

物理パラメータ推定に基づく シリアル2リンク2慣性系の非干渉化オブザーバ

大明準治（慶應義塾大学 / 東芝） 足立修一（慶應義塾大学）

Decoupling Observer of Serial Two-link Two-inertia System based on Physical Parameter Estimation

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

Abstract— In this paper, we propose a multivariable state observer called “decoupling observer” for a SCARA-type planer two-link robot arm with elastic reduction gears, which is treated as a serial two-link-two-inertia system. We have already proposed the accurate estimation method for the physical parameters of the two-link arm. The decoupling observer is designed by using the physical parameters that include motor inertias, link inertias, joint-friction coefficients and joint-spring coefficients. The decoupling observer consists of two linear state observers and some calculations of the nonlinear coupling forces between the two links. The off-line estimates using the data of the two-link arm have shown the advantages of the proposed decoupling observer compared with the conventional disturbance observer.

Key Words: Multivariable state observer, Identification, Robot arm, Elastic joint, Mechanical resonance

1 はじめに

マテハンや組立作業などで多用されるスカラ型ロボットは、近年ますます高加減速・高速化され、水平旋回する第1,2軸の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。従来の振動抑制は、主に2慣性系の制御問題として扱われており、その基本的な考え方は1入出力系+外乱抑制制御にある。そのため、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必ずしも効果的な制御方法とは言えなかった。

著者らは、このような非線形多入出力連成振動系に対して動力学モデルベース制御を指向している。その最初の段階として、シリアル2リンク2慣性系の非干渉化同定に基づく物理パラメータ推定法を提案し、水平旋回型2リンクアームの実機で有効性を確認した[1]。次の段階として、物理パラメータに基づく状態フィードバック制御を検討する。先の非干渉化同定法では、各リンクに搭載した加速度センサの利用を前提としていた。しかし制御においては、コスト制約を考慮してモータ内蔵エンコーダだけが利用できることと仮定する。これより、非線形多入出力連成振動系においてモータ側からリンク側の状態推定をする困難な問題となる。しかし、物理パラメータが精度良く推定されているので、希望の状態変数が得られるように変換を行ったり、必要に応じて非線形計算やゲインスケジューリングを取り入れるなど、柔軟に制御系を構成することが可能である。

さて、この状態推定問題に対しては、各リンク毎の2慣性系の状態空間モデルに外乱項（時間微分=0）を状態変数に付加した外乱オブザーバを構成しておき、リンク側の目標値に基づく動力学演算を併用して性能向上を図った方法が提案されている[2, 3]。これらの方法は、外乱推定機構+リンク角目標値フィードフォワードによってリンク間の非線形干渉力を吸収しながら、リンク側の状態推定を行うことをねらっており、フレキシブルアームの制御で多用される特異摂動法[4]に比べて理解しやすい。しかし、産業用ロボットのサーボ

系はモータ角目標値を基本に構成されている上、モータ角目標値と矛盾しないリンク角目標値を生成するのは理想的には困難である。リンク角については、状態フィードバックにとどめておくのが実用的であろう。

本稿では、シリアル2リンク2慣性系において、他リンクからの非線形干渉力を取り込んで多入力とした非干渉化オブザーバを提案する。先に提案した非干渉化同定法と同様な考えに基づいているが、非線形干渉力の計算に必要な他リンクの状態変数を加速度センサから得るのではなく、他リンクのオブザーバから取り出していることに特徴がある。リンク角の目標値も使用していない。以下では、本稿で対象とするシステムと提案する非干渉化オブザーバについて述べた後、水平旋回型2リンクアームの実機データを用いたオフライン推定で有効性を検証した結果を示す。

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0.325m）である。各軸を駆動するDCモータ（第1軸500W、第2軸300W）は各リンク上に配置され、バネ要素とし

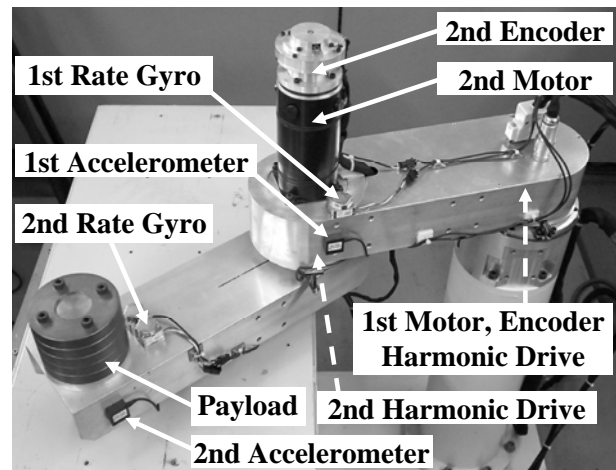


Fig. 1: Planar two-link arm with elastic joints.

