

シリアル2リンク2慣性系の非干渉化同定

— 閉ループ要素を考慮した精度評価 —

大明準治 (東芝/慶應義塾大学) 足立修一 (慶應義塾大学)

Decoupling Identification for Serial Two-link Two-inertia System

— Accuracy Evaluation in Consideration of Closed-loop-controlled Elements —

*J. Oaki (Toshiba Corporation/Keio University) and S. Adachi (Keio University)

Abstract— The authors proposed a multivariable identification method, called “Decoupling identification”, for a “SCARA-type” planar two-link robot arm with elastic reduction gears, which is treated as a serial two-link two-inertia system. The decoupling identification method enables the serial two-link two-inertia system to be divided into two one-link two-inertia systems. This paper describes the accuracy evaluation of the identification method through experimental results using the two-link arm with closed-loop-controlled elements. The results show the method is applicable to a “PUMA-type” vertical robot arm under gravity.

Key Words: Multivariable identification, Subspace identification method, Closed-loop identification, Elastic joint robot, Two-inertia resonant system

1 はじめに

水平型の SCARA や垂直型の PUMA など、シリアルリンクを持つロボットアームは産業用に広く使われている。そして、近年ますます高加減速・高速化され、各軸に内蔵する減速機の弾性に起因した振動を抑制しながら高精度に動作することが要求されている。従来のモーションコントロールの多くは、1 入力 2 慣性系の制御を中心課題として扱っているため、前記ロボットアームのようにシリアルに 1 リンク 2 慣性系が連なった非線形の多入出力連成振動系に対して必ずしも効果的な制御方法とは言えなかった。

このようなシリアル 2 リンク 2 慣性系 (Fig. 1 に一例。弾性関節を持つ水平旋回 2 リンクアーム) に対する効果的な制御方法として、多入出力状態空間モデル表現での外乱オブザーバに基づくもの^{1, 2)}や特異摂動法に基づくもの³⁾などが提案されている。これらの方法の実装には、関節弾性まで考慮に入れた動力学モデルが必須であり、動力学モデルに現れる物理パラメータの値が精度良く推定されていることが前提となる。また、物理パラメータの値は、その変動範囲を考慮したタイトなロバスト制御系やゲインスケジューリング制御系の設計においても重要な役割を果たす。ここでいう物理パラメータとは、各軸の慣性やバネ係数、摩擦係数を指している。時系列データから多リンク剛体関節モデルの物理パラメータの値を推定する研究については四半世紀の歴史があるが⁴⁾、弾性関節モデルまで拡張したものはほとんど見あたらない。周波数応答を見ながらの手作業²⁾に頼っているのが実情である。

著者らは既に、Fig. 1 のようなシリアル 2 リンク 2 慣性系に対して、部分空間法をベースとした多入出力状態空間モデル同定法を応用した第 1, 2 リンクの非干渉化同定法を提案している⁵⁾。本同定法は、各リンク上に搭載した加速度センサ信号を同定出力だけでなく同定入力にも利用し、同定動作時にリンク間に働く非線形力を非干渉化することによって、2 つの 1 リンク 2 慣性系の「線形 2 入力 2 出力同定問題」に帰着させているのがポイントである。そして、同定された 1 リンク

2 慣性系の式から、係数比較によって物理パラメータの値を推定する。本手法は、グレーボックスモデリング⁶⁾からのアプローチと見なせる。

この非干渉化同定法では、まず、2 リンクアームの第 1 軸に閉ループで M 系列 (疑似白色 2 値信号の一つ) を入力、第 2 軸は開ループ (サーボフリー) として第 1 リンク 2 入力 2 出力系の非干渉化同定実験を行い、次に、第 1, 2 軸を入れかえて第 2 リンク 2 入力 2 出力系の同定実験を行っている。しかし、本手法を水平旋回型アームだけでなく重力を受ける垂直多関節型アームにも適用するには、M 系列を入力する軸以外の開ループ軸の落下対策、つまり、閉ループ化が必須である。

本稿の目的は、既提案手法⁵⁾において閉ループ要素が系に入った場合でも非干渉化同定法が有効なのか、その精度を評価することにある。以下、水平旋回型 2 リンクアームの実機を用いた検討結果を報告する。

2 対象とするシステム

本稿で制御対象とするのは、Fig. 1 に示すような水平旋回型の 2 リンクアーム (各リンクの長さ 0.325 m) である。各軸を駆動する DC モータ (第 1 軸 500 W, 第

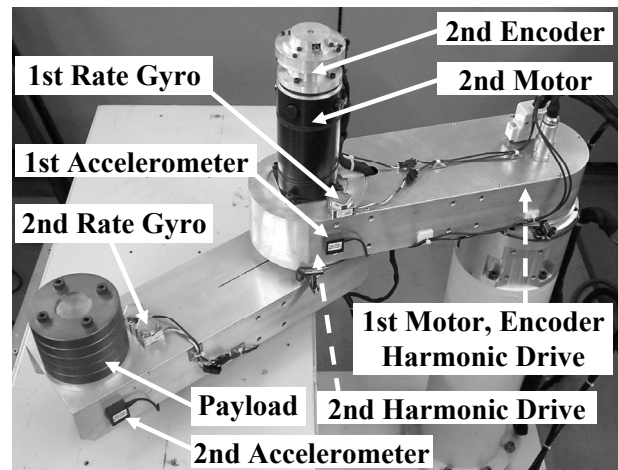


Fig. 1: Planar two-link arm with elastic joints.

