

ロボット運動制御のための 動力学モデリングと物理パラメータ推定技術

Technology to Estimate Physical Parameters of Dynamic Models for Robot Motion Control

大明 準治

■OAKI Junji

グローバル化する製造業やサービス産業では、コスト低減のために、ロボットアームを導入して部品の組立てや重量物の搬送などの作業を自動化することが望まれている。ロボットアームは片持ちの多関節構造であり、それぞれの関節はばね特性を持っている。このためロボットアームの高速化や大型化に伴って、各関節のばね特性によるアーム先端での振動が大きくなり、作業時間短縮の障害になっている。この振動を抑制するには、ロボットアームの動力学モデルに基づいた制御が必要になるが、この動力学モデルを記述するための慣性モーメントや、摩擦係数、ばね定数などの物理パラメータの算出や計測には、多大な労力と時間を要する。

そこで東芝は、これらの物理パラメータを、数秒間のロボット動作データから迅速かつ高精度に推定する技術を開発した。

Accompanying the ongoing globalization of manufacturing and service industries in recent years, demand is increasing for the introduction of serial-link robot arms for parts assembly and material handling in order to reduce production costs. Such robot arms, which have a cantilevered multijoint structure with spring properties, must be controlled with high acceleration while suppressing arm-tip vibration. As this vibration is due to the elasticity of the reduction gears built into each joint of the robot arm, a dynamic model-based control method taking joint-elasticity of the robot arm into consideration is required.

Toshiba has developed a technology that can precisely estimate the physical parameters of such a dynamic model, including motor inertias, joint-friction coefficients, and joint-spring coefficients, from robot motion data within a few seconds. Experiments on a two-link robot arm confirmed the effectiveness of this estimation method.

一般論文

1 まえがき

水平多関節型ロボットや垂直多関節型ロボット⁽¹⁾のようなリアルリンク^(注1)で構成されるロボットアームは、専有面積が小さいわりにアーム先端の到達範囲を大きくとれるため、組立て作業や搬送作業に広く用いられている。これらは、近年ますます高速・大型化され、各関節に内蔵された減速機のばね特性によって発生するアーム先端の振動を抑制するとともに、高精度に制御することが求められている。特に、水平多関節型ロボットの第1・第2関節(図1)や垂直多関節型ロボットの第2・第3関節のような台座に近い2リンク部分の振動抑制が重要な課題である。2リンク部分の各関節は、2慣性系^(注2)とみなすことができる(以下、この機構をシリアル2リンク2慣性系と呼ぶ)。

このシリアル2リンク2慣性系の制御において、振動を抑制するには、計測可能なモータ側の回転角度から計測困難なリンク側の回転角度をリアルタイム演算で推定するための動力学モデル、及びそれを記述する慣性モーメントや、摩擦係数、ば

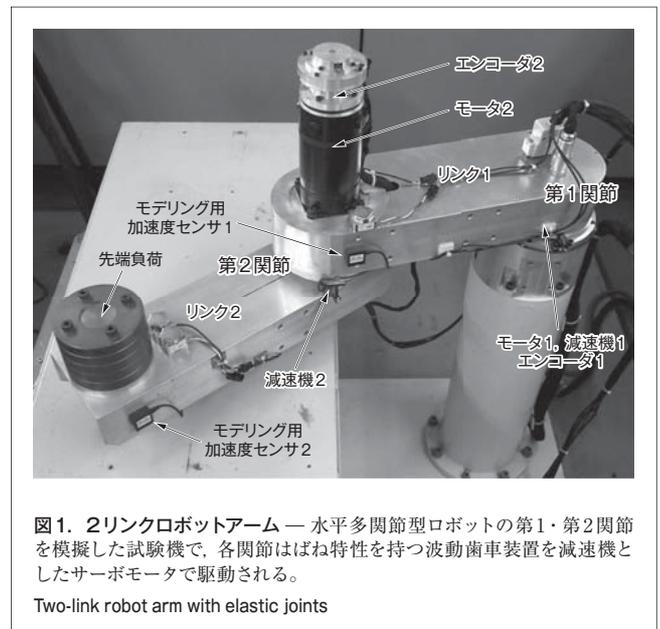


図1. 2リンクロボットアーム — 水平多関節型ロボットの第1・第2関節を模擬した試験機で、各関節はばね特性を持つ波動歯車装置を減速機としたサーボモータで駆動される。

