シリアル2リンク2慣性系の同定と状態フィードバック制御

大明 準治 ((株) 東芝 研究開発センター) 足立 修一 (慶應義塾大学)

Identification and State Feedback Control of Serial Two-link-two-inertia System

*Junji OAKI (Toshiba Corporate R & D Center) and Shuichi ADACHI (Keio University)

Abstract— In this paper, we propose an identification method for a SCARA-type planer two link robot arm with elastic reduction gears, which is treated as a serial two-link-two-inertia system. In the identification method, we utilize not only motor encoders, but also rate gyros and accelerometers on each link of the arm. The identification method consists of three steps. The first step is the rigid model identification using a well-known procedure. The second is the elastic model identification using a multi-input multi-output state space model technique in which the interaction forces between two links are decoupled. The third is the physical parameter identification using the state space model. We also show experimental results of full state feedback control schemes including low pass filters designed by using the identified model parameters.

Key Words: Robot arm, Rate gyro, Accelerometer, Mechanical resonance, Elastic joint, Harmonic drive

1 はじめに

精密組立やマテリアルハンドリングなどで用いられ る産業用 SCARA (スカラ)型ロボットは,水平旋回 する第1,2 関節の減速機の弾性に起因した振動を抑 制しながら高速・高精度に動作することが要求される. 従来のモーションコントロールにおける振動抑制は,2 (多)慣性系の制御問題として扱われてきた.その基本 的な考え方は1入出力系+外乱抑制制御であり,スカ ラ型ロボットのようにシリアルに2慣性系が連なった 非線形の多入出力連成振動系には効果的な制御方法と は言えなかった.

弾性関節を持つロボットに対して効果的と考えられ る例としては,西田ら¹⁾や島田ら^{2,3)}による,各軸を 駆動するモータに内蔵されたエンコーダだけの情報を 用いた状態空間表現での外乱オブザーバベースの巧妙 な制御方法が挙げられる.これらは現状のセミクロー ズドループ制御方式のスカラ型ロボットに適用でき魅 力的ではあるが,制御系の実装は複雑であり,関節弾 性まで考慮に入れたモデル化のための物理パラメータ 同定も容易ではない.また,ロボットのダイナミクス を遅い剛体モードと速い振動モードに分けて考える特 異摂動法に基づくアプローチ^{4,5)}についても同様な問 題を抱えている.

本稿では,モータ内蔵エンコーダに加えて,近年入 手容易になったレートジャイロや加速度センサをスカ ラ型ロボットの各リンクに搭載することを前提として, シリアル2リンク2慣性系の干渉構造を利用した多入 出力状態空間同定法を提案し,水平旋回型2リンクアー ムの実機で検証する.提案法では,第1関節と第2関 節を非干渉化し,2つの1リンク2慣性系の同定問題に 帰着させているところがポイントである.さらに,こ の同定結果を用いて,シリアル2リンク2慣性系の運 動方程式モデル(8次)をシミュレーションするのに便 利なように、各関節の慣性や摩擦、バネ定数を求める 方法にも言及する.これは,弾性関節を持つロボット の時系列データから剛体モデルの物理パラメータだけ でなく,弾性モデルの物理パラメータまで同定しよう という試みであるが,従来,ほとんど手がつけられて いなかった研究課題である.

リンク搭載センサを利用すれば,シリアル2リンク 2慣性系モデルの範囲では,全状態フィードバック制御 が可能になる.しかし,リンク搭載センサが検出する 高次成分に起因するスピルオーバが問題となる.そこ で本稿では,簡易なロバスト制御方法であるローパス フィルタ包含型状態フィードバック制御則について検 討する.最後に,状態フィードバックを用いてロボッ トを軌道制御する際に偏差を少なくするために必要な リンク角速度目標値軌道を,時間区分多項式ベースで 生成したモータ角速度目標値軌道から変換するための 目標値フィルタの同定についても述べる.

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.各関節を駆動するDCモータ(第1軸500 W, 第2軸300 W)は各リンク上に配置され,バネ要素とし 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(平行リンクを用いてない) スカラ型ロボットの第1,2関節を模擬しており,1リ ンク2慣性系が直列に2つ配置されているので,シリ アル2リンク2慣性系と呼ぶことにする.第1,2関節 の駆動系は全く同じ構造をしているが,第2関節は並 進運動をするので,並進運動しない第1関節とは異な る複雑な振動特性を示すのが特徴である.