2 軸 300 W) は各リンク上に配置され、パネ要素として振る舞うハーモニックドライブ[®]減速機(減速比 1/50)が直結されている。これは、SCARA 型ロボットの第 1, 2 軸を模擬しており、1 リンク 2 慣性系が直列に 2 つ配置されているので、著者らはシリアル 2 リンク 2 慣性系と呼んでいる。第 1, 2 軸の駆動系は全く同じ構造をしているが、第 2 軸は並進運動もするので、回転運動だけの第 1 軸とは異なる連成振動特性を示すのが特徴である。

第 2 リンク先端には 1 枚 1 kg の円盤を 5 枚取り付けであり、5~0 kg の範囲で手先負荷を変化できる。各モータには、モータ回転角度計測用エンコーダ(8192 pulse)が内蔵され、各リンク上には、並進加速度計測用加速度センサ(帯域 300 Hz)が搭載されている。この並進加速度の座標変換によってリンク毎の回転角加速度を得る。この角加速度の積分とエンコーダ差分信号のハイパス/ローパスフィルタ融合演算⁵⁾によって、リンク毎の回転角速度を得る。以上で得た角加速度信号は多入力による非干渉化同定達成のために、角速度信号については多出力による同定精度向上のために利用される。なお、アーム制御や同定用データ収集には、リアルタイム LinuxPC を用いている。

3 シリアル 2 リンク 2 慣性系の動力学モデル

シリアル 2 リンク 2 慣性系の動力学モデル^{1, 2)}は、次のようなモータ側とリンク側の 2 組の式で与えられる。

$$\begin{aligned} M_M \ddot{\theta}_M + D_M \dot{\theta}_M + f_M \text{sgn}(\dot{\theta}_M) \\ = Eu - N_G [K_G (N_G \theta_M - \theta_L) \\ + D_G (N_G \dot{\theta}_M - \dot{\theta}_L)] \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_L(\theta_L) \ddot{\theta}_L + c_L(\dot{\theta}_L, \theta_L) + D_L \dot{\theta}_L \\ = K_G (N_G \theta_M - \theta_L) + D_G (N_G \dot{\theta}_M - \dot{\theta}_L) \quad (2) \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} \theta_M &= [\theta_{M1}, \theta_{M2}]^T: \text{モータ回転角度 (1, 2 は軸番号)} \\ \theta_L &= [\theta_{L1}, \theta_{L2}]^T: \text{リンク回転角度} \\ M_L(\theta_L) &\in R^{2 \times 2}: \text{リンク慣性行列} \\ c_L(\dot{\theta}_L, \theta_L) &\in R^{2 \times 1}: \text{遠心力・コリオリカベクトル} \\ M_M &= \text{diag}(m_{M1}, m_{M2}): \text{モータ+減速機高速段慣性} \\ D_M &= \text{diag}(d_{M1}, d_{M2}): \text{モータ軸粘性摩擦係数} \\ D_L &= \text{diag}(d_{L1}, d_{L2}): \text{リンク軸粘性摩擦係数} \\ K_G &= \text{diag}(k_{G1}, k_{G2}): \text{減速機パネ係数} \\ D_G &= \text{diag}(d_{G1}, d_{G2}): \text{減速機減衰係数} \\ N_G &= \text{diag}(n_{G1}, n_{G2}): \text{減速比 } (n_{G1}, n_{G2} \leq 1) \\ f_M &= [f_{M1}, f_{M2}]^T: \text{モータ軸クーロン動摩擦トルク} \\ E &= \text{diag}(e_1, e_2): \text{トルク/電圧 (電流指令値) 定数} \\ u &= [u_1, u_2]^T: \text{入力電圧 (モータ電流制御系への指令値)} \end{aligned}$$

ここで、 α, β, γ をリンクの長さや重心位置、質量、慣性より構成される基底パラメータ⁷⁾とすると、リンク慣性行列は次式のように表される。

$$M_L(\theta_L) = \begin{bmatrix} \alpha + \beta + 2\gamma \cos(\theta_{L2}) & \beta + \gamma \cos(\theta_{L2}) \\ \beta + \gamma \cos(\theta_{L2}) & \beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、(1, 1) 要素の最大値(第 1, 2 リンクが真っ直ぐ伸びた姿勢の時の値)として $m_{L1} \equiv \alpha + \beta + 2\gamma$ 、(2, 2) 要素については一定値 $m_{L2} \equiv \beta$ としておく。

また、遠心力・コリオリカベクトルは次式のようになる。

$$c_L(\dot{\theta}_L, \theta_L) = \begin{bmatrix} -\gamma(2\dot{\theta}_{L1}\dot{\theta}_{L2} + \dot{\theta}_{L2}^2) \sin(\theta_{L2}) \\ \gamma\dot{\theta}_{L1}^2 \sin(\theta_{L2}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

