Секция «Прикладная механика и управление»

Оценивание параметров трения в многозвенных роботах методом динамического расширения регрессора и смешивания

Научный руководитель – Пыркин Антон Александрович

Михальков Никита Владимирович

Аспирант

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Saint Petersburg, Россия

E-mail: mikh.nv@yandex.ru

В докладе рассматривается задача оценивания параметров трения в шарнирах многозвенных роботов методом динамического расширения регрессора и смешивания при управлении актуаторами по моментам сил.

Представим конечность шагающего робота в фазе переноса в виде жесткого манипулятора с n степеней свободы, уравнение движения которого:

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}, \tag{1}$$

где $\mathbf{H}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n\times n}$ – матрица инерции, $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$ – вектор обобщенных координат звеньев, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n$ – вектор кориолисовых и центробежных сил, $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{n\times n}$ – матрица коэффициентов вязкого трения, $\mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^n$ – вектор сил сухого трения в шарнирах, $\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^n$ – вектор сил тяжести, $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$ – вектор обобщенных сил, создаваемых актуаторами. Для наглядности ограничимся рассмотрением конечного звена манипулятора с вращательным суставом при условии неподвижности остальных звеньев:

$$J\ddot{q} + \theta_1\dot{q} + \operatorname{sign}(\dot{q})\theta_2 + mgc\sin q = \tau, \tag{2}$$

где J – момент инерции звена, q – угловая координата, m – масса звена, g – ускорение свободного падения, c – положение центра масс,τ – момент силы, создаваемый актуатором, θ_1, θ_2 – коэффициенты вязкого и сухого трения соотвественно.

Так как коэффициенты трения априорно неизвестны и могут быть нестационарными, то для предсказуемого поведения при управлении роботом необходимо обеспечить их оценивание в реальном времени.

Обозначим $\mathcal{Y} \equiv \mathcal{Y}(q, \dot{q}, \ddot{q}) := \tau - J\ddot{q} - mgc\sin q$. Тогда (2) представимо в виде

$$\mathcal{Y} = \theta_1\dot{q} + \operatorname{sign}(\dot{q})\theta_2. \tag{3}$$

Применив к обеим частям уравнения фильтр $K(.) := \frac{\lambda}{p+\lambda}$, $p := \frac{d}{dt}$ с некоторым $\lambda \in \mathbb{R}^+$ и лемму о замене [1], получим уравнение:

$$\mathcal{Y}_f = \boldsymbol{\phi}^T\boldsymbol{\theta}, \tag{4}$$

где $\mathcal{Y}_f := \mathcal{Y}_f(q, \dot{q}) = K(\mathcal{Y}(q, \dot{q}, \ddot{q}))$, $\boldsymbol{\theta} := [\theta_1, \theta_2]^T$ – вектор параметров модели трения, $\boldsymbol{\phi} := [K(\dot{q}), K(\operatorname{sign}(\dot{q}))]^T$.

Уравнение (4) представляет собой линейное регрессионное уравнение. Так как при характерных паттернах движения звена возможны нарушения условия возбуждения регрессора [2]:

$$\forall t>0, \exists \delta>0, T>0: \int_t^{t+T} \boldsymbol{\phi}(s)\boldsymbol{\phi}(s)^T\,ds \geq \delta \boldsymbol{I}, \tag{5}$$

то ассимптотическая сходимость ошибки оценивания не может быть гарантирована с помощью градиентного спуска. Для ослабления условия (5) возможно использовать метод динамического расширения регрессора и смешивания [3]. Метод состоит из следующих шагов:

1) Расширение регрессора посредством применения к $\mathcal{Y}_f$ и $\boldsymbol{\phi}$ линейного устойчивого оператора, например, вида $K(.)$ или оператора задержки сигнала $Q(.)(t) = (.)(t-d)$, $d \in \mathbb{R}^+$.
2) Преобразование матричного регрессионного уравнения в набор независимых скалярных регрессионных уравнений $y_{si} = \phi_{si}^T \hat{\theta}_i$ относительно неизвестных параметров $\hat{\theta}_i$.
3) Оценивание отдельных параметров методом градиентного спуска $\dot{\hat{\theta}}_i = \Gamma_i(\mathcal{Y} - \phi^T \hat{\theta}_i)$, $\Gamma_i \in \mathbb{R}^+$.

Для демонстрации работоспособности подхода в разделе «иллюстрации» представлены результаты моделирования с параметрами: $m = 1$ кг, $J = 0.05$ кг·м^2, $c = 0.05$ м, $g = 9.8$ м/с^2, $\theta_1 = 0.5(1+e^{-t})$, $\theta_2 = 2$, $\Gamma_1 = 0.1$, $\Gamma_2 = 0.2$; $\tilde{\theta}_i := \hat{\theta}_i - \theta_i$. mikhalkov$_0$1 : . : 1.0

Источники и литература

1) Ioannou P. Robust adaptive control. NJ: PTR Prentice-Hall, 1996.
2) Sastry S. Bodson M. Bartram J. F. Adaptive control: stability, convergence, and robustness, 1990.
3) Aranovskiy S. Bobtsov A. Ortega R. Pyrkin A. Performance Enhancement of Parameter Estimators via Dynamic Regressor Extension and Mixing // IEEE Transactions on Automatic Control, V. 62, №7, 2017, P. 3546–3550.

Иллюстрации

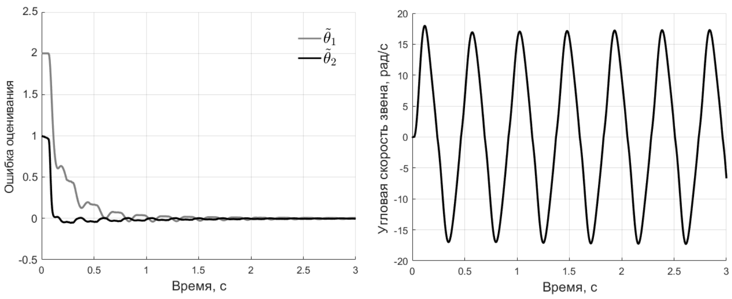

Рис. : Слева: ошибка оценивания параметров. Справа: угловая скорость звена