Fig. 1: Planer two link arm with elastic joints

各モータには,モータ回転角度を計測するエンコー ダ(4逓倍で 8192pulse/rot)が内蔵されており,各リ ンク上には,回転角速度を計測するレートジャイロ(帯 域10Hzか50Hzの2種類)と並進加速度を計測する加 速度センサ(帯域100Hzか300Hzの2種類)が搭載さ れている.これらのセンサ信号から,リンク毎の回転 角速度と回転角加速度は直接得られないが,座標変換 を用いて算出することができる.

ここで、モータ内蔵エンコーダだけを用いたセミク ローズドループで制御されているスカラロボットに、こ れらのセンサを付加することには、コストやメンテナ ンスの問題が生じる.しかし、近年入手容易になったこ と、CPUが高速になったことなどから、PID 制御より 性能向上が見込める全状態フィードバック制御を実現 できるメリットの方が大きくなってきたと考えられる. また、脱着容易であるから、物理パラメータ同定時だ けでも使用すれば、精度良いシミュレーションモデル や状態オプザーバを構成できる.世界を見渡すと、減 速機の出力軸にエンコーダやトルクセンサを組み込ん で全状態フィードバックできるように設計された多関

さて,リンク角加速度フィードバック^{4,7)}には,慣 性モーメントを変化させる効果があるが,自由に極配 置はできず,振動減衰特性を決めるのはリンク角速度 フィードバックである⁸⁾.本システムでは,レートジャ イロによるリンク角速度のフィードバックが可能であ る.ロボットアームにレートジャイロを搭載した例は 見あたらないが,計測できる周波数帯域が広くないた め,加速度センサとの融合による広帯域化を図る.ま た,リンク角速度・角加速度は,同定時や制御時のリ ンク間の非線形干渉力の補償にも活用できる.

3 シリアル2リンク2慣性系の運動方程式 シリアル2リンク2慣性系の運動方程式^{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.

$$M_M \ddot{\boldsymbol{\theta}}_M + \boldsymbol{D}_M \dot{\boldsymbol{\theta}}_M + \boldsymbol{f}_M \operatorname{sgn}(\dot{\boldsymbol{\theta}}_M) = \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{N}_G [\boldsymbol{K}_G (\boldsymbol{N}_G \boldsymbol{\theta}_M - \boldsymbol{\theta}_L) + \boldsymbol{D}_G (\boldsymbol{N}_G \dot{\boldsymbol{\theta}}_M - \dot{\boldsymbol{\theta}}_L)]$$
(1)

$$\begin{split} \boldsymbol{M}_{L}(\boldsymbol{\theta}_{L}) \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{L} + \boldsymbol{c}_{L}(\dot{\boldsymbol{\theta}}_{L}, \boldsymbol{\theta}_{L}) + \boldsymbol{D}_{L} \dot{\boldsymbol{\theta}}_{L} \\ &= \boldsymbol{K}_{G}(\boldsymbol{N}_{G}\boldsymbol{\theta}_{M} - \boldsymbol{\theta}_{L}) + \boldsymbol{D}_{G}(\boldsymbol{N}_{G}\dot{\boldsymbol{\theta}}_{M} - \dot{\boldsymbol{\theta}}_{L}) \end{split}$$
(2)
ただし,

$$m{ heta}_{M} = [m{ heta}_{M1}, \ m{ heta}_{M2}]^{T}$$
: モータ回転角度(1,2は関節番号)
 $m{ heta}_{L} = [m{ heta}_{L1}, \ m{ heta}_{L2}]^{T}$: リンク回転角度
 $m{M}_{L}(m{ heta}_{L}) \in R^{2 \times 2}$: リンク慣性行列
 $m{c}_{L}(m{ heta}_{L}, m{ heta}_{L}) \in R^{2 \times 1}$: 遠心力・コリオリカベクトル
 $m{M}_{M} = ext{diag}(m_{M1}, \ m_{M2})$: モータ+減速機高速段慣性
 $m{D}_{M} = ext{diag}(d_{M1}, \ d_{M2})$: モータ+減速機高速段慣性
 $m{D}_{L} = ext{diag}(d_{L1}, \ d_{L2})$: リンク軸粘性摩擦係数
 $m{D}_{L} = ext{diag}(d_{L1}, \ d_{L2})$: リンク軸粘性摩擦件数
 $m{K}_{G} = ext{diag}(k_{G1}, \ k_{G2})$: 減速機バネ定数
 $m{D}_{G} = ext{diag}(d_{G1}, \ d_{G2})$: 減速機(n_{G1}, n_{G2} \le 1)
 $m{f}_{M} = [f_{M1}, \ f_{M2}]^{T}$: モータ軸クーロン動摩擦(不感帯)
 $m{ au} = [m{ heta}_{L}, \ m{ heta}_{L2}]^{T}$: モータトルク(電流)指令