なお、各軸のねじれは微小なので、 $\cos(\theta_{L2})$ や $\sin(\theta_{L2})$ では、 $\theta_{L2} = n_{G2}\theta_{M2}$ と置き換えて計算できる。

さて、提案手法によって式 (1), (2) に現れる物理パラメータの値を推定するためには、まず β, γ の値が必要になるので、式 (1), (2) で $\theta_M = N_G^{-1}\theta_L$ と置いた剛体関節モデル

$$\begin{aligned} M(\theta_L) \ddot{\theta}_L + c_L(\dot{\theta}_L, \theta_L) + D \dot{\theta}_L \\ + N_G^{-1} f_M \text{sgn}(\dot{\theta}_M) = N_G^{-1} Eu \quad (5) \end{aligned}$$

における物理パラメータ推定⁷⁾をあらかじめ行っておく。ここで、 $M(\theta_L)$ 、 D は、次式で表される剛体関節モデルとしての慣性行列と粘性摩擦係数行列である。

$$\begin{aligned} M(\theta_L) &= \begin{bmatrix} \alpha + \beta + 2\gamma \cos(\theta_{L2}) + m_{M1}/n_{G1}^2 & \beta + \gamma \cos(\theta_{L2}) \\ \beta + \gamma \cos(\theta_{L2}) & \beta + m_{M2}/n_{G2}^2 \end{bmatrix} \\ &\quad (6) \end{aligned}$$

$$D = \text{diag}(d_{L1} + d_{M1}/n_{G1}^2, d_{L2} + d_{M2}/n_{G2}^2) \quad (7)$$

4 シリアル 2 リンク 2 慣性系の非干渉化同定

4.1 非干渉化同定法の概要と閉ループ要素の考慮

既提案の非干渉化同定法⁵⁾は、剛体関節モデルの物理パラメータの推定、1 リンク毎の 2 入力 2 出力状態空間モデルの同定、1 入力 1 出力伝達関数を経由した弾性関節モデルの物理パラメータの推定の 3 ステップからなる (Fig. 2)。以下では既提案法の概要を説明し、さらに、従来閉ループとしていた「同定入力を加えない軸の閉ループ制御化」について検討する。

4.1.1 剛体関節モデルの物理パラメータ推定

式 (5) に現れる剛体関節モデルの物理パラメータは線形に括り出せて、各リンクに適当な動作をさせたときの時系列データに最小 2 乗法を適用することによって推定することができる⁷⁾。この推定値 $\hat{\beta}, \hat{\gamma}, \hat{M}, \hat{D}, \hat{f}_M$ のうちの $\hat{\beta}, \hat{\gamma}$ と、前章で示した加速度センサ信号から得たリンク角加速度・角速度を用いて非線形のリンク間干渉力を計算できることがポイントとなる。また、ここで推定されたクーロン動摩擦トルクも非干渉化同定法の同定入力から差し引くことで、その影響を除去する。

4.1.2 1 リンク毎の多入出力状態空間モデル同定

ここでは、リンク角加速度・角速度を用いて計算可能な非線形干渉力を同定用の入力に取り込み、リンク間を非干渉化して、1 リンク毎の状態空間モデルの同定に帰着させることがポイントである。まず、式 (1), (2) の各 1 行目の第 1 軸の入出力に着目する。計算可能な非

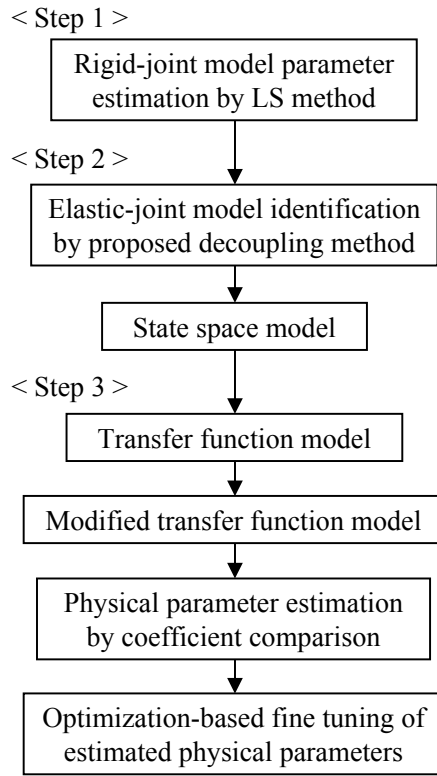


Fig. 2: Outline of proposed identification method.

