

産業用ロボットアームの動力学モデルに基づいたセンサレス力制御

Force-Sensorless Control Technology Based on Dynamic Model for Industrial Robot Arms

大賀 淳一郎

西原 泰宣

大明 準治

■ OGA Jun'ichiro

■ NISHIHARA Yasunori

■ OAKI Junji

製造業のグローバル化に伴い、生産コスト低減のため、生産ラインの自動化が進められている。部品組立てなど力^(注1)の制御を必要とする作業では外力を把握する必要があるが、力センサは高価で衝撃に弱い。

東芝は、力センサを用いずに外力を推定し、目標とする力に応じて手先を柔らかく動かす力制御技術を開発した。この制御技術は、ロボットアームの動力学モデルに基づいて算出した駆動トルク推定値と実際のモータ駆動トルク指令値の差から、ロボットアーム手先での外力を高精度に推定する。力制御を低コストで実現するロボット知能化制御技術として、東芝機械(株)が商品化した6軸垂直多関節ロボットに、この技術を搭載した。

Automated production lines have been increasingly introduced to reduce production costs, accompanying the globalization of manufacturing industries in recent years. Particularly in high-mix, low-volume production, there is a need for cell manufacturing systems using robots that can precisely estimate and control external forces and moments to accomplish assembly tasks, including parts mounting and insertion. However, the introduction of force-controlled robots into manufacturing systems is hindered by the fact that force sensors are costly and fragile.

Toshiba has developed a force-sensorless control technology that can estimate external forces from differences between joint-driven torques calculated based on a robot dynamic model and commanded values of motor-driven torques. The control algorithm of this technology has been implemented in six degrees of freedom (6DOF) vertical articulated robots produced and commercialized by Toshiba Machine Co., Ltd.

1 まえがき

近年、製造業のグローバル化に伴って生産コストの低減が求められており、生産ラインの自動化が進められている。産業用ロボットアームは、高速かつ高精度の位置決め制御によって生産性向上に大きく貢献している。しかし、部品の組付けや挿入のような組立作業は、位置決め制御だけでは実現困難で、力も制御する必要がある。

力の制御が必要な作業をロボットによって実現するためには、ロボットに作用する外力に応じて柔軟に動作させる力制御が適用されることが望ましい。力制御では外力を把握する必要があるが、通常、力センサが用いられる。しかし、力センサは衝撃に対して脆弱(ぜいじゃく)であり、また、センサ自体が高価である。力センサを用いない力制御はこれまでにいくつか提案されているが、それらの多くは並進力に対する柔軟性だけに対応したものであり、モーメントにまで対応したものはほとんど見られない。このため、力制御が必要な組立作業などは自動化が進まず、人手に頼っている部分が多いのが現状である。

東芝は、力センサを用いずに外力を推定し、目標とする力及

びモーメントに応じてロボットアーム手先の位置及び姿勢を柔軟に動作させる、センサレス力制御技術を開発した。この技術は、ロボットアームの動力学モデルに基づいて算出した関節の駆動トルク推定値と実際のモータを駆動するトルク指令値の差から、外力及びモーメントを高精度に推定する。これによって、コンプライアンス動作と呼ばれる、外力に応じて位置と方向を柔軟に変化させる作業を実現できる。

この技術を、東芝機械(株)がセル生産用に商品化した6軸垂直多関節ロボット⁽¹⁾に搭載した。ここでは、センサレス力制御の外力推定と力制御技術の概要、及び動作を検証した結果について述べる。

2 動力学モデルに基づく外力推定と力制御

ピンを穴に挿入する作業を例に考えると、ピンの位置とともにピンの方向も制御しなければならないことがわかる。位置の修正には並進力を、方向の修正にはモーメントを正確に把握し制御する必要がある。更に、モーメントが作用する点を適切に設定しなければ、ピンが穴に食い込んでしまい、滑らかに挿入することはできない。このモーメントの作用点をコンプライアンス中心と呼び、これを自在に制御することが力制御のキーになる。