Two-link robot arm with elastic joints

ね定数などの物理パラメータが必要である。しかし、ロボットを分解して物理パラメータを計測する作業には、多大な労力と時間を要する。そこで、ロボット動作時の回転角度やトルクの時系列データから、慣性モーメントや摩擦係数を推定する研

(注1) 複数の連結機構を直列に配して、先端の位置決めをする構造。
(注2) 二つの慣性体(モータの回転子とリンク)が一つのばね要素(減速機)で結合された構造。慣性の法則での慣性系とは異なる。

究⁽²⁾が行われている。ただし、慣性モーメントや摩擦係数をモータのロータ側とリンク側に分けて推定したり、関節のばね定数や減衰係数を精度よく推定したりするのは難しい。

そこで東芝は、シリアル2リンク2慣性系の物理パラメータの推定を、二つの1リンク2慣性系の物理パラメータの推定に帰着させることによって簡単化する方法を開発した⁽³⁾。ここでは、その応用例として、2リンクロボットアームの動力学モデリングと物理パラメータ推定方法について述べる。

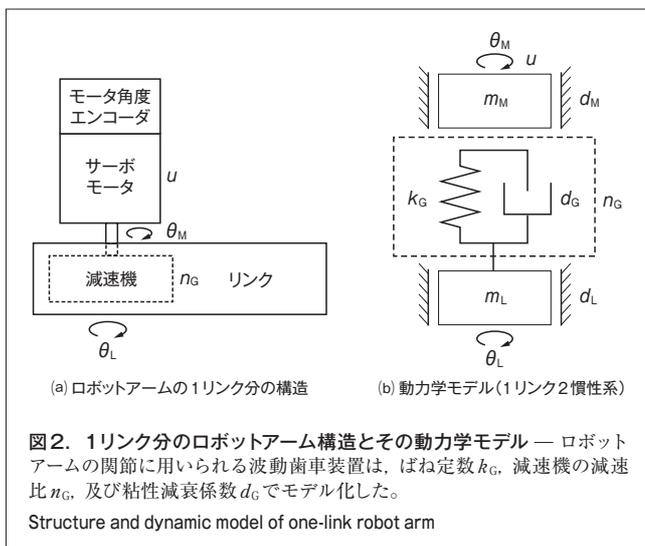
2 ロボットの動力学モデルと物理パラメータ推定方法

図1に示すような水平多関節型ロボットの第1・第2関節を模擬した試験機で、シリアル2リンク2慣性系の物理パラメータを推定する。各関節は、ばね特性を持つ波動歯車装置を減速機としたサーボモータで駆動される。減速機1と減速機2の減速比は、いずれも1/50である。ここで、エンコーダによりモータ側の回転角度は計測できるが、リンク側の回転角度は計測できないことから、動力学モデリングのときだけ各リンクに加速度センサを貼り付ける。そして、加速度センサ信号の積分とエンコーダ信号の時間差分を融合させた信号処理によって、リンク角速度を演算する⁽³⁾。

以下では、まず、ロボットアームの1リンク分、すなわち1リンク2慣性系の動力学モデリングと物理パラメータの推定方法を示す。次いで、シリアル2リンク2慣性系の動力学モデリングを行い、その物理パラメータ推定を、二つの1リンク2慣性系の物理パラメータ推定に帰着させることによって簡単化する方法を示す。