線形干渉力を τ_1 とおいて入力として括り出すことで、

$$\dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ \tau_1 \end{bmatrix}, \quad A_1 \in R^{4 \times 4}, \quad B_1 \in R^{4 \times 2} \quad (8)$$

$$y_1 = C_1 x_1, \quad C_1 \in R^{2 \times 4} \quad (9)$$

$$x_1 \equiv [\theta_{M1} \ \theta_{L1} \ \dot{\theta}_{M1} \ \dot{\theta}_{L1}]^T$$

$$y_1 \equiv [\dot{\theta}_{M1} \ \dot{\theta}_{L1}]^T$$

$$\tau_1 = -(\hat{\beta} + \hat{\gamma} \cos(\theta_{L2})) \ddot{\theta}_{L2} + \hat{\gamma}(2\dot{\theta}_{L1}\dot{\theta}_{L2} + \dot{\theta}_{L2}^2) \sin(\theta_{L2}) \quad (10)$$

の2入力2出力4状態変数の線形状態方程式を導ける。角速度 角度の構造的な積分器を除いて同定するため式(9)の速度出力をとっており、後述のように伝達関数では3次になる(行列の要素の詳細は文献⁵⁾の付録を参照)。この式に、2入力2出力状態空間モデル同定法を適用する。MATLAB[®]における部分空間法 n4sid コマンドや、n4sidの結果を初期値として繰返し計算する予測誤差法 pem コマンド⁸⁾を使用できる。

ただし、第1軸の同定動作時に干渉力を受けて励起される第2軸の動作範囲では、式(3)の(1,1)要素は一定と見なせると仮定する。同定入力 u_1 の振幅については、SN比の観点から(1,1)要素中の \cos が1に近い値を維持できる範囲(第1,2リンクが真っ直ぐ伸びた姿勢付近)で出来るだけ大きく設定する。

また、従来、同定動作中に閉ループに設定していた軸については、モータ角速度のFF-I-P制御⁹⁾による閉ループ化も行う(詳細は後述する)。第2軸を閉ループ化した場合、(1,1)要素がほぼ一定に保たれるので、前述の \cos 条件は不要になる。

さて、可同定条件を満たすには、M系列などで任意

に設定できる同定入力 u_1 だけでなく、動力学モデルで励起される τ_1 も十分な周波数成分を持つ必要がある。後述する実験では、従来の第2軸を開ループにしたときに加え、閉ループ化した場合についても、この条件の確認を行う。

第2軸も同様で、式(1),(2)の各2行目の入出力に着目すると、式(8),(9)において添え字を2とした式が成り立つ。第1軸からの計算可能な非線形干渉力は、

$$\tau_2 = -(\hat{\beta} + \hat{\gamma} \cos(\theta_{L2})) \ddot{\theta}_{L1} - \hat{\gamma} \dot{\theta}_{L1}^2 \sin(\theta_{L2}) \quad (11)$$

で表される同定入力 τ_2 として取り込む。なお、第2軸については式(3)の(2,2)要素は一定値であり、第1軸同定時の「(1,1)要素は一定」のような仮定は不要である。前記の閉ループ化については第1軸に施されることになる。

4.1.3 弾性関節モデルの物理パラメータ推定

部分空間法をベースとして同定された2入力2出力の状態空間モデルと、式(8),(9)の行列の要素を係数比較することによって物理パラメータを推定することができる。しかし、同定された状態方程式モデルが式(8),(9)のような正準系で実現できるとは限らないので、入出力関係だけに着目し、伝達関数モデルに変換してから係数比較を行う。式(8),(9)から、第1リンクについて、

$$\dot{\theta}_{M1}(s) = G_{11}(s) u_1 + G_{12}(s) \tau_1 \quad (12)$$

$$\dot{\theta}_{L1}(s) = G_{21}(s) u_1 + G_{22}(s) \tau_1 \quad (13)$$

が導ける。ここで、 $G_{11}(s)$ は非干渉化された第1リンクのモータ入力からモータ角速度までの1リンク2慣性系の伝達関数(2/3次)であり、 $G_{21}(s)$ はリンク角速度までの伝達関数(1/3次)である。これらの伝達関数への物理パラメータの入り方は次の通りである¹⁰⁾。

$$G_{11}(s) = \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3} \quad (14)$$

$$G_{21}(s) = \frac{n_{G1}(b_0 + b'_1 s)}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3} \quad (15)$$

ただし、

$$a_0 = d_{M1} + n_{G1}^2 d_{L1}$$

$$a_1 = m_{M1} + n_{G1}^2 m_{L1}$$

$$+ (n_{G1}^2 d_{G1} d_{L1} + d_{M1} d_{L1} + d_{M1} d_{G1}) / k_{G1}$$

$$a_2 = (m_{M1} d_{L1} + m_{M1} d_{G1})$$

$$+ m_{L1} d_{M1} + n_{G1}^2 m_{L1} d_{G1} / k_{G1}$$

$$a_3 = m_{M1} m_{L1} / k_{G1}$$

$$b_0 = 1, \quad b_1 = (d_{L1} + d_{G1}) / k_{G1}, \quad b_2 = m_{L1} / k_{G1}$$

$$b'_1 = d_{G1} / k_{G1}$$

$k_{G1} \rightarrow \infty$ のとき、これらの伝達関数は1次遅れ(剛体関節モデル)になる。同定された式(14),(15)の各係数に関する式は7個、未知パラメータの数は6個であるので、非負の拘束条件を加えた最小2乗法によって弾性関節モデルの物理パラメータを推定できる。この際、剛体関節モデルの物理パラメータ推定結果から得た1次遅れ伝達関数を合成し、低周波領域の補正を行ってから最小2乗法を適用すると推定精度が向上する⁵⁾。