センサレス力制御のブロック図を図1に示す。産業用ロボッ

(注1) ここで言う力とは、特に注釈がない場合は並進力やモーメントを指し、広義に使用している。

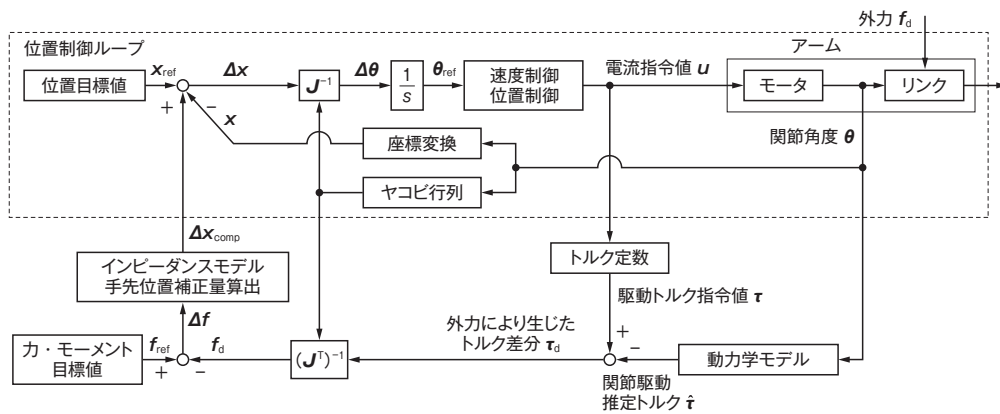


図1. センサレス力制御のブロック図 — 産業用ロボットの位置制御ループをそのまま生かして、位置制御ベーストルク制御を構成した。関節角度から動力学モデルを用いて関節駆動トルクを推定し、実際の駆動トルク指令値との差分から外力を推定する。力・モーメント目標値と推定外力から、ロボットと対象物との間に設定したダイナミクスに基づく位置補正量を求め、これを位置目標値に加える。

Block diagram of force-sensorless control architecture based on dynamic model for industrial robot arms

トアームは、高速かつ高精度の位置決め制御を実現するために高ゲインの位置制御ループを備えている。そこで、この位置制御ループをそのまま生かして、これに力制御ループを追加する。以下では、非線形な摩擦モデルを持つ動力学モデルに基づいた駆動トルクの推定方法、アーム手先での外力の推定方法、及び外力で駆動する仮想的なダイナミクスに基づいた位置制御ベーストルク制御について述べる。

2.1 動力学モデルに基づいた駆動トルク推定

多リンク機構の運動方程式に基づき、ロボットアームの動力学モデルを式(1)のように定義する。

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + h(\dot{\theta}) + c(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) \quad (1)$$

ここで、 τ は駆動トルクベクトル、 θ は関節角ベクトル、 M は慣性行列、 h は摩擦トルクベクトル、 c はコリオリトルクベクトルや遠心トルクベクトル、 g は重力トルクベクトルである。各項を正確に推定できれば、関節角から式(1)を用いて駆動トルクが算出できる。アームを構成する各リンクの慣性モーメントや重心位置は3次元CADで算出される。一方、各関節の摩擦トルクについては、ロボット製造後に計測した駆動トルクから摩擦モデルを仮定し、そのモデルのパラメータを推定する。

2.2 動力学モデルにおける摩擦モデル

摩擦トルクは関節角速度とともに増加し、高速度域で飽和することが予備実験からわかった。これを模式的に表したものを、図2に示す。摩擦モデルは、関節角速度と摩擦トルクとの非線形な関係を与えるものであり、式(2)に示すような逆正接関数を用いたモデルによって、実測結果を良好に近似できた。

$$\tau = a \cdot \arctan(b\dot{\theta}) + c \quad (2)$$

ここでパラメータ a 、 b 、 c は速度の正負によって異なり、図2の飽和トルク τ_+ 、 τ_- や、静止時の摩擦トルク τ_{0+} 、 τ_{0-} 、代表点 P