2.1 1リンク2慣性系の動力学モデルと物理パラメータ推定

図1のロボットアームの1リンク分の構造を図2(a)に示す。この動力学モデルは図2(b)に示す1リンク2慣性系とみなせる。



モータ回転子の慣性モーメント m_M とリンクの慣性モーメント m_L が、ばね定数 k_G で減速比 $n_G \leq 1$ の減速機で結合されておりモータ回転子の粘性摩擦係数 d_M 、リンクの粘性摩擦係数 d_L 、及び減速機の粘性減衰係数 d_G も定義する。ここで、モータ回転角度 θ_M を用いたフィードバック制御でモータのトルク u を発生し、動力学モデルに基づいて推定したリンク角度 θ_L を併用した演算で、モータ回転角度 θ_M を制御して振動を抑制する。各トルクのつり合いを考えると、その動力学モデルはモータ側とリンク側の線形微分方程式(1)及び(2)で表せる。

$$m_M \ddot{\theta}_M + d_M \dot{\theta}_M = u - n_G [k_G (n_G \theta_M - \theta_L) + d_G (n_G \dot{\theta}_M - \dot{\theta}_L)] \quad (1)$$

$$m_L \ddot{\theta}_L + d_L \dot{\theta}_L = k_G (n_G \theta_M - \theta_L) + d_G (n_G \dot{\theta}_M - \dot{\theta}_L) \quad (2)$$

式(1)の左辺第1項はモータの慣性トルク、第2項はモータの粘性摩擦トルク、右辺の第1項はモータトルク、第2項はモータ角とリンク角のねじれによるばねと粘性減衰の反作用トルクである。式(2)の左辺第1項はリンクの慣性トルク、第2項はリンクの粘性摩擦トルク、右辺はモータ角とリンク角のねじれによるばねと粘性減衰のトルクである。クーロン摩擦トルクも考慮できるが⁽³⁾、ここでは省略する。

モータトルク u を入力、モータ角速度 $\dot{\theta}_M$ を出力として、 u 及び $\dot{\theta}_M$ のラプラス変換をそれぞれ $U(s)$ 及び $Y_M(s)$ としたときの伝達関数を $G(s) = Y_M(s)/U(s)$ で定義する。式(1)及び(2)をラプラス変換して $G(s)$ について解くと、式(3)が得られる。

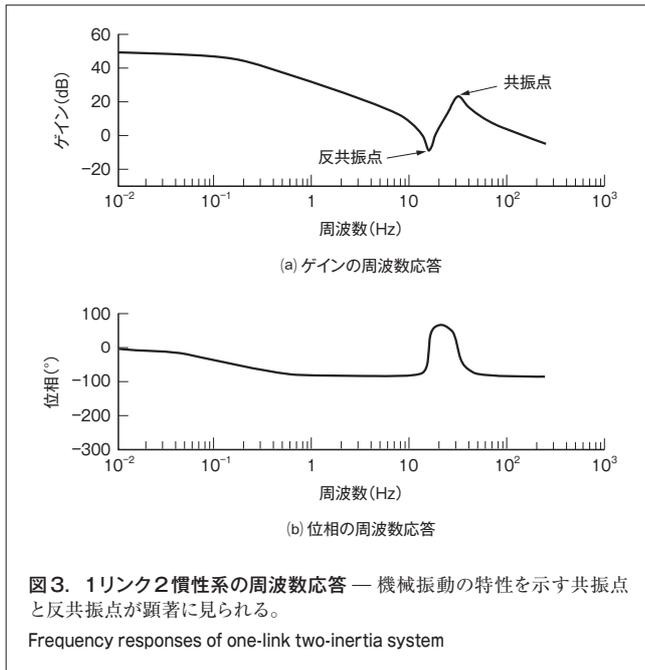
$$G(s) = \frac{Y_M(s)}{U(s)} = \frac{1 + b_1 s + b_2 s^2}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3} \quad (3)$$

