に着目し、その影響を抑制できる、パワーアシストシステムのロボスト制御系設計法を提案した。その制御系の構造を図6に示す。この手法の基本的な概念は、各種ロボスト制御手法の適用において考えられてきた、一部の2自由度制御系の方法と類似している^{(20)~(22)}。文献(13)のみならず、著者はこれまで同様の構造を利用し、複数の制御手法を提案してきた^{(9)~(12)}。この構造では、作業者が対象に与えた操作力を、固体摩擦のないノミナル系の応答を計算するオンラインシミュレータに与え、この状態量と操作力からインピーダンス制御入力を求める。インピーダンス制御入力はアクチュエータに与えられるのみならず、オンラインシミュレータにもフィードバックされる。そしてシミュレータが生成する目標軌道からの実際の応答の偏差を抑圧するために

Fig. 6 Control system structure in the conventional method
(In the study of this paper, $F(t)$, $F_{\beta}(t)$ and $x_{dim}(t)$ are replaced by $u(t)$, $u_{\beta}(t)$ and $x_c(t)$, respectively.)

Fig. 7 Control system structure during the recovery action

フィードバック制御が動作する。フィードバック制御には LQI (Linear Quadratic Integral) サーボ制御器^{(23), (24)}などを適用する。本構造により、扱いが面倒な固体摩擦の影響をフィードバック制御により除去し、線形システムと同様の応答を得ることができる。その上でインピーダンス制御を適用することになるので、設計者にとって理解しやすい。

ただし、従来の制御系には大きな問題点が残されていた。1章で述べたように、このようなシステムでは異常発生をすみやかに検出できなければならない。しかしながら、従来の制御系では衝突等により発生する力が摩擦係力などの外乱と区別できないため、オンラインシミュレータの目標軌道が衝突時と同じ方向の運動を続け、制御入力を与え続けることになる。すなわち、従来の制御系のままでは異常発生時に事態をさらに悪化させることになる。そこで、本研究では従来著者が提案した各手法の有用性を維持したまま、異常検出機能を加える方法を次節で提案する。

3-2 異常検出と対処の方法 異常検出には, モータ電流の動特性を活用して推定した電流を用いる. 従来の研究^{(9)~(13)}のオンラインシミュレータでは式(4)をリ

アルタイムで計算していた。この代わりに本研究では、電流の動特性まで含めた式(1)をシミュレータの式とする。シミュレータの状態量を $x_{ols}(t) = [\theta_{ols}(t) \ \dot{\theta}_{ols}(t) \ i_{ols}(t)]^T$ とすると、次式を計算することになる。

$$\dot{x}_{ols}(t) = Ax_{ols}(t) + bu(t) + hF_h(t) \quad \dots \dots \dots (12)$$

そして、インピーダンス制御入力力は次のようになる。

$$u(t) = \left(K_E - \frac{rR}{\alpha K_T} \frac{I_l}{I_d} D_d \right) \dot{\theta}_{ols}(t) - \frac{rR}{\alpha K_T} \left(1 - \frac{I_l}{I_d} \right) F_h(t) \quad \dots \dots \dots (13)$$

式(13)の導出には、電流の動特性を省いた式(3)を用いたが、電流を推定する目的では式(1)を活用するのが本研究の特徴である。ただし、サーボ制御の目標軌道としてはシミュレータが生成する角変位 $\theta_{ols}(t)$ と角速度 $\dot{\theta}_{ols}(t)$ を使い、電流 $i_{ols}(t)$ は使わない。

モータの実際の電流も常に計測しておく。ある方向に運動中、 $i_{ols}(t)$ と実際の電流 $i(t)$ の差 $e_i(t)$ の絶対値があるしきい値 $e_{it} > 0$ を超えたら異常が発生したものと判断する。そして、その方向への制御入力を0とし、運動を停止させる。異常検出直後も作業者の意図を反映した対処が可能であるように、反対方向への運動にはパワーアシスト制御を可能としておく。ただし、異常発生直後はシミュレータ中の角速度 $\dot{\theta}_{mols}(t)$ を用いずに、実際の角速度 $\dot{\theta}_m(t)$ を用いる式(9)によりインピーダンス制御入力をモータに与える。異常発生直後は状況や発生原因のわからないことが予想される。そこで、前節で説明したような異常発生による力と摩擦力などの外乱が区別できない図6の構成は避ける。すなわち、外乱に対するロバスト性確保よりも実際の信号に基づいた着実な制御を優先する。この状態の制御系を図7に示す。一定距離以上、反対方向に移動したところで式(12)、(13)を用いる通常の制御状態に戻す。この時まで、 $x_{ols}(t)$ 中の各値を実際の値に合わせておく。以上が、本研究で提案する異常検出と対処の方法である。なお、しきい値 e_{it} の決定は、個々の対象や環境、問題設定に応じてチューニングする必要があり、本研究では文献(14)などと同様に、実験を繰り返すことで決定している。