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⁹⁾ とすると, リンク 慣性行列は次式のように表される.

$$\boldsymbol{M}_{L}(\boldsymbol{\theta}_{L}) = \begin{bmatrix} \alpha + \beta + 2\gamma \cos(\theta_{L2}) & \beta + \gamma \cos(\theta_{L2}) \\ \beta + \gamma \cos(\theta_{L2}) & \beta \end{bmatrix}$$
(3)

また,遠心力・コリオリカベクトルは次式のようになる.

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

なお,関節のねじれは微小なので, $\cos(\theta_{L2})$ や $\sin(\theta_{L2})$ では, $\theta_{L2} = n_{G2}\theta_{M2}$ と置き換えて計算可能である.

さて,式(1),(2)に現れる物理パラメータを同定す るのが本稿の目的だが,提案する方法では,あらかじ め β,γ を同定しておく必要がある.それには,式(1), (2)で $\theta_M = N_G \theta_L$ と置いた剛体モデル

$$M(\boldsymbol{\theta}_L)\dot{\boldsymbol{\theta}}_L + \boldsymbol{c}_L(\dot{\boldsymbol{\theta}}_L, \boldsymbol{\theta}_L) + \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{\theta}}_L \\ + \boldsymbol{f}_M \operatorname{sgn}(\dot{\boldsymbol{\theta}}_M) / \boldsymbol{N}_G = \boldsymbol{\tau} / \boldsymbol{N}_G \qquad (5)$$

における物理パラメータ同定⁹⁾ を経由する必要がある. ここで, $M(\theta_L)$,Dは,式(6),(7) で表される剛体モデルとしての慣性行列と粘性摩擦係数行列である.

$$\begin{aligned}
 M(\theta_L) &= \\
 \begin{bmatrix}
 \alpha + \beta + 2\gamma \cos(\theta_{L2}) + m_{M1}/n_{G1}^2 & \beta + \gamma \cos(\theta_{L2}) \\
 \beta + \gamma \cos(\theta_{L2}) & \beta + m_{M2}/n_{G2}^2
 \end{bmatrix} \\
 (6)
 D &= \text{diag}(d_{L1} + d_{M1}/n_{G1}^2, \ d_{L2} + d_{M2}/n_{G2}^2)
 (7)
 \end{aligned}$$

なお,以上では小坂ら²⁾によって指摘されている第 2軸のモータロータの並進運動成分については,影響 は小さいと見なし含めなかった.

4 リンク搭載センサ融合の信号処理

第1,2リンク上のレートジャイロ信号を ω₁,ω₂ と すると,各リンクの回転角速度は,

$$\theta_{L1} = \omega_1 \tag{8}$$

$$\theta_{L2} = \omega_2 - \omega_1 \tag{9}$$

より算出できる.

また,第1,2リンク上の加速度センサ信号を *a*₁,*a*₂ とし,各関節軸からの加速度センサの取付距離を *d*₁, *d*₂とすると,各リンクの回転角加速度は,

$$\ddot{\theta}_{L1} = \frac{a_1}{d_1}$$
(10)
$$\ddot{\theta}_{L2} = \frac{a_2}{d_2} - \frac{a_1}{d_1} - \frac{a_1}{d_2} \cos(n_{G2}\theta_{M2})$$
$$- \frac{d_1}{d_2}\dot{\theta}_{L1}^2 \sin(n_{G2}\theta_{M2})$$
(11)

より算出できる¹⁰⁾.

今回使用するレートジャイロの帯域は,既に述べたように10Hzか50Hzであり,数10Hzの帯域に機械共振を持つ本システムの2リンクアームには帯域不足で

ある.そこで,ローパスフィルタ $G_L(s)$ に通したレートジャイロ信号とハイパスフィルタ $G_H(s) = 1 - G_L(s)$ に通した加速度センサ信号の積分とを融合することにした.簡単のためフィルタの次数は1次とし,カットオフ時定数を T_V とすると,

$$\dot{\theta}_{Li(\text{wide})} = \frac{1}{1 + T_V s} \cdot \dot{\theta}_{Li} + \frac{T_V s}{1 + T_V s} \cdot \frac{\dot{\theta}_{Li}}{s}$$
$$= \frac{1}{1 + T_V s} (\dot{\theta}_{Li} + T_V \ddot{\theta}_{Li}) \quad (i = 1, 2) \quad (12)$$

のように広帯域化されたリンク角速度を算出できる.