式(3)中の a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、及び b_2 は式(4)で表される⁽³⁾。

$$\begin{aligned} a_0 &= d_M + n_G^2 d_L \\ a_1 &= m_M + n_G^2 m_L + (n_G^2 d_G d_L + d_M d_L + d_M d_G) / k_G \\ a_2 &= (m_M d_L + m_M d_G + m_L d_M + n_G^2 m_L d_G) / k_G \\ a_3 &= m_M m_L / k_G \\ b_1 &= (d_L + d_G) / k_G \\ b_2 &= m_L / k_G \end{aligned} \quad (4)$$

モータトルクとして白色性の入力信号を与える加振試験によって式(3)の伝達関数を同定すれば、分母と分子の係数 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、及び b_2 が得られる。次に、 n_G を既知として式(4)の6元連立方程式を解けば、六つの物理パラメータを推定できる。加振試験による伝達関数の同定には、モータトルクを入力信号、モータ角速度(エンコーダ信号の時間差分)を出力信号としたシステム同定のアルゴリズム⁽⁴⁾を適用する。

1リンク2慣性系の周波数応答の同定例を図3に示す。式(3)で表される伝達関数の周波数応答では、機械振動の特性を示す共振点と反共振点が顕著に見られる。



2.2 2リンク2慣性系の動力学モデルと物理パラメータ推定

2リンクロボットアーム、すなわちシリアル2リンク2慣性系の動力学モデルは、1リンク2慣性系の線形微分方程式二つと、ラグランジュの運動方程式から導かれる2リンク剛体機構の非線形微分方程式二つとを組み合わせることでベクトル化すると、式(5)及び(6)で表すことができる。

$$\mathbf{M}_M \ddot{\boldsymbol{\theta}}_M + \mathbf{D}_M \dot{\boldsymbol{\theta}}_M = \mathbf{u} - \mathbf{N}_G [\mathbf{K}_G (\mathbf{N}_G \boldsymbol{\theta}_M - \boldsymbol{\theta}_L) + \mathbf{D}_G (\mathbf{N}_G \dot{\boldsymbol{\theta}}_M - \dot{\boldsymbol{\theta}}_L)] \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_L(\boldsymbol{\theta}_L) \ddot{\boldsymbol{\theta}}_L + \mathbf{c}_L(\dot{\boldsymbol{\theta}}_L, \boldsymbol{\theta}_L) + \mathbf{D}_L \dot{\boldsymbol{\theta}}_L = \mathbf{K}_G (\mathbf{N}_G \boldsymbol{\theta}_M - \boldsymbol{\theta}_L) + \mathbf{D}_G (\mathbf{N}_G \dot{\boldsymbol{\theta}}_M - \dot{\boldsymbol{\theta}}_L) \quad (6)$$

- $\boldsymbol{\theta}_M = [\theta_{M1}, \theta_{M2}]^T$: モータ角度 (1, 2は関節番号)
- $\boldsymbol{\theta}_L = [\theta_{L1}, \theta_{L2}]^T$: リンク角度
- $\mathbf{M}_L(\boldsymbol{\theta}_L) \in R^{2 \times 2}$: リンク慣性行列
- $\mathbf{c}_L(\dot{\boldsymbol{\theta}}_L, \boldsymbol{\theta}_L) \in R^{2 \times 1}$: 遠心・コリオリトルクベクトル
- $\mathbf{M}_M = \text{diag}(m_{M1}, m_{M2})$: モータの回転体の慣性
- $\mathbf{D}_M = \text{diag}(d_{M1}, d_{M2})$: モータの粘性摩擦係数
- $\mathbf{D}_L = \text{diag}(d_{L1}, d_{L2})$: リンクの粘性摩擦係数
- $\mathbf{K}_G = \text{diag}(k_{G1}, k_{G2})$: 減速機のばね定数
- $\mathbf{D}_G = \text{diag}(d_{G1}, d_{G2})$: 減速機の粘性減衰係数
- $\mathbf{N}_G = \text{diag}(n_{G1}, n_{G2})$: 減速比 ($n_{G1}, n_{G2} \leq 1$)
- $\mathbf{u} = [u_1, u_2]^T$: モータが発生するトルク

