

物理パラメータ推定に基づく シリアル2リンク2慣性系の外乱推定型状態オブザーバ

大明 準治 (東芝/慶應義塾大学) 足立 修一 (慶應義塾大学)

State and Disturbance Observer for Serial Two-link Two-inertia System based on Physical Parameter Estimation

*Junji OAKI (Toshiba Corporation / Keio University) and Shuichi ADACHI (Keio University)

Abstract— In this paper, we propose a multivariable state and disturbance 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 proposed observer is designed by using the physical parameters that include motor inertias, link inertias, joint-friction coefficients and joint-spring coefficients. The off-line estimates using the data of the two-link arm have shown the effectiveness of the proposed observer.

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

1 はじめに

組立作業やマテハン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であろう。

本稿では、物理パラメータ推定に基づくシリアル2リンク2慣性系の外乱推定型状態オブザーバを提案する。このオブザーバは、モータ角エンコーダ計測値を用いて、モータ角とリンク角の差を表す軸ねじれ角(速度)と、第2リンクの姿勢変化や手先負荷変動、第1,2軸間の干渉力などによる外乱を推定する。この際、各軸独立なオブザーバと、慣性力の非対角項を考慮に入れた多変数オブザーバを比較する。以下では、本稿で対象とするシステムと提案する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、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、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

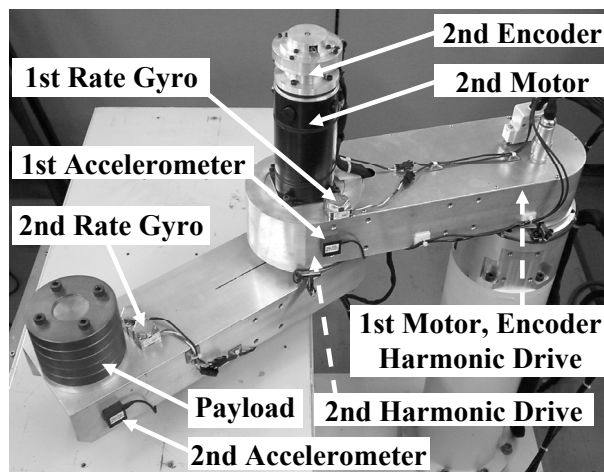


Fig. 1: Planar two-link arm with elastic joints.

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(8192pulse)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300Hz)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。

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

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

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

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

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

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

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

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

$N_G = \text{diag}(n_{G1}, n_{G2})$: 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

$E = \text{diag}(e_1, e_2)$: 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 外乱推定型状態オブザーバの構成方法と実機データに基づくオフライン推定結果

Fig.2に、物理パラメータ推定に基づくシリアル2リンク2慣性系の外乱推定型状態オブザーバの構成方法の概要を示す。Step1~3は、既に提案した物理パラメータ推定法[1]の手順であり4.1で簡単に紹介する。本稿の主題であるStep4については4.2で説明する。

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、伝達関数を經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。

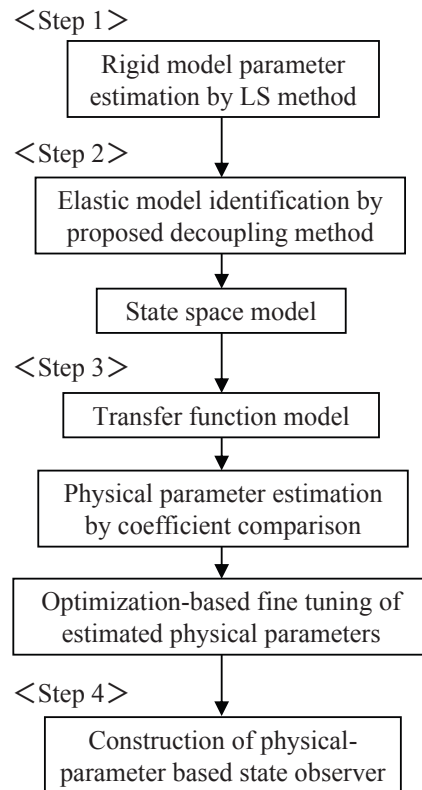


Fig. 2: Outline of proposed method.