以上で得られた物理パラメータの推定値を用いて、シリアル2リンク2慣性系の動力学シミュレータを構築する。そして、閉ループシミュレーションベースで非線形最小2乗法に基づく最適化を行い、実機の時間応答に合うように物理パラメータの値をファインチューニングする。収束を確実にするために、探索範囲は小さく設定する。

4.1.4 閉ループ要素を内蔵した動力学モデル

前々項で述べたように、既提案法において同定動作中に開ループとしていた軸については、次のように定義されるモータ角速度のFF-I-P制御による閉ループ化を行う。

$$\begin{aligned} u_i \equiv & k_{FVi} \dot{\theta}_{MRi} \\ & + k_{IVi} \int (\dot{\theta}_{MRi} - \dot{\theta}_{Mi}) dt \\ & - k_{PVi} \dot{\theta}_{Mi} \quad (i = 1, \text{ or } 2) \end{aligned} \quad (16)$$

ただし、

- $\dot{\theta}_{MRi}$: モータ角速度目標値 ($i = 1, \text{ or } 2$)
- $\dot{\theta}_{Mi}$: モータ角速度
- k_{FVi} : モータ角速度目標値フィードフォワード制御定数
- k_{IVi} : モータ角速度偏差積分フィードバック制御定数
- k_{PVi} : モータ角速度比例フィードバック制御定数
- u_i : 入力電圧 (モータ電流制御系への指令値)

である。実際には $\dot{\theta}_{MRi} = 0$ (速度サーボロック) なので、

$$\begin{aligned} u_i \equiv & -k_{IVi} \int \dot{\theta}_{Mi} dt - k_{PVi} \dot{\theta}_{Mi} \\ = & -k_{IVi} \theta_{Mi} - k_{PVi} \dot{\theta}_{Mi} \quad (i = 1, \text{ or } 2) \end{aligned} \quad (17)$$

となる。シンプルな閉ループ系にするため位置制御ループは省いた。この速度サーボロックだけではトルク外乱に対して位置ずれを生ずるが、微小なので同定用の動作としては問題ない。一方、提案する同定法を垂直多関節型アームに適用する場合に、速度サーボ系の積分器の作用で重力補償トルクを自然発生できるので落下防止が容易である。

さて、部分的な状態フィードバック制御と見なせる式(17)で与えられる u_i を式(1)に代入すると、該当する軸の摩擦係数やバネ係数といった物理パラメータの値が見かけ上変化することになる。しかし、第1軸(第2軸)にM系列を入力する場合に第2軸(第1軸)が状態フィードバック制御(閉ループ制御)されているか否かは、提案する非干渉化同定法で理想的に非干渉化されていれば本来関係ないはずである。また、多入出力状態空間モデル同定に強力とされる部分空間法は、残差の無相関化に基づく同定法なので、閉ループ系の同定には不向きであることがわかっている⁶⁾。これらの検証については、以下で述べる同定実験を通じて行うことにする。

4.2 同定実験と考察

ここでは、次項で既提案における同定結果⁵⁾について簡単に紹介し、次々項以降で、従来開ループとしていた「同定入力を加えない軸の閉ループ制御化」の実験結果と精度評価について述べる。

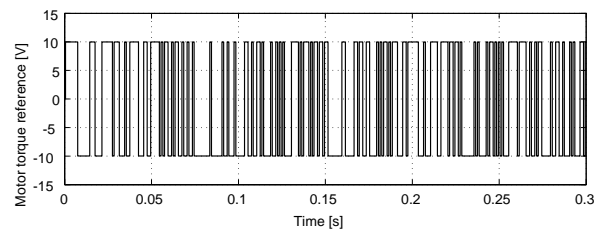


Fig. 3: M-sequence-input data for 1st link identification (first 0.3 s of 1.023 s).

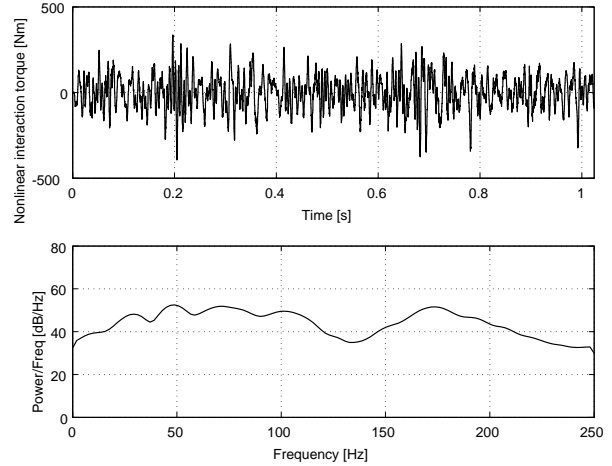


Fig. 4: Nonlinear interaction torque data for 1st link identification and its power spectral density, where 2nd link is free.