- T : 転置行列
- diag : 対角行列
- $R^{2 \times 2}$: 実数の 2×2 行列の集合
- $R^{2 \times 1}$: 実数の 2×1 ベクトルの集合

ここで、 a 、 β 、及び γ をリンクの長さ、重心位置、質量、及び慣性から構成される基底パラメータ⁽²⁾とすると、リンク慣性行列は式(7)のように表される。

$$\mathbf{M}_L(\boldsymbol{\theta}_L) = \begin{bmatrix} a + \beta + 2\gamma \cos(\theta_{L2}) & \beta + \gamma \cos(\theta_{L2}) \\ \beta + \gamma \cos(\theta_{L2}) & \beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

また、遠心・コリオリトルクベクトルは式(8)のようになる。

$$\mathbf{c}_L(\dot{\boldsymbol{\theta}}_L, \boldsymbol{\theta}_L) = \begin{bmatrix} -\gamma (2\dot{\theta}_{L1}\dot{\theta}_{L2} + \dot{\theta}_{L2}^2) \sin(\theta_{L2}) \\ \gamma \dot{\theta}_{L1}^2 \sin(\theta_{L2}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(7)及び(8)から明らかなように、式(5)及び(6)では、式(1)及び(2)には存在しなかった非線形かつ第1・第2関節間の干渉トルクが加わる。そのため、前節の方法をそのまま各関節に適用して物理パラメータを推定することは難しい。そこで、両関節間の干渉トルクを非干渉化し、かつ線形化するように関係式を変形する。まず、式(5)及び(6)の左辺に着目して式を変形し、第1関節にかかる非線形の干渉トルク τ_1 を式(9)のように表す。

$$\tau_1 = -(\beta + \gamma \cos(\theta_{L2})) \ddot{\theta}_{L2} + \gamma (2\dot{\theta}_{L1}\dot{\theta}_{L2} + \dot{\theta}_{L2}^2) \sin(\theta_{L2}) \quad (9)$$

式(9)で、リンクの θ_{L1} 及び θ_{L2} に関するデータは、加速度センサとエンコーダの信号処理演算によって取得できる。基底パラメータ β 及び γ については、従来の動力学モデル同定技術⁽²⁾を用いて、ロボット動作時の時系列データに最小2乗法を適用すれば推定できる。同様に、式(5)及び(6)の右辺に着目して式を変形し、第2関節にかかる非線形の干渉トルク τ_2 を式(10)のように表す。

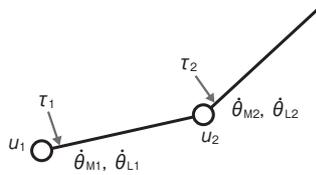
$$\tau_2 = -(\beta + \gamma \cos(\theta_{L2})) \ddot{\theta}_{L1} - \gamma \dot{\theta}_{L1}^2 \sin(\theta_{L2}) \quad (10)$$

式(9)及び(10)の演算によって取得できる非線形の干渉トルク τ_1 と τ_2 は、モータトルクの他に、各関節に加わる別の入力とみなせる。したがって、式(5)及び(6)は、式(11)のように第1・第2関節で独立な行列微分方程式に書き直すことができる。

$$\begin{bmatrix} m_{Mi} & 0 \\ 0 & m_{Li} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{Mi} \\ \ddot{\theta}_{Li} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{Mi} + n_{Gi}^2 d_{Li} & n_{Gi} d_{Gi} \\ -n_{Gi} d_{Gi} & d_{Li} + d_{Gi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{Mi} \\ \dot{\theta}_{Li} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{Gi}^2 k_{Gi} & -n_{Gi} k_{Gi} \\ -n_{Gi} k_{Gi} & k_{Gi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{Mi} \\ \theta_{Li} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_i \\ \tau_i \end{bmatrix} \quad (i=1, 2) \quad (11)$$