同様な方法で,低周波数帯域では減速機が剛体であると近似すれば,リンク回転角度も推定することができる.式(12)で求めた $\dot{\theta}_{Li}$ (wide)を改めて $\dot{\theta}_{Li}$ とおき,1次フィルタのカットオフ時定数を T_P とすると,モータエンコーダ信号を利用することにより,

$$\theta_{Li} \approx \frac{1}{1 + T_P s} \cdot n_{G1} \theta_{Mi} + \frac{T_P s}{1 + T_P s} \cdot \frac{\dot{\theta}_{Li}}{s}$$
$$= \frac{1}{1 + T_P s} (n_{Gi} \theta_{Mi} + T_F \dot{\theta}_{Li}) \quad (i = 1, 2) \quad (13)$$

のように推定することができる.

5 シリアル2リンク2慣性系の同定と制御
 5.1 同定方法

提案する同定法は,剛体モデルの物理パラメータの 同定,1リンク毎の多入出力状態空間モデルの同定,1 入出力伝達関数を経由した弾性モデルの物理パラメー タの同定の3ステップからなる.

5.1.1 剛体モデルの物理パラメータの同定

式 (5) に現れる剛体モデルの物理パラメータは,線 形に括り出すことができるため,各リンクに適当な動 作をさせたときのデータに最小2乗法を適用すること によって,同定することができる⁹⁾.このモデルの範 囲でリンク間の干渉力(慣性力の非対角要素)を与え る β, γ を同定できることがポイントとなる.

5.1.2 1リンク毎の多入出力状態空間モデルの同定

式(1),(2)式において線形と見なせる範囲でアーム を動作させたときのデータから,多入出力状態空間モ デルを得ることは可能である.しかし,このモデルの 係数には各リンクの減速機バネ定数などが積の形で入 り込んでおり,弾性モデルの物理パラメータまで同定 することは困難である.

そこで本稿では,観測可能なリンク間の干渉力を同 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.まず,式 (1),(2)の第1リンク(各1行目)に着目すると,既 知の非線形の干渉力項を括り出せて,

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ (\beta + \gamma \cos(\theta_{L2}))\ddot{\theta}_{L2} \\ -\gamma(2\dot{\theta}_{L1}\dot{\theta}_{L2} + \dot{\theta}_{L2}^2)\sin(\theta_{L2}) \end{bmatrix}$$
(14)

$$\boldsymbol{y} = [\dot{\theta}_{M1} \ \dot{\theta}_{L1}]^T = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x} \tag{15}$$

のような3入力2出力8状態変数の線形状態方程式が 得られ,同定することができる.ただし,同定時の動 作範囲では,(3)式の(1,1)要素は一定と見なせると仮 定した.また,角速度 角度の構造的な積分器を1つ 除いて同定するために式(15)の速度出力をとることに したので,実際に関係するのは6状態になる.同様に 式(1),(2)の各2行目に着目すると,第2リンクにつ いての状態方程式も導け,同定することができる.

5.1.3 弾性モデルの物理パラメータの同定

同定された (14), (15) 式の1行目から,

$$\theta_{M1}(s) = G_{11}(s) \cdot \tau_1 + G_{12}(s) \cdot (\beta + \gamma \cos(\theta_{L2}))\theta_{L2} - G_{13}(s) \cdot \gamma(2\dot{\theta}_{L1}\dot{\theta}_{L2} + \dot{\theta}_{L2}^2)\sin(\theta_{L2}) \quad (16)$$

が得られる.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)である.弾性モデルの物 理パラメータの係数への入り方は次の通りである¹¹.

$$G_{11}(s) = \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}$$
(17)

ただし,

$$\begin{aligned} a_0 &= d_{M1} + n_{G1}^2 d_{L1} \\ a_1 &= m_{M1} + n_{G1}^2 m_{L1} \\ &+ (n_{G1}^2 d_{G1} d_{L1} + d_{M1} d_{L1} + d_{M1} d_{G1}) / k_{G1} \\ a_2 &= (m_{M1} d_{L1} + m_{M1} d_{G1} \\ &+ m_{L1} d_{M1} + n_{G1}^2 m_{L1} d_{G1}) / k_{G1} \end{aligned}$$