4. 実験による検討

4.1 実験内容 本研究で提案する手法の有用性を明らかにする目的で、2章で説明したシステムを対象とした実験による検討を行う。可動領域の片方の端から約20 cmの位置を位置0とし、ここを基点に端に向かって作業者がパワーアシストを得ながら移動させる。この移動を「行き」の移動と呼ぶことにする。この時、作業者は真下を向き、可動領域端を見ない。端に接触した感触を得たら、元の位置に戻してもらうように指示した。こ

Fig. 8 Experimental results (Operator A / Proposed method)

Fig. 9 Experimental results (Operator A / Conventional method)

Fig. 10 Experimental results (Operator B / Proposed method)

Fig. 11 Experimental results (Operator B / Conventional method)

の移動を「帰り」の移動と呼ぶ。30歳代の男性作業員2名（作業員AおよびBとする。）を対象に実験を行った。

LQI制御は著者の従来の研究^{(9)~(12)}と同様のものを用いる。モータ回転角変位の偏差 $\theta_m(t) - \theta_{mols}(t)$ を目標値0に追従させるサーボ制御系とし、評価関数中の重みには $Q_{LQI} = \text{diag}[1.0 \ 0 \ 1.0]$ を採用した。インピーダンス制御は $m_d = 10.0 \text{ kg}$, $c_d = 30.0 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ として実現した。 $e_p = 2.5 \text{ A}$ とし、衝突検出位置より0.1 m以上帰りの移動が進んだところで元の制御状態に戻る設定とした。実験は各作業員とも異常検出を含む本研究の提案手法と、含まない従来手法の2種類について行った。両手法とも数回実施し、得られた中の代表的な応答を図8~11に示す。順に、作業員Aの提案手法、従来手法、作業員Bの提案手法、従来手法、の結果である。各図内では、(a)テーブル変位、(b)テーブル速度、(c)モータ電流、(d)制御入力電圧、(e)作業員操作力、(f)制御モードを示している。(a)と(b)では、オンラインシミュレータが生成する目標軌道を細線で示している。(c)ではシミュレータが推定している電流を細線で示している。テーブル静止時に見られる電流の発生は力覚センサのオフセット誤差の影響である。なお、提案手法では異常検出時と通常の制御状態に戻る時の2度、シミュレータの状態量を実際の状態量に一致させている。ただし、(c)細線の表示では一致する様子を反映させていない。(f)では、値0が通常の制御状態、1.0が異常検出、0.5が異常検出時と反対方向のみ移動可の状態を意味している。

4.2 考察 各作業員が各手法に対して行った数回の実験結果はどれも類似したものであった。駆動系の固体摩擦の影響やモータパラメータの不確かさなどから、モータ電流の推定値は実際の値とある程度異なっているが、提案手法の異常検出は問題なく行われた。作業員の違いにかかわらず、従来手法と比較して、提案手法では接触の感触を得た直後、すぐに帰りの動作が始まっている。また、帰りの動作を始める際の作業員操作力は小さい。ゆえに、作業員が何らかの異常な感触を得たとしても、直後から作業員の意図に従った反対方向の運動が小さな作業力で実現されていることが理解できる。さらに、通常の制御状態に戻る瞬間も作業員操作力は連続的に変化しており、この際の作業員への影響はほとんど見られない。

一方、従来手法では、接触後、反対方向に相当大きな力を入れて初めて帰りの動作が可能になっている。これは、接触後も行き方向に進み続けるオンラインシミュレータ中の状態量にモータが追従するため、この状態量を反対方向の運動に変えるまでの大きな作業力

をハンドルに与えなければならぬことによる。実際には両作業者ととも従来手法の場合に、テーブルが端にくっつき、少しの間自由に動かせない印象を受けた。これは安全性の観点から問題となる現象である。結果からはモータ電流が使用しているパワーアンプの制限値にまで至って飽和している様子が見られる。以上の比較から、本研究で提案した手法の有用性が理解できる。

5. おわりに

最近、各種生産現場での利用が活発に検討されているパワーアシスト機器の制御に関して、本研究ではソフトウェア的に異常検出可能な制御系設計法の一つを提案した。具体的には、従来の研究同様、DCサーボモータの使用を前提とし、モータ電流の動特性を導入して推定した電流と実際の電流との差から異常状態を検出する手法である。本手法は、従来著者が提案したパワーアシストに関する各手法^{(9)~(13)}に対して、それらの有用性を維持したまま、ソフトウェア上の小さな変更のみで付加できる。ゆえに、より安全性を向上した上で従来手法を実装することが可能となった。実験により本手法の有用性を明らかにした。