これにより、第1・第2関節は τ_1 と τ_2 の導入によって非干渉化される。ただし、式(11)の左辺第1項中の m_{Li} は式(12)のようになる。

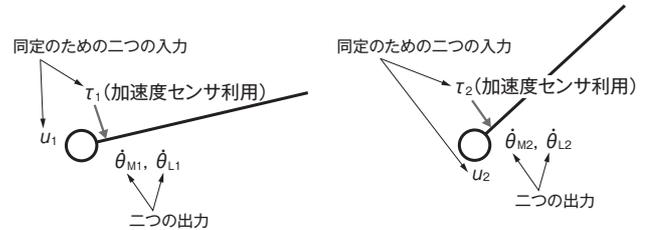
$$\begin{aligned} m_{L1} &= a + \beta + 2\gamma \cos(\theta_{L2}) \\ m_{L2} &= \beta \end{aligned} \quad (12)$$



シリアル2リンク2慣性系(非線形かつ関節間に干渉のあるシステム)

u_1, u_2 : モータの発生トルク $\dot{\theta}_{M1}, \dot{\theta}_{M2}$: モータ角速度
 τ_1, τ_2 : 関節間の非線形干渉トルク $\dot{\theta}_{L1}, \dot{\theta}_{L2}$: リンク角速度

非干渉化



二つの1リンク2慣性系(線形かつ関節間を非干渉化したシステム)

図4. 第1・第2関節の同定を非干渉化する概念 — 各リンクに貼り付けた加速度センサを利用して非線形の干渉トルク τ_1 及び τ_2 を演算し、モータトルクとともに入力として用いることによって、シリアル2リンク2慣性系の伝達関数の同定を二つの1リンク2慣性系の同定に帰着させている。

Concept of decoupling identification of first and second joints

つまり、式(12)の第1関節に関する式にだけ、非線形関数の $\cos(\theta_{L2})$ が含まれている。ここで、第1関節の物理パラメータを推定するための動作に限れば、第2関節のリンク角を0付近に保持して $\cos(\theta_{L2}) \approx 1$ とすることは容易である。この場合、式(11)は線形とみなすことができる⁽³⁾。

そこで、式(1)及び(2)から式(3)を得た手続きと同様に式(11)をラプラス変換すると、第1・第2関節それぞれに対する線形の2入力2出力システムが式(13)で与えられる。

$$\begin{aligned} Y_{Mi}(s) &= G_{11}^i(s) U_i(s) + G_{12}^i(s) T_i(s) \\ Y_{Li}(s) &= G_{21}^i(s) U_i(s) + G_{22}^i(s) T_i(s) \end{aligned} \quad (13)$$

$(i=1, 2)$

ここで、二つの入力 u_i と τ_i 、及び二つの出力 $\dot{\theta}_{Mi}$ と $\dot{\theta}_{Li}$ のラプラス変換をそれぞれ $U_i(s)$ 、 $T_i(s)$ 、 $Y_{Mi}(s)$ 、及び $Y_{Li}(s)$ としたときに定義される四つの伝達関数を $G_{11}^i(s)$ 、 $G_{12}^i(s)$ 、 $G_{21}^i(s)$ 、及び $G_{22}^i(s)$ とした。このとき、 $G_{11}^i(s)$ は、式(3)で定義されるモータトルクを入力、モータ角速度を出力とした伝達関数と等価なものである。したがって、 $G_{11}^i(s)$ が同定できれば、前節に示した手続きで第1リンクの物理パラメータを推定できる。同様に $G_{11}^2(s)$ から第2リンクの物理パラメータも推定できる。

式(13)は、式(3)と同様にモータトルクとして白色性の入力信号を与える加振試験によって同定することができる。式(3)では1入力1出力の同定アルゴリズムを適用したが、式(12)では2入力2出力の同定アルゴリズム⁽⁴⁾を適用することになる。シリアル2リンク2慣性系を二つの1リンク2慣性系へと非干渉化する概念を、図4に示す。