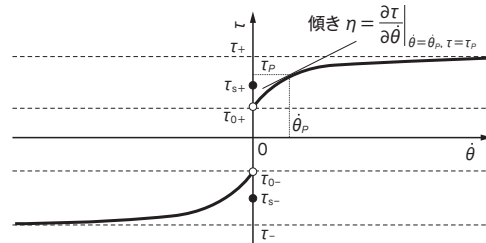


図2. 摩擦モデル — 逆正接関数を用いた摩擦モデルである。関節角速度が増加すると、摩擦は飽和しながら増加する。関節角速度が零付近の領域では、最大静止摩擦が支配的になり、不連続になる。

Friction model using arc-tangent function

での傾き η から算出される。これらは、実測データを図2のようにプロットし、その近似曲線から数値的に読み取った。また、最大静止摩擦トルクは、極めて低速度時の駆動トルク τ_{s+} 、 τ_{s-} から推定し、静止状態から動き出すときの摩擦トルクとして用いている。これらのパラメータ値はロボットの組立状態などによって異なるため、出荷前の試験で製品一台ごとに設定する必要がある。

2.3 外力推定とインピーダンスモデル

外力が生じると、動力学モデルによって算出された推定駆動トルク $\hat{\tau}$ と駆動トルク指令値 τ との間に差分 τ_d が発生する。このトルク差分から、ロボットアームの手先に作用する外力 f_d は、仮想仕事の原理によって式(3)のように求められる。

$$f_d = (J^T)^{-1} \tau_d \quad (3)$$

ここで J はヤコビ行列であり、式(4)のように関節角の微小変化 $\Delta\theta$ と手先位置の微小変化 Δx を関係づけている。

$$\Delta x = J(\theta) \Delta \theta \quad (4)$$

ヤコビ行列が逆行列を持つならば式(3)を用いて f_d を算出できる。手先での力・モーメント目標値ベクトル f_{ref} と f_d との差分 Δf に対して、ロボットアームの手先と対象物との間に式(5)に示すような仮想的なダイナミクスであるインピーダンスモデルを設定する。これによって、 Δf に応じた手先座標系での目標位置に対する位置補正量を求めることができる。

$$M\Delta\ddot{x} + D\Delta\dot{x} + K\Delta x = K_f \Delta f \quad (5)$$

ここで、 Δx は位置補正量、 M は仮想慣性行列、 D は仮想粘性行列、 K は仮想剛性行列、 K_f は力フィードバックゲイン行列である。 K_f によって手先座標系における力制御と位置制御の方向を選択できる。以上から、入力を Δf 、出力を Δx とする伝達関数の形で表現すると、式(6)のようになる。

$$\Delta x = K_f (Ms^2 + Ds + K)^{-1} \Delta f \quad (6)$$

2.4 力順応制御⁽²⁾

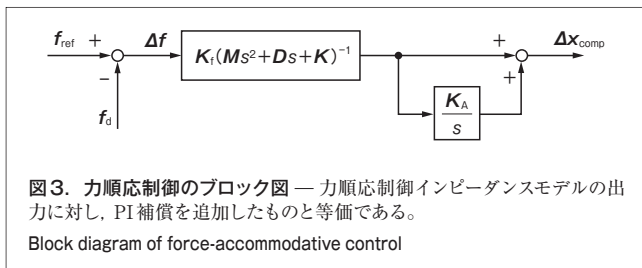
2.3節で設定したインピーダンスモデルに、力・モーメント目標値に対し定常偏差なく追従できる力順応制御を導入する。力順応制御のブロック図を図3に示す。これはインピーダンスモデルにPI制御^(注2)を直列に追加しているのと等価である。したがって手先位置補正量 Δx_{comp} は、式(7)のような伝達関数の形で表現できる。

$$\Delta x_{comp} = \left(\frac{K_A}{s} + 1 \right) K_f (Ms^2 + Ds + K)^{-1} \Delta f \quad (7)$$