4.2.1 各1リンク2入力2出力系の非干渉化同定実験

Fig. 1のアーム(負荷5kg)に対し、第1軸に開ループでM系列を入力、第2軸は開ループ(サーボフリー)として同定実験を行った。入出力データのサンプル時間は0.25ms、M系列のステップは1ms、周期1023、同定時間は1.023秒である。同定する周波数は100Hz程度までとし、入出力データのデシメーション次数は8、つまり同定のサンプル時間は2msとした。Fig. 3は、M系列入力(図示は最初の0.3秒分)で、Fig. 4は同定動作時の非線形干渉力 τ_1 とパワースペクトル密度(デシメーション後)である。後者のパワースペクトル密度は、動力学モデルに基づくフィードバック効果を受けて凹凸が生じているが、実用上問題ないと判断できる。

以上の入力データと第1軸のモータとリンクの角速度の出力データを用いて、2入力2出力系と見なした同定を行った。アルゴリズムには、MATLAB[®]の部分空間法ベースの予測誤差法コマンド pem⁸⁾ を次数3で使い、連続時間系として同定した。Fig. 5の実線に同定結果の周波数応答を示す。式(14)に示す2/3次の伝達関数が狙い通り同定された。ここで剛体関節モデルの物理パラメータ推定結果から得た1次遅れ伝達関数を合成したところ、同図破線のような周波数応答となり、低周波領域が補正された。

さらに、モータ角速度のFF-I-P制御による閉ループシミュレーションベースで非線形最小2乗法に基づく最適化(lsquonlin¹¹⁾)を行い、実機の時間応答に合うように物理パラメータの値のファインチューニングを行った。この際、第1,2軸の物理パラメータ(非線形のクーロン動摩擦トルクを除く)全てを同時に探索し、その範囲を各 $\pm 25\%$ に制限した。推定された物

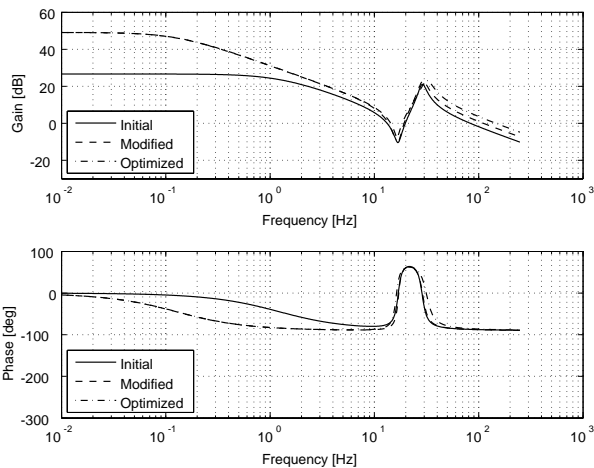


Fig. 5: Modification and optimization of initial estimated frequency responses for 1st link from motor input u_1 to motor angular velocity θ_{M1} .

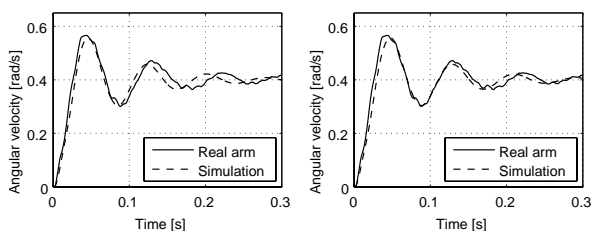


Fig. 6: Optimization-based fine tuning of estimated physical parameters using 1st link angular velocity step responses. Left: Before optimization. Right: After optimization.

理パラメータの値は、文献⁵⁾の表1を参照されたい。Fig. 6は、最適化前後の第1軸のリンク角速度の応答波形である(第2軸は速度サーボロック)。物理パラメータ最適化後の周波数応答をFig. 5の1点鎖線に示した。共振周波数がわずかにずれたことがわかる。

第2軸についても第1軸と同様な結果であり、Fig. 7のように典型的な1リンク2慣性系の周波数応答が推定され、シリアル2リンクによる連成振動下での非干渉化同定が達成されていることがわかる。

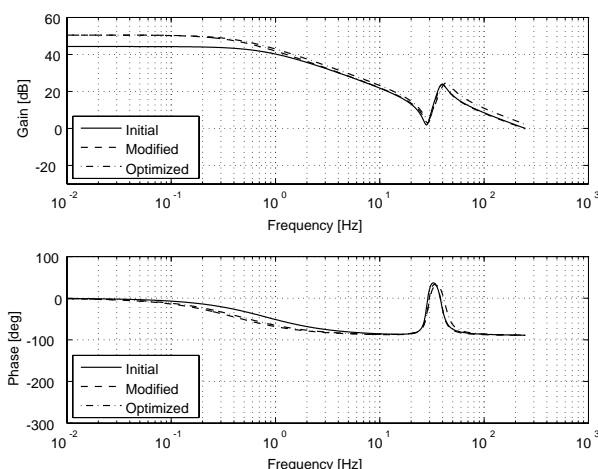


Fig. 7: Modification and optimization of initial estimated frequency responses for 2nd link from motor input u_2 to motor angular velocity θ_{M2} .