3 物理パラメータ推定の実験

図1の試験機を用いて物理パラメータ推定の実験を行った。まず、ロボットの第1・第2関節に対して同時に1秒間の任意の加減速動作をさせたときのデータを収集し、基底パラメータの

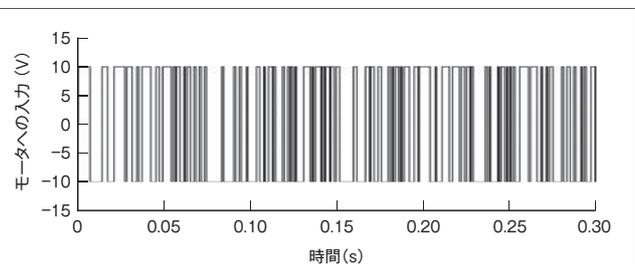


図5. 各関節を加振するための疑似白色2値信号 — M系列を用いた疑似乱数2値信号を使用した。

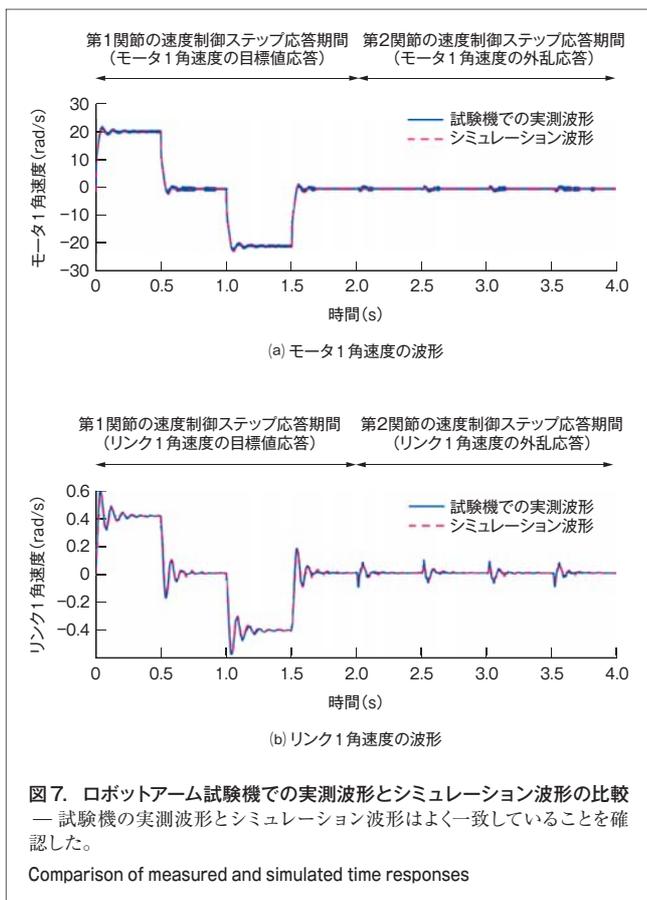
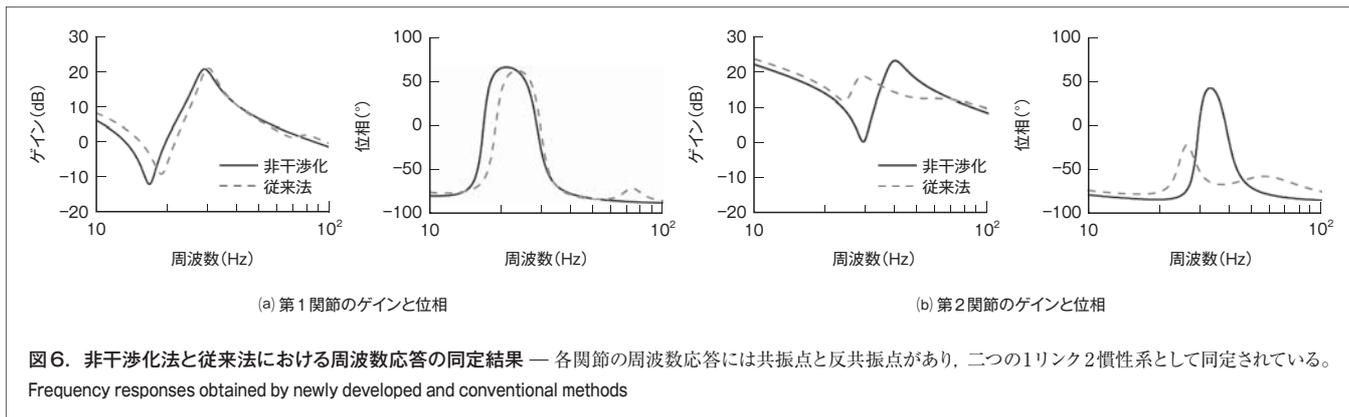
Pseudo-random binary signal for each joint excitation