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

$$b_0 = 1$$

$$b_1 = (d_{L1} + d_{G1}) / k_{G1}$$

$$b_2 = m_{L1}/k_{G1}$$

また,式(3)の(1,1)要素について $m_{L1} = \alpha + \beta + 2\gamma$ とおいた. $k_{G1} \rightarrow \infty$ のとき,この伝達関数は1次遅れ(剛体モデル)になる.同定された式(17)の各係数に関する式と未知パラメータの数は共に6と等しいので,弾性モデルの物理パラメータを同定できる.ただし,実際には(14),(15)式の2行目(リンク角速度出力の伝達関数 $G_{21}(s)$ は1/3次)なども含めてさまざまな条件で伝達関数を同定して多数の係数データを用意し,各パラメータを正とする拘束条件を与えて最小2乗法で求める.第2リンクについても同様である.

5.2 同定実験と考察

Fig. 1のアームに対し,第1軸に開ループでM系列 を入力,第2軸はフリー状態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 で周期 1023 で発生させたものを 2回連 続させた.つまり,同定時間は 2.046 秒である.同定 周波数は 100Hz 程度と考え,入出力データのデシメー ションの次数は d = 8,つまり同定のサンプル時間は 2ms とした.レートジャイロは 50Hz,加速度センサは 100Hz の帯域のもの,両センサ融合のためのローパス フィルタのカットオフ周波数は 5Hz とした.Fig. 2に デシメーション前後のM系列入力の最初の 0.3 秒分を 示す.Fig. 3に第2リンクの角加速度データ,Fig. 4に 第1軸のモータとリンクの角速度データを示す.Fig. 5 の上は,第1リンクの動作角度,下は第2リンクの動



Fig. 2: M sequence input and its decimated data for 1st link identification (First 0.3s of 2.046s)

作角度の cos をとったものである.これらの応答波形 から,式 (14) における第3の入力である速度2乗項は 無視できることが確認できたので,結局,2入力2出 力6状態の同定を行うことにした.同定アルゴリズム には,MATLABTMの予測誤差法コマンド pem¹²⁾を 次数3を指定して用い,得られたものを連続系に変換 した.pem では,部分空間法 (n4sid) による初期化後, 予測誤差の最適化に基づいて状態空間モデルが計算さ れる.Fig.6に同定結果の周波数応答を示す. θ_{M1} 出 力では2/3次, θ_{L1} 出力では1/3次の伝達関数が正し く同定されていることがわかる.

同様にして,第2軸に開ループでM系列を入力,第 1軸はフリー状態として同定実験を行った.Fig.7に 同定結果の周波数応答を示す.第1軸と同様に正しく 同定されていることがわかる.

以上で得られた伝達関数から弾性モデルの物理パラ メータを同定し,式(1),(2)に基づいてSIMULINKTM でシリアル2リンク2慣性系のシミュレータを構築し た.モータ内蔵エンコーダだけを使った従来のPIDベー スの制御系¹³⁾を用いた実機の時間応答をシミュレー タと比較する.Fig.11は,第1軸の位置制御ループ を切ったときの速度ループFF-I-P制御のステップ応答 の比較である.第2軸は位置サーボロック状態である. グラフ左の実機応答の方が,やや減衰が悪いが,モー タ角速度,リンク角速度,モータ入力とも,右側のシ ミュレーション応答と良く合っている.

参考のため,同じデータを1入力2出力で同定した 場合の結果を第1,2軸それぞれFig.9,10に示す. pemの同定次数は10次である(自動選択).第1軸の 周波数応答はFig.6をなまらした程度だが,第2軸は Fig.7とは大きく異なることがわかる.本稿で提案し た多入力を用いた同定方法では,リンク間の非干渉化 によってこの現象を補償することができた.

5.3 全状態フィードバック制御実験

本システムでは,モータ回転角(エンコーダ),モー タ回転角速度(エンコーダの近似微分),リンク回転角 (式(13)),リンク回転角速度(式(12))が観測できる ので,シリアル2リンク2慣性系モデルの範囲では,全 状態フィードバック制御が可能になる.また,リンク間



Fig. 3: 2nd link acceleration data for 1st link identification



Fig. 4: Motor and link velocity data for 1st link identification

の非線形干渉力も,観測したリンク角加速度とリンク 角速度と β,γ を用いて補償できることになる.しかし, リンク搭載センサが検出する高次成分に起因するスピ ルオーバが問題となる.そこで,簡易なロバスト制御 方法であるローパスフィルタ包含型状態フィードバック 制御則¹⁴⁾を実装した.前節までで同定された3次のモ デルに2次のローパスフィルタと1型サーボ系にする ための積分器を直列に接続した6次のシステムに対し, 振動系に実績のある折返し法¹⁵⁾に基づく極配置によっ て状態フィードバック則を求め,速度ステップ応答制 御実験を第1軸について行ったのが,Fig.11である.