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、スカラ型ロボットの第 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 [1]。

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によって, リンク毎の回転角速度を得る [1]。リンク角加速度・角速度は, モータ角度だけを用いたオブザーバのリンク状態変数の推定精度評価に用いる。なお, アーム制御には, 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 [2, 3] 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。

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

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

ただし,

$\theta_M = [\theta_{M1}, \theta_{M2}]^T$: モータ回転角度 (1, 2 は軸番号)

$\theta_L = [\theta_{L1}, \theta_{L2}]^T$: リンク回転角度

$M_L(\theta_L) \in R^{2 \times 2}$: リンク慣性行列

$c_L(\dot{\theta}_L, \theta_L) \in R^{2 \times 1}$: 遠心力・コリオリカベクトル

$M_M = \operatorname{diag}(m_{M1}, m_{M2})$: モータ + 減速機高速段慣性

$D_M = \operatorname{diag}(d_{M1}, d_{M2})$: モータ軸粘性摩擦係数

$D_L = \operatorname{diag}(d_{L1}, d_{L2})$: リンク軸粘性摩擦係数

$K_G = \operatorname{diag}(k_{G1}, k_{G2})$: 減速機バネ係数

$D_G = \operatorname{diag}(d_{G1}, d_{G2})$: 減速機減衰係数

$N_G = \operatorname{diag}(n_{G1}, n_{G2})$: 減速比 ($n_{G1}, n_{G2} \leq 1$)

$f_M = [f_{M1}, f_{M2}]^T$: モータ軸クーロン動摩擦トルク

$E = \operatorname{diag}(e_1, e_2)$: トルク/電圧 (電流指令値) 定数

$u = [u_1, u_2]^T$: 入力電圧 (モータ電流制御系への指令値)

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 [5] 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。

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, 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。

4 非干渉化オブザーバの構成方法と実験結果

4.1 1 リンク毎の多入出力状態空間モデル

式 (1), (2) の各 1 行目の第 1 軸の入出力に着目し, 第 2 軸からの非線形干渉力を τ_1 とおいて括り出すと,

$$\dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ \tau_1 \end{bmatrix}, \quad A_1 \in R^{4 \times 4}, \quad B_1 \in R^{4 \times 2} \quad (5)$$

$$y_1 = C_1 x_1, \quad C_1 \in R^{2 \times 4} \quad (6)$$

$$x_1 \equiv [\theta_{M1}, \theta_{L1}, \dot{\theta}_{M1}, \dot{\theta}_{L1}]^T \quad (7)$$

$$y_1 \equiv [\dot{\theta}_{M1}, \dot{\theta}_{L1}]^T \quad (8)$$

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

の 2 入力 2 出力 4 状態変数の線形状態方程式を導ける (行列の要素は付録参照)。この式は, 2 入力 2 出力の部分空間法で同定でき, 伝達関数を経由した係数比較によって物理パラメータを推定できる [1]。第 2 軸についても同様で, 式 (1), (2) の各 2 行目の入出力に着目すると, 式 (5), (6) において添え字を 2 とした式が成り立つ。第 1 軸からの非線形干渉力 τ_2 は,

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

で表される。

4.2 非干渉化オブザーバの構成方法

モータ角からリンク角の状態を推定するオブザーバを構成する。ここで, モータ角を基本とするサーボ系に対してオブザーバに基づく状態フィードバックをプラグイン可能にするためには, 式 (7) に現れるリンク角そのものではなく, 定常状態で 0 になる軸ねじれ角 (モータ角とリンク角の差) $\Delta\theta = [\Delta\theta_1, \Delta\theta_2]^T$ を推定した方が都合が良い。また, 提案する手法ではリンク角加速度推定値を取り出す必要があり, 動特性モデルと構造が等価な同次元オブザーバを採用する。このオブザーバの次元低減化のため, エンコーダを差分したモータ角速度 $\dot{\theta}_M$ を用いて軸ねじれ角・軸ねじれ角速度・モータ角速度を推定し, モータ角度は推定しない。さらに, 第 1 リンクへの外乱項 ξ_{L1} ($\dot{\xi}_{L1} = 0$) を状態変数に付加し, 非線形干渉力 τ_1 も考慮すると, 式 (5)–(8) から次のような 2 入力 1 出力 4 状態変数の線形状態方程式が導かれる。