本研究の内容の一部は文部科学省科学研究費補助金(若手研究(B)課題番号:16760184)を受けて実施されており、謝意を表する。

文 献

- (1) Yamada, Y. et al., Proposal of Skill-Assist for Mounting Operations in Automobile Assembly Processes, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.68, No.666 (2002), pp.509-516.
- (2) Konosu, H. et al., Practical Development of Skill-Assist, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.22, No.4 (2004), pp.508-514.
- (3) Hogan, N., Impedance Control: An Approach to Manipulation: Parts I-III, *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.107, No.1 (1985), pp.1-24.
- (4) Hayashi, R. et al., Positioning Operation of an Object Using a Power Assist Device, *Proceedings of 51st Conference of Tokai Branch of Japan Society of Mechanical Engineers*, No.023-1 (2002-3), pp.127-128.
- (5) Kondo, K. et al., Autonomous Production System Realizing Collaboration of Operators and Machines -Its Application to Shaft Inserting System for Moving Object-, *Proceedings of 2004 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, No.04-4 (2004-6), 2P1-H-14.
- (6) Miyoshi, T. et al., Construction of Power Assist System for Overhead Crane, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.70, No.696 (2004), pp.2427-2434.
- (7) Hara, S., Positioning of a Cart by Means of a Smooth Switching from Servo Access Control to Impedance Control, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.70, No.689 (2004), pp.127-134.
- (8) Hara, S., A Smooth Switching from Power-Assist Control to Automatic Transfer Control and Its Application to a Transfer Machine, to appear in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- (9) Hara, S., Mode Switching Control Method for Man-Machine Collaborated Robotic Systems (Switching from Power-Assist Mode to Automatic Positioning Mode), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.71, No.706 (2005), pp.1907-1913.
- (10) Hara, S., Mode Switching Control Methods for Man-Machine Collaborated Robotic Systems, *Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, (2005-7), pp.321-328.
- (11) Hara, S., Positioning Control Method by Means of a Switching from Automatic Traveling Mode to Semi-Automatic Settling Mode (Proposal of Semi-Automatic Settling Mode), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.71, No.708 (2005), pp.2549-2556.
- (12) Hara, S., Positioning Control of Man-Machine Systems by Means of Semi-Automatic Settling Mode, *Proceedings of the Third International Conference on Computational Intelligence, Robotics and Autonomous Systems*, (2005-12), IC1-1.
- (13) Hara, S., Controller Design Method for Robustness Improvement of Power-Assist Control, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.70, No.690 (2004), pp.419-426.
- (14) Kato, H. et al., Impedance Control for a Power Assist Device Considering Stability of Contact Tasks, *Proceedings of 2004 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, No.04-4 (2004-6), 1P1-H-36.
- (15) Lumelsky, V. J. and Cheung, E., Real-Time Collision Avoidance in Teleoperated Whole-Sensitive Robotarm Manipulator, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.23, No.1 (1993), pp.194-203.
- (16) Takakura, S. et al., An Approach to Collision Detection and Recovery Motion in Industrial Robot, *Proceedings of the 15th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vol.2 (1989-11), pp.421-426.
- (17) Yamada, Y. et al., A Robot System with Safe Contact Detection and Stopping Capabilities Based on Human Pain Tolerance, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.63, No.614 (1997), pp.3552-3557.
- (18) Kosuge, K. et al., Collision Detection System for Manipulator Based on Adaptive Control Scheme, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.39, No.6 (2003), pp.552-558.
- (19) Hara, S. and Yoshida, K., Simultaneous Optimization of Positioning and Vibration Control Using Time-Varying Criterion Function, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.60, No.570 (1994), pp.424-429.
- (20) Hara, S. et al., Simulation-Based Reference Design and Its Application to Positioning Control of Vibration Systems, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.68, No.672 (2002), pp.2241-2248.
- (21) Hara, S., Reference Trajectory Generation Method for Servo Positioning Control of Flexible Structures, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.66, No.649 (2000), pp.3085-3092.
- (22) Hirata, M. et al., Head Positioning Control of a Hard Disk Drive Using H^∞ Control Theory, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.29, No.1 (1993), pp.71-77.
- (23) Nonami, K. et al., *Control Systems Design by MATLAB* (in Japanese), (1998), pp.96-99, Tokyo Denki University Press.
- (24) Hara, S., Unified Design of Time-Varying Gain Type Access Control and Integral Type Servo Control by Means of Nonstationary Optimal Control Method, *Microsystem Technologies*, Vol.11, No.8-10 (2005), pp.676-687.