α 、 β 、及び γ を推定する⁽²⁾。次に、第2関節のモータの入力を0にしておき、白色性の信号を第1関節のモータに入力して1秒間加振する。ここでは、図5に示す疑似白色2値信号を用いた。

次に、第1関節のモータの入力を0にしておき、第2関節を1秒間加振する。式(13)の伝達関数 $G_{11}^1(s)$ 及び $G_{11}^2(s)$ を同定して周波数応答を求めた結果を、それぞれ図6(a)及び(b)の実線で示す。図3の周波数応答と相似な共振点と反共振点が見られ、各関節ともに1リンク2慣性系として同定されている。

一方、 τ_1 及び τ_2 を導入しない従来法による結果を、それぞれ図6(a)及び(b)の破線で示す。式(3)では表せない複雑な伝達関数の周波数応答であり、物理パラメータとの対応が難しい。実線で同定された各関節の1リンク2慣性系の伝達関数から物理パラメータを推定し、式(5)及び(6)に基づく動力学シミュレータを構築した。

試験機の第1関節のモータ1・リンク1角速度の実測波形とシミュレーション波形を図7に示す。第1関節の速度制御ステップ応答の上げ下げ(第2関節は制御で固定)、及び第2関節の速度制御ステップ応答の上げ下げ(第1関節は制御で固定)を行う4秒間の動作データを用いた。第1関節のモータ1角速度及びリンク1角速度の目標値応答を示すステップ応答



期間の波形や、モータ1角速度及びリンク1角速度の外乱応答を示す第2関節のステップ応答期間に制御で固定したときの波形はよく一致している。今回同定した動力学モデルにおける物理パラメータの推定精度の良さを検証することができた。

4 あとがき

ロボットアームの運動制御のための動力学モデリングに必要な物理パラメータを、数秒間の動作データから精度よく推定できる技術を開発した。加速度センサ信号から入力を演算して伝達関数の同定を非干渉化しかつ線形化する方法は、既存のモデリングツール(4)を有効活用できる一例と考えられる。

今後、開発した技術の他分野への応用についても検討していきたい。

文献

- (1) 東芝機械ホームページ. 産業用ロボットWebカタログ. <<http://www.toshiba-machine.co.jp/product/robot/index.html>>, (参照2012-06-20).
- (2) Swevers, J. et al. Dynamic Model Identification for Industrial Robots. Control Systems, IEEE. 27, 5, 2007, p.58 - 71.
- (3) Oaki, J. et al. "Decoupling Identification Method of Serial Two-link Two-inertia System for Robot Motion Control". Proc. 18th IFAC World Congress. Milano, Italy, 2011-07, IFAC. 2011, p.14359 - 14366.
- (4) Ljung, L. System Identification Toolbox. For Use with MATLAB® (Version 7.0). The MathWorks, Inc., 2007, 531p.



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.