$$\dot{z}_1 = A_{z1} z_1 + B_{z1} \begin{bmatrix} u_1 \\ \tau_1 \end{bmatrix}, \quad A_{z1} \in R^{4 \times 4}, \quad B_{z1} \in R^{4 \times 2} \quad (11)$$

$$w_1 = c_{z1} z_1, \quad c_{z1} \in R^{1 \times 4} \quad (12)$$

$$z_1 \equiv [\Delta\theta_1, \Delta\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_{M1}, \xi_{L1}]^T \quad (13)$$

$$\Delta\theta_1 \equiv \theta_{M1} - n_{G1}\theta_{L1} \quad (14)$$

$$w_1 \equiv \dot{\theta}_{M1} \quad (15)$$

物理パラメータが推定されていると、このような状態変数変換が容易に行える。式(11)–(15)に対して、同一次元オブザーバを構成する。ここで推定された外乱項は、パラメータ誤差やモデル誤差があっても正確に状態推定を行えるような「ゴミため」機能のためにあり、状態フィードバックには使わない[3]。以上では第1軸について説明したが、第2軸についても同様である。

本稿で提案する非干渉化オブザーバの構成を Fig. 2 に示す。先に提案した非干渉化同定法[1]と同様に、他リンクからの非線形干渉力 τ_1, τ_2 を取り込んで2入力としたところに特徴がある。非干渉化オブザーバの場合、非線形干渉力を計算するのに必要な他リンクの角加速度などの状態変数を加速度センサから得るのではなく、他リンクのオブザーバから取り出しているところが非干渉化同定の場合と異なっている。

2入力とすることによって、第1,2軸のオブザーバの非干渉化は達成されるが、式(3)の(1,1)要素は変動するので、第1軸のオブザーバについては、ゲインスケジューリングするのが理想的である。後述する推定結果では、この変動は小さいので線形時不変としている。

非干渉化オブザーバの評価のため、入力数や外乱推定の有無による6通りのオブザーバを用意する。

- (1) 1入力オブザーバ(同一次元・以下同じ)
 - (2) 1入力外乱推定オブザーバ
 - (3) 2入力オブザーバ(加速度センサ使用)
 - (4) 2入力外乱推定オブザーバ(加速度センサ使用)
 - (5) 2入力オブザーバ(加速度オブザーバ使用)
 - (6) 2入力外乱推定オブザーバ(加速度オブザーバ使用)
- ここで、(3), (4)は加速度センサを使用した非干渉化オブザーバ、(5), (6)が提案の非干渉化オブザーバである。

4.3 実機データに基づくオフライン推定結果と考察

従来のPID制御ベース[6]で速度制御された2リンクアーム実機データを用いてオフライン推定を行った。オブザーバの設計は、折返し法[7]の考え方に基づく極指定を用いた。折返し線の位置は、虚軸に近い振動極が減衰率が0.7程度に折り返されるように設定した。このオブザーバでは軸ねじれ角速度が推定されるので、以下に示すグラフではリンク角速度に直して示している。

Fig. 3は、速度制御された第1リンクのステップ応答と(第2リンクのステップ応答時の)外乱応答に対する1入力オブザーバのリンク角速度の推定結果(破線)を実データ(実線)と比較したものである。この場合、第2軸の動作範囲は0.2rad程度であり、線形時不変と仮定できる。同図の(a)が1入力オブザーバ、(b)が1入力外乱オブザーバである。ステップ応答は両者で大きな差異はないが、外乱オブザーバの方がやや高周波成分が多い。物理パラメータの推定精度が良いので、外乱項がない方が良い応答である。一方、外乱応答では外乱オブザーバの方が再現性は良い。しかし、これでは不十分である。

Fig. 4は、2入力オブザーバの第1リンクの状態推定の様子を示したものである。この場合、加速度センサの値を用いて非干渉化入力を生成する理想状態である。当然のことながら、先の1入力の場合に比べて外乱応答に対する再現性が非常に優れていることがわかる。