4.2.2 閉ループ要素が入った同定実験と精度評価

手先負荷 5kg 時において、第1軸(第2軸)の同定入力を前節と同じ仕様のM系列とし、第2軸(第1軸)をモータ角速度のFF-I-P制御を用いて閉ループ化して実験を行った。

Fig. 8は、閉ループ制御の場合の同定動作時の非線形干渉力 τ_1 とパワースペクトル密度である。後者のパワースペクトル密度は、Fig. 4に比べて速度制御された低周波領域で小さくなっているが、機械共振周波数(15Hz付近)以上を同定するという観点からは大きな問題はないと見なせる。

Fig. 9(a)の左側は、第2軸を開ループ(実線)、閉ループ制御(破線)とした時の第1軸のモータ入力からモータ角速度までの周波数応答同定結果である。同様に、Fig. 9の右側は、第2軸の同定結果である。これらはpemコマンドを適用した初期推定の結果である。また各図には、リファレンスとしてFig. 5やFig. 7における「最適化後」の周波数応答も一点鎖線で示した。各結果では共振周波数や反共振周波数にわずかなズレを生じているものの、リンク間の非干渉化は達成されて典型的な1リンク2慣性系の周波数応答の推定に成功している。第2軸の反共振周波数のズレがやや目立つものの10%程度であり、非線形最適化に基づくファインチューニングでカバーできる範囲である。

以上の結果から、閉ループ要素が入っても非干渉化同定法が機能することがわかった。ここで、予測誤差法 pem コマンドにおいて初期値を与えている部分空間法 n4sid コマンドがどのような周波数応答を推定しているのか示したのがFig. 9(b)である。図の線種はFig. 9(a)と同様である。Fig. 9(b)から明らかなように、破線で示す閉ループ制御の場合、第1,2軸ともに反機械共振点がうまく同定できていない。これは、閉ループ要素の影響を受けて、周波数応答ゲインの小さい部分で部分空間法の推定精度が劣化していることを示している。一方、予測誤差法については、閉ループ要素が存在しても、開ループ時と同等な精度で機能しているため、部分空間法による初期値を与えた後の繰返し計算が強力であることが確認できる。

さらに、残差と入力との間の相互相関関数についても調べた⁶⁾。紙面の都合上、第2軸のモータ入力からモータ角速度への同定結果に関してFig. 10に示す。同図の(a)は第1軸が開ループでpem使用、(b)は第1軸が開ループでpem使用、(c)は第1軸が開ループでn4sid使用、(d)は第1軸が開ループでn4sid使用となっている。それぞれの図において、影のかかっている部分(黄色)は、その値を0と見なしてよい信頼区間である。同図の(d)では、明らかに残差と入力とが相関を持っており、残差の無相関化に基づく部分空間同定法 n4sid が正しく機能していないことが確認できる。

5 おわりに

本稿では、既提案の非干渉化同定法において、閉ループ要素が入っても有効であることを2リンクアーム実機を用いた精度評価で確認した。今後、重力の影響を受ける垂直多関節型アームで確認する予定である。

参考文献

- 1) 西田, 西村, 本家, 中上, 今泉, 木邑: 柔軟関節を持つマニピュレータのロバスト制御 - オブザーバと2自由度コントローラ

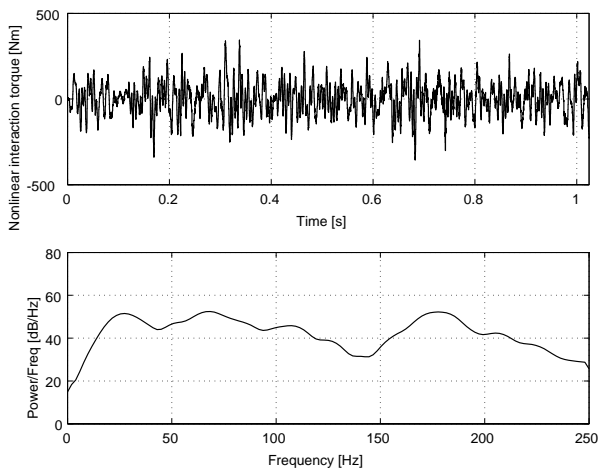
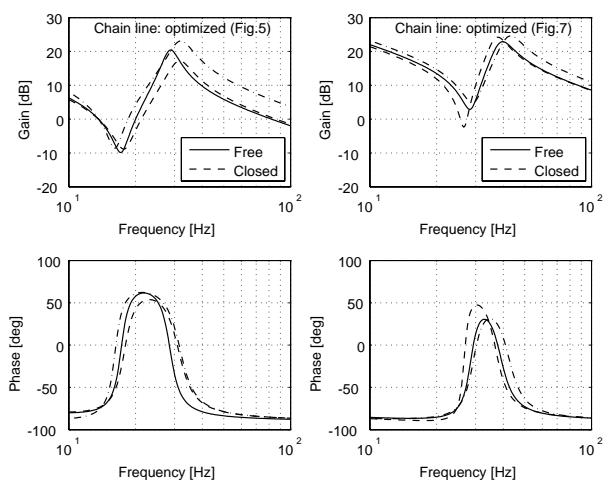
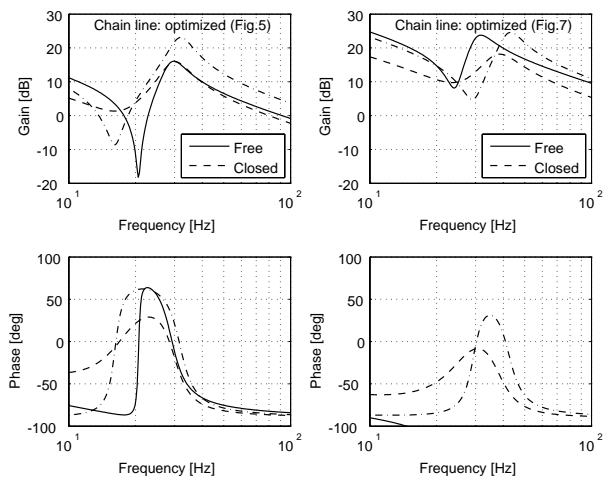