Fig. 5: 1st link angle and cosine of 2nd link angle data during 1st link identification



制御周期は,0.25ms である.同図の左側が状態フィー ドバックのみ,右側がフィルタ包含型状態フィードバッ クである.両者とも振動が抑制されているが,後者は フィルタが効いて制御入力の高周波成分が少ないこと がわかる.なお,この実験ではリンク間の非線形干渉 力は補償していない.

5.4 軌道追従制御のための目標値フィルタの同定

状態フィードバックを伴う軌道追従制御では,モータ 角速度目標値軌道だけでなく,追従偏差を生じさせな いようにリンク角速度目標値軌道も必要となる³⁾.そ こで,時間区分多項式ベースで生成された前者から後 者へ変換するための目標値フィルタ(第1軸 $G_{R1}(s)$, 第2軸 $G_{R2}(s)$)を用意する.式(14),(15)から同定し た $\dot{\theta}_{M1}$ 出力の伝達関数 $G_{11}(s)$ (2/3次)と $\dot{\theta}_{L1}$ 出力の 伝達関数 $G_{21}(s)$ (1/3次)を用いて,

$$G_{R1}(s) = G_{21}(s)/G_{11}(s) \tag{18}$$

の1/2次の伝達関数として得られる($G_{R2}(s)$ も同様).

6 おわりに

多入出力状態空間モデル同定法を応用したシリアル 2リンク2慣性系の物理パラメータ同定法を提案し,2 リンクアーム実機に適用して有効性を確認した.今後 は,弾性モデルの物理パラメータの同定精度向上と閉 ループ同定¹⁶⁾への拡張,リンク間の干渉力を補償し



Fig. 7: Identified frequency responses (2nd link)



Fig. 8: Velocity step responses comparison (1st link) Left: Real arm, Right: Simulation

た状態フィードバック制御実験,目標値フィルタを実 装した軌道追従制御実験などを行っていく予定である. 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 由度コントローラの適用-日本ロボット学会誌,12-3, 466/471(1994)
- 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,



Fig. 9: Identified frequency responses (1st link) Single input case

466/472(2005)

- 3) 島田, 篠原:弾性関節を有するマニピュレータのマルチ レート完全追従制御,計測自動制御学会論文集, 42-2, 139/146(2006)
- 4) M.C.Readman: Flexible Joint Robots, CRC Press (1994)
- C.C.de Wit, B.Siciliano and G.Bastin (Eds): Theory of Robot Control, 179/217, Springer (1996)
- 6) G.Hirzinger, N.Sporer, A.Albu-Schäffer, M.Hähnle, R.Krenn, A.Pascucci and M.Schedl: DLR's torquecontrolled light weight robot III – are we reaching the technological limits now ?, Proc. 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1710/1716(2002)
- 7) 古荘, 成瀬, 佐野, 大脇:加速度情報を用いたロボット アームの制御(駆動系の弾性を考慮した解析および実験), 日本機械学会論文集(C編), 57-538, 1944/1951(1991)
- 8) 武据,古荘,岩越:二慣性系の慣性比と振動制御に関す る一考察-駆動伝達リプルの振動抑制効果-,電気学会 論文誌 D, 123-2, 149/155(2003)
- 9) 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)
- 10) 美多,大須賀:ロボット制御工学入門,238/239,コロナ 社 (1989)
- 11) 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)
- 12) L.Ljung: System Identification Toolbox For Use with MATLAB (Version 6.2), The MathWorks(2006)



Fig. 10: Identified frequency responses (2nd link) Single input case



Fig. 11: Velocity step responses comparison (1st link) Left: State feedback, Right: State feedback with filter

- 13) 大明,足立:産業用ロボットのディ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)
- 14) 背戸一登:構造物の振動制御, 112/115, コロナ社 (2006)
- 15) 森 泰親:演習で学ぶ現代制御理論, 108/123, コロナ社 (2003)
- 16) 足立修一: MATLAB による制御のための上級システム
 同定, 216/251, 東京電機大学出版局 (2003)