Fig. 5は、加速度センサの代わりに(第2リンクの)オブザーバの加速度などを用いて非干渉化入力を生成

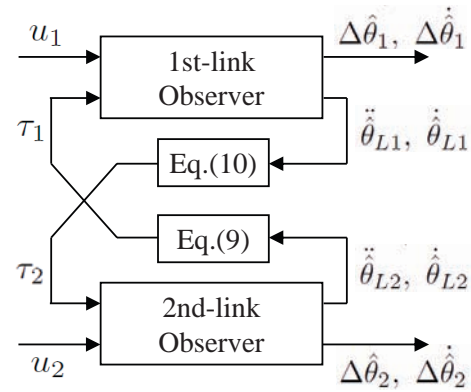
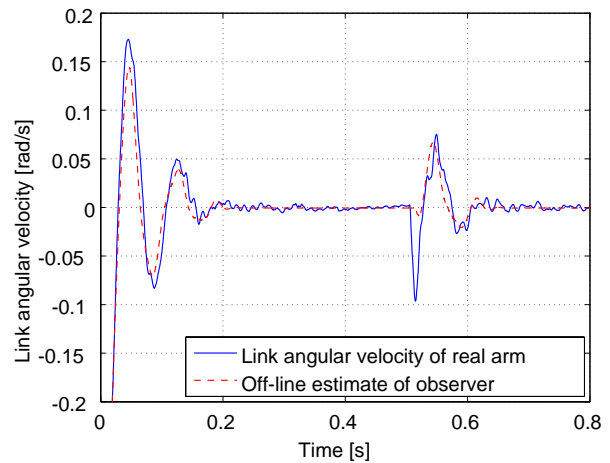


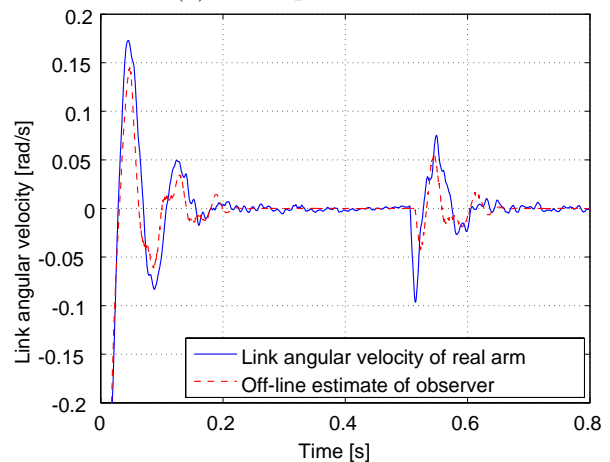
Fig. 2: Structure of proposed decoupling observer

した2入力オブザーバの第1リンクの推定結果を示したものである。加速度センサの値をそのまま用いた場合には劣るものの、1入力に比べて優れた外乱応答への追従性能を持っていることがわかる。この場合、外乱推定なしのオブザーバでも外乱応答は良く、高周波成分が少ない分、むしろこちらの方が好ましいと言える。

以上から、1入力オブザーバがシリアル2リンク2慣性系に対して外乱応答性能が不十分であり、2入力による非干渉化オブザーバが必須であること、加速度センサの代替としてオブザーバから取り出した加速度などの状態変数が見えること、などがわかった。



(a) One-input observer.



(b) One-input disturbance observer.

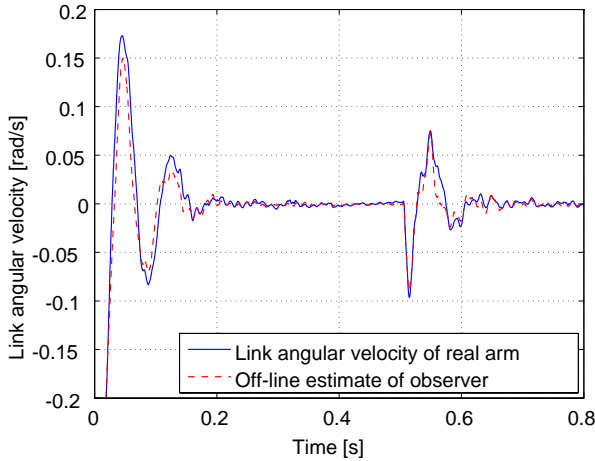
Fig. 3: Off-line estimates of one-input observers using step and disturbance responses of real arm (1st link).

5 おわりに

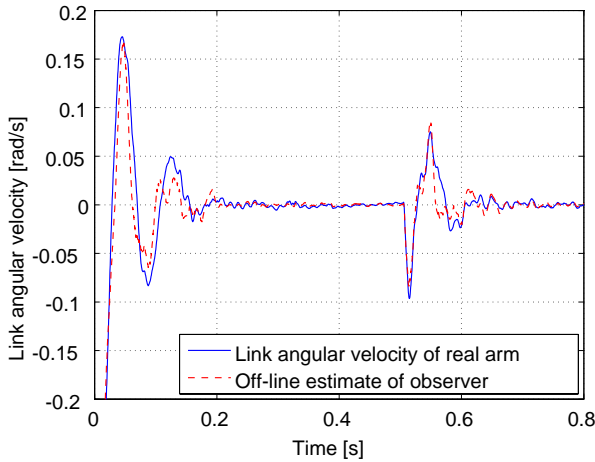
シリアル2リンク2慣性系に対して、モータ内蔵エンコーダからリンク側の状態推定を可能とする非干渉化オブザーバを提案し、2リンクアーム実機データを用いたオフライン推定で有効性を確認した。やや発見的な手法であるが、一般的な非線形オブザーバに比べて設計も実装も容易である。今後は、推定値と実測値の周波数応答を比較することによって、実際に状態フィードバックに用いたときの安定性について検討し、非干渉化オブザーバの設計方法を明確にしていく予定である。