4.2 外乱推定型状態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ブ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、加速度センサから計算されるリンク角速度実測値との比較を容易にするため、動特性モデルと構造が等価な同一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 を外乱へ組み入れると、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。

$$\dot{z}_1 = A_{z1}z_1 + b_{z1}u_1, \quad A_{z1} \in R^{4 \times 4}, \quad b_{z1} \in R^{4 \times 1} \quad (11)$$

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

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

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

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

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、第2リンクの姿勢変化や手先負荷変動、第1,2軸間の干渉力、パラメータ誤差やモデル誤差を含む。この外乱は、正確にリンク側の状態推定を行えるような「ゴミため」機能のために推定しているもので、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。

以上は、各軸独立な外乱推定型状態オブザーバの場合について述べた。慣性力の非対角項(式(9)や式(10)の第1項)を考慮に入れた多変数の外乱推定型状態オブザーバも同様に導ける(紙面の都合上省略する)。この場合、各軸独立なオブザーバより、第1,2軸間干渉による外乱に強くなることが期待できる。なお、第2リンクの姿勢変化を考慮し、式(3)に基づいたゲインスケジューリングをするのが理想的である。しかし、後述する推定結果では、この変化は小さく、線形時不変での設計としている。

提案する外乱推定型状態オブザーバの評価のため、各軸独立または多変数で、外乱推定の有無による4通りの同一次元オブザーバを用意する。

- (1) 各軸独立ねじれ角推定オブザーバ(外乱推定なし)
- (2) 各軸独立ねじれ角+外乱推定オブザーバ
- (3) 多変数ねじれ角推定オブザーバ(外乱推定なし)
- (4) 多変数ねじれ角+外乱推定オブザーバ

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。評価に使用した第1軸の周波数応答をFig.3に示す。

Fig.4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)外乱応答に対する各リンク独立に設計した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)が外乱推定なしのオブザーバ、(b)が外乱推定ありのオブザーバである。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、外乱項がない方がよい応答である。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.5は、多変数オブザーバの第1リンクの推定結果を示したものである。各リンク独立に設計した場合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。しかし、さらに、姿勢変化が大きくなったり、手先負荷変動がある場合についての検討が必要である。

5 おわりに

本稿では、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外乱推定型状態オブザーバを提案した。2リンクアーム実機データを用いたオフライン推定によって、各軸独立なオブザーバと、慣性力の非対角項を考慮に入れた多変数オブザーバを比較し、後者が前者より外乱応答特性が良好であることを確認した。このオブザーバは、既に提案した精度の良い物理パラメータ推定法に基づいているので、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も可能である。よって、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、外乱推定型状態オブザーバの設計方法を明確にしていく予定である。

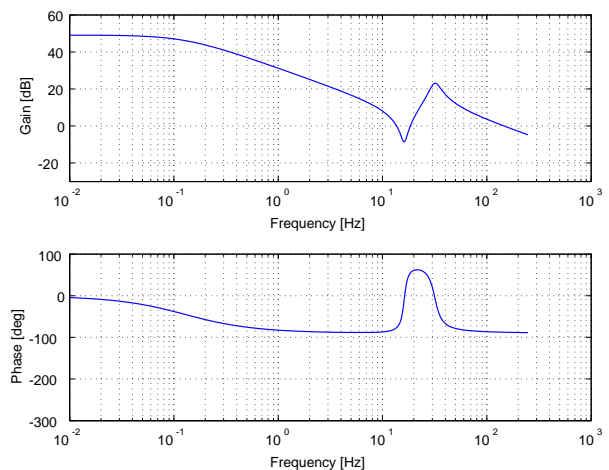
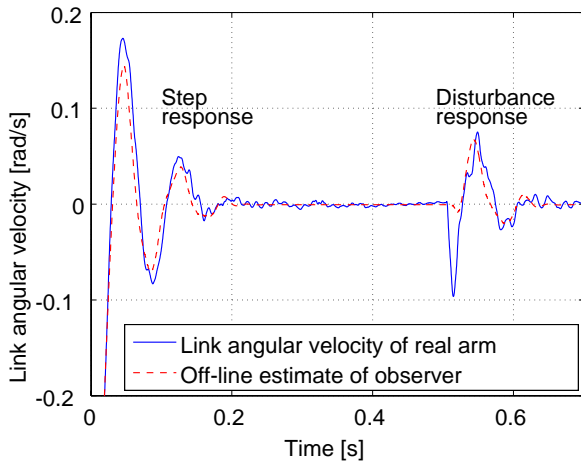