Fig. 8: Nonlinear interaction torque data for 1st link identification and its power spectral density, where 2nd link is closed-loop controlled.



(a) Estimates using “pem” command

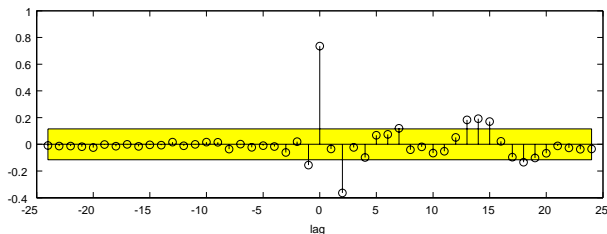


(b) Estimates using “n4sid” command

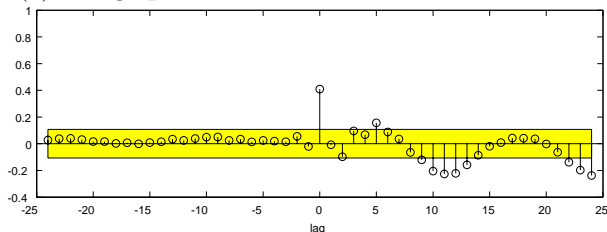
Fig. 9: Closed-loop effects against estimated frequency responses from motor input to motor angular velocity. Left: 1st link, where 2nd link is free or closed-loop controlled. Right: 2nd link, where 1st link is free or closed-loop controlled.

ラの適用 - , 日本ロボット学会誌, 12-3, 466/471 (1994)

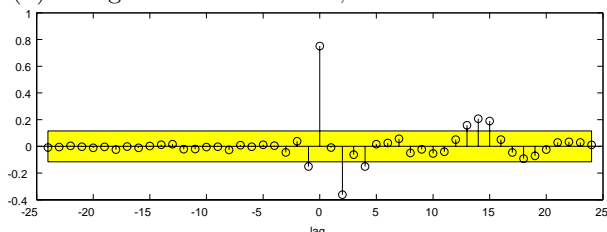
2) 小坂, 島田: モータと減速機を考慮したロボットマニピュレータ制御, 計測自動制御学会論文集, 41-5,



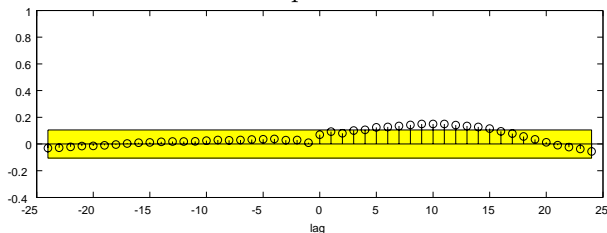
(a) Using “pem” command, where 1st link is free.



(b) Using “n4sid” command, where 1st link is free.



(c) Using “pem” command, where 1st link is closed-loop controlled.



(d) Using “n4sid” command, where 1st link is closed-loop controlled.

Fig. 10: Cross-correlation functions between motor-input and residuals from motor-angular-velocity for 2nd link, using “pem” or “n4sid” command, where 1st link is free or closed-loop controlled.

466/472 (2005)

- 3) M.C.Readman:Flexible Joint Robots,CRC Press(1994)
- 4) H.Mayeda, K.Osuka and A.Kangawa: “A New Identification Method for Serial Manipulator Arm,” Proc. 9th IFAC World Congress, 2429/2434 (1984)
- 5) 大明, 足立: シリアル 2 リンク 2 慣性系の非干渉化同定と物理パラメータ推定, 電気学会論文誌 D, 128-5, 669/677 (2008)
- 6) 足立修一: MATLAB による制御のための上級システム同定, 300/304, 東京電機大学出版局 (2004)
- 7) 計測自動制御学会編: ロボット制御の実際, 62/80, コロナ社 (1997)
- 8) L.Ljung: System Identification Toolbox For Use with MATLAB (Version 7.0), The MathWorks (2007)
- 9) 大明, 足立: 産業用ロボットのデジタルサーボチューニングシステム, 日本ロボット学会誌, 9-1, 55/64 (1991)
- 10) 松日楽, 大明: わかりやすいロボットシステム入門 - メカニズムから制御まで -, 84/85, オーム社 (1999)
- 11) The MathWorks: Optimization Toolbox For Use with MATLAB (Version 3.1.1), The MathWorks (2007)