ここで、 K_A は力順応制御ゲインである。外力と目標値とに誤差が生じている間は、インピーダンスモデルによる式(6)で Δx が算出される。このようにして、力順応制御の持つ積分補償によって、目標値との定常誤差がなくなる。 K_A を大きくすると、補正量 Δx_{comp} が大きくなるため、目標値に追従する速度が上がる。また、非接触状態のときは、推定外力が0であっても目標値がそのままインピーダンスモデルに入力され、更にこれが積分されるため、ロボットアームの手先は設定した軸方向に移動する。したがって目標軌道を事前に与える必要がない。

2.5 位置制御ベースト力制御

2.4節で求めた手先位置補正量 Δx_{comp} を手先位置目標値 x_{ref}



(注2) P (比例) とI (積分) の要素を組み合わせたフィードバック制御手法。

に加える。関節角を座標変換した現在の手先位置 x と x_{ref} の差分 Δx に対し、式(4)のヤコビ行列の逆行列 J^{-1} を掛けると関節角差分 $\Delta \theta$ が求められる。 $\Delta \theta$ を積分した目標関節角 θ_{ref} と現在関節角 θ から位置制御及び速度制御によって電流指令値 u が算出され、モータを駆動してロボットアームの手先を目標値へ制御する。以上のように外力に応じて手先位置の補正量を算出する力制御は、既存の位置制御をそのまま生かしているため、その導入コストを抑えることができる。

3 実験

開発したセンサレス力制御アルゴリズムを、東芝機械(株)製の6軸垂直多関節ロボットアームTV800へ実装した。TV800の外観を図4に、主な仕様を表1に示す。

3.1 突当て動作

ロボットアームの手先と対象物までの距離が不明の場合、事前に動作を教示することは困難である。しかし、接触力を検出して停止する“突当て動作”であれば、動作方向への力目標値を与えるだけで実現できる。

アームを図4のような姿勢にして、手先座標系のZ軸方向に突当て動作を行った。Z軸方向への押付け力の目標値を50 Nとしたときの、手先位置と推定外力の関係を図5に示す。外

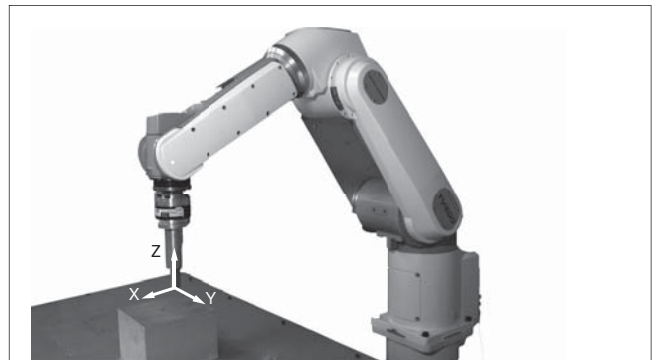


図4. 6軸垂直多関節ロボットTV800 — 東芝機械(株)製の6軸垂直多関節ロボットTV800にセンサレス力制御アルゴリズムを実装した。XYZのように手先座標系を設定されている。

TV800 6DOF vertical articulated robot produced by Toshiba Machine Co., Ltd.