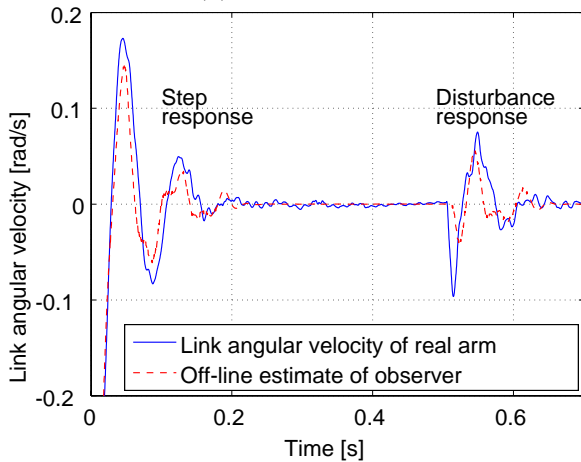
Fig. 3: 1st-link frequency responses ($u_1 \rightarrow \dot{\theta}_{M1}$).

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”, 電気学会論文誌 D, Vol.128, No.5, pp. 669–677, 2008.
- [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.
- [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.



(a) State observer.



(b) State and disturbance observer.

Fig. 4: Off-line estimates of independent observers using step and disturbance responses of real arm (1st link).

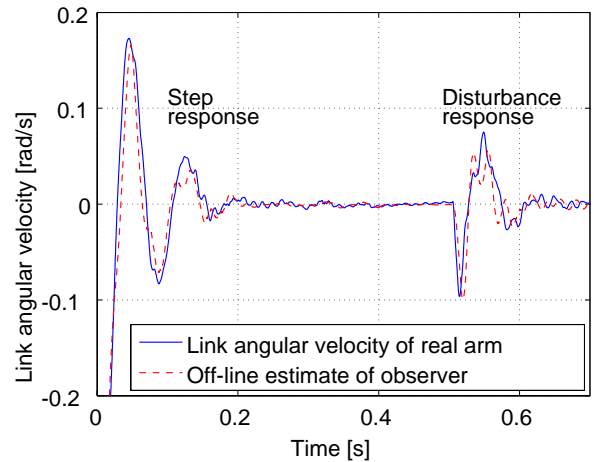
付 録

式 (5), (6) の行列の要素の詳細

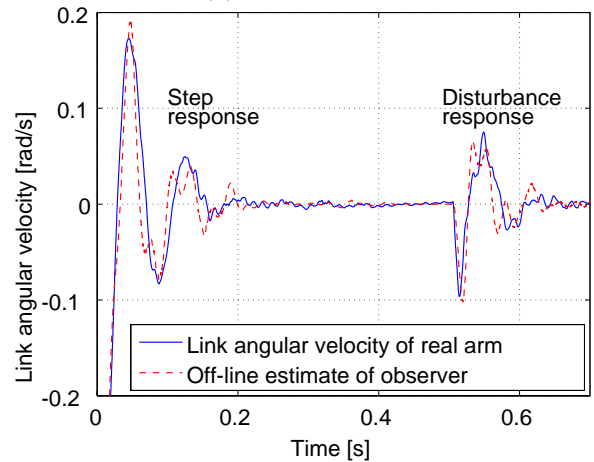
$$\mathbf{A}_1 \equiv \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}$$

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

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



(a) State observer.



(b) State and disturbance observer.

Fig. 5: Off-line estimates of multivariable observers using step and disturbance responses of real arm (1st link).