参考文献

- [1] 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”, 計測自動制御学会 第36回制御理論シンポジウム資料, pp.177-182, 2007.
- [2] 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, Vol.12, No.3, pp.466-471, 1994.
- [3] 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, Vol.41, No.5, pp.466-472, 2005.
- [4] M.C.Readman, “Flexible Joint Robots,” CRC Press, 1994.
- [5] 計測自動制御学会編, “ロボット制御の実際”, pp.62-80, コロナ社, 1997.



(a) Two-input observer (Accel sensor).



(b) Two-input disturbance observer (Accel sensor).
Fig. 4: Off-line estimates of two-input observers (Accel sensor type) using step and disturbance responses of real arm (1st link).

- [6] 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, Vol.9, No.1, pp.55-64, 1991.
- [7] 森 泰親, “演習で学ぶ現代制御理論”, pp.108-123, コロナ社, 2003.

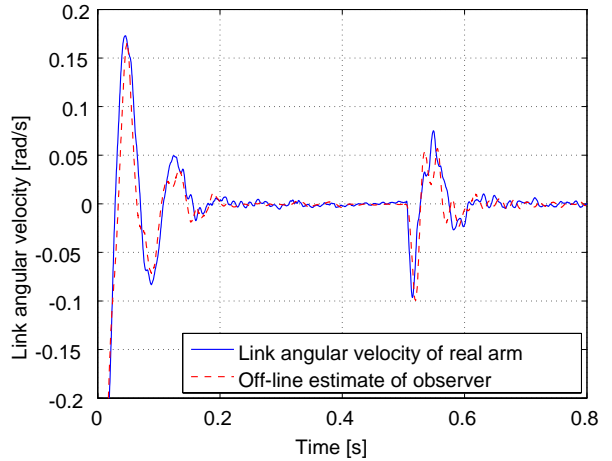
付録

式 (5), (6) の行列の要素の詳細

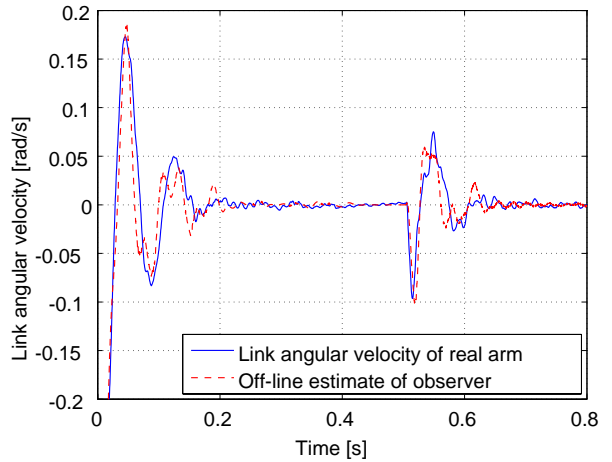
$$\mathbf{A}_1 \equiv \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} a_{31} &= -n_{G1}^2 k_{G1}/m_{M1}, & a_{32} &= n_{G1} k_{G1}/m_{M1} \\ a_{33} &= -(d_{M1} + n_{G1}^2 d_{G1})/m_{M1}, & a_{34} &= n_{G1} d_{G1}/m_{M1} \\ a_{41} &= n_{G1} k_{G1}/m_{L1}, & a_{42} &= -k_{G1}/m_{L1} \\ a_{43} &= n_{G1} d_{G1}/m_{L1}, & a_{44} &= -(d_{L1} + d_{G1})/m_{L1} \end{aligned}$$

$$\mathbf{B}_1 \equiv \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ e_1/m_{M1} & 0 \\ 0 & 1/m_{L1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_1 \equiv \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



(a) Two-input observer (Accel observer).



(b) Two-input disturbance observer (Accel observer).
Fig. 5: Off-line estimates of two-input observers (Accel observer type) using step and disturbance responses of real arm (1st link).