表1. TV800の主な仕様
Main specifications of TV800

項目	仕様
軸数	6
質量	46.5 kg
可搬質量	5 kg
繰返し位置決め精度	±0.02 mm以下
最大到達範囲	892 mm
最大速度	8.06 m/s

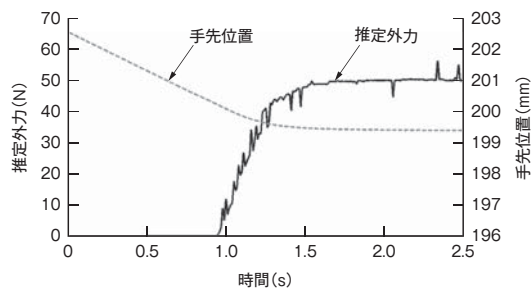


図5. 突当て動作実験結果 — 手先座標系Z軸方向に力目標値を与えて突当て動作を行った。推定外力は目標値に到達し、手先位置は衝突後に停止している。

Results of pushing operation test

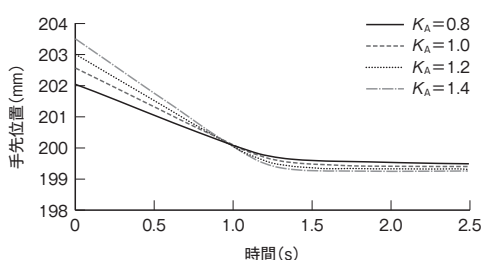


図6. 突当て動作時の手先位置のようす — 力順応制御ゲイン K_A を大きくすると、手先速度が大きくなる。 K_A は対象物への接近速度を調節できるパラメータであることが示せる。

Position of endpoint depending on force-accommodative control gain

力が発生していない非接触状態では、手先はZ軸負方向に移動し、1.0 s付近で外力を検出している。その後、手先位置がほぼ一定になっていることから、対象物と衝突して静止していることがわかる。衝突前後で衝突状態を場合分けすることなく突当て動作が実現できている。一方、外力は衝突後およそ0.5 s後に目標値50 Nに到達している。ここで、外力が発生した後も手先位置が変化しているが、これはこの手法がロボットの持つねじり剛性を生かして外力を検出しているためである。

力順応制御ゲイン K_A を変化させたときの手先位置のようすを図6に示す。 K_A が大きくなると、手先速度が大きくなっており、力目標値への応答性が向上している。すなわち K_A を適切な範囲で設定すれば、対象物へ接近する速度を調整できるパラメータとして有効であることが示せた。

3.2 外力に対する柔軟な動作 (コンプライアンス動作)

ロボットアームの手先にツールを取り付けて、外力を与えたときのコンプライアンス動作のようすを図7に示す。コンプライアンス中心をロボットアーム手先フランジ面中心、及びツール先端として、モーメント成分に対してだけインピーダンスモデルを設定した。コンプライアンス中心が静止したままでアーム手先の姿勢が柔軟に変化しており、設定どおりのコンプライアンスが実現できた。また(b)に示すように、通常、力センサが配



(a) コンプライアンス中心がロボットアーム手先フランジ面にあるとき (b) コンプライアンス中心がツール先端部にあるとき

図7. コンプライアンス動作のようす — 様々な方向から外力を与えているが、コンプライアンス中心は動いていない。通常力センサが配置されないリンク部に外力を与えてもコンプライアンス動作ができています。

Compliant motion irrespective of external forces and moments

置されないアームの各リンク部に対して外力を与えてもコンプライアンス動作が実現できており、この手法のメリットを示すものである。

4 あとがき

力センサを用いない位置制御ベーストルク制御を産業用ロボットアームに搭載し、その有効性を示した。正確な動力学モデルに基づいた関節駆動トルクを用いて、ロボットアーム手先に作用する外力を高精度に推定し、突当て動作やコンプライアンス動作を実現した。この技術を応用すれば、センサレスでの衝突検出が可能になり、直接教示 (ダイレクトティーチング) への適用も期待できる。

文献

- 加藤健二 他. セル生産に適したロボットと制御技術. 東芝レビュー. 64, 1, 2009, p.52-55.
- Ozaki, F. et al. "Robot Control Strategy for In-orbit Assembly of a Micro Satellite". Advanced Robotics. 18, 2, 2004, p.199-222.



大賀 淳一郎 OGA Jun'ichiro

研究開発センター 機械・システムラボラトリー。
マニピュレータ制御、及びロボットのソフトウェアシステムに関する研究・開発に従事。日本ロボット学会会員。
Mechanical Systems Lab.



西原 泰宣 NISHIHARA Yasunori

東芝機械(株) 制御システム事業部 制御システム技術部主任。
産業用ロボットの研究・開発に従事。
Toshiba Machine Co., Ltd.



大明 準治 OAKI Junji, Ph.D.

研究開発センター 機械・システムラボラトリー 主任研究員, 博士 (工学)。システム同定理論の応用に関する研究・開発に従事。
計測自動制御学会, 電気学会, 日本機械学会, IEEE 会員。
Mechanical Systems Lab.