

© 2017 г. А.О. Ключин<sup>1</sup> (aoklyunin@gmail.com)

А. А. Пыркин<sup>1</sup>, д-р. техн. наук (a.pyrkin@gmail.com)

(<sup>1</sup>Университет ИТМО)

## ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА KUKA YOUNOT<sup>1)</sup>

Предложен новый алгоритм оценивания параметров механических параметров динамической модели робота.

### 1. Введение

Здесь надо что-то написать, но я пока не придумал, что.

### 2. Постановка задачи

Выберем следующую динамическую модель робота:

$$(2.1) \quad H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau,$$

где  $q$  - вектор обобщённых координат,  $H(q)$  - тензор инерции,  $C(q, \dot{q})\dot{q}$  - момент вязкого трения,  $G(q)$  - момент силы гравитации,  $\tau$  - сумма моментов, действующих на сочленение.

---

<sup>1)</sup>

Классические методы предполагают идентификацию по следующему алгоритму поиска зависимостей:

- $C(q, \dot{q})$
- $G(q)$
- $H(q)$

В данной работе рассматривается алгоритм, согласно которому первой производится идентификация  $G(q)$ .

ДН параметры рассматриваемого робота Кука Youbot Arm представлены: в Таблице 1

Таблица 1: ДХ параметры

Звено	$\alpha$	$a$	$d$	$\theta$
1	$90^\circ$	33	147	$q_1 - 170^\circ$
2	0	155	0	$q_2 + 25^\circ$
3	0	135	0	$q_3 + 150^\circ$
4	$90^\circ$	0	0	$q_4$
5	0	0	217.5	$q_5 - 90^\circ$

### 3. Статическая интерпретация

Согласно ДН параметрам были построены матрицы преобразования для каждого из звеньев. Обозначим матрицу перехода из  $i$ -ой системы координат в  $j$ -ю как  $A_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1, 5}$ .

Выберем следующее обозначение систем координат, связанных с роботом  $O_{xyz_0}$  - система координат основания робота,  $O_{xyz_i}, i = \overline{1, 5}$  - система координат, связанная с  $i$ -м звеном.

Тогда матрицы преобразования из СК каждого из звеньев можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} A_{01} = A_{01} \\ A_{02} = A_{01} \cdot A_{12} \cdot \\ A_{03} = A_{01} \cdot A_{12} \cdot A_{23} \cdot \\ A_{04} = A_{01} \cdot A_{12} \cdot A_{23} \cdot A_{34} \cdot \\ A_{05} = A_{01} \cdot A_{12} \cdot A_{23} \cdot A_{34} \cdot A_{45} \cdot \end{cases}$$

Пусть центр  $i$ -е звено имеет массу  $m_i$  и центр тяжести с координатами в СК звена  $R_i(r_{x_i}, r_{y_i}, r_{z_i})$

Тогда координаты центра тяжести  $i$ -го звена можно найти, как

$$(3.1) \quad R_i^0 = A_{0i} \cdot \begin{bmatrix} r_{x_i} & r_{y_i} & r_{z_i} & 1 \end{bmatrix}^T, i = \overline{1, 5}$$

Размерность 4x1 для вектора  $R_i^0$  выбрана неслучайно, ниже будет раскрыта причина такого расширения.

Рассмотрим 2.1 при неподвижной фиксации робота. В случае статичной фиксации  $H(q)\ddot{q} = 0$  и  $C(q, \dot{q})\dot{q} = 0$ .

Рассмотрим силы, действующие в статичном положении. К  $i$ -му сочленению приложены три момента: момент силы притяжения  $G(q)_i$ , момент трения покоя  $\tau_{f_i}$ , направленный в противоположную сторону по отношению к  $G(q)_i$  и момент, развивае-

мый электроприводом  $i$ -го сочленения.

ToDo: строго обосновать, почему  $\tau_f = \text{const} = \text{max}$ .

Обозначим максимальные значения силы трения как вектор-столбец  $F = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 & F_3 & F_4 & F_5 \end{bmatrix}^T$  Тогда 2.1 принимает вид:

$$(3.2) \quad \tau_f = G(q) + \text{diag}\{F\} \text{sign}(G(q))$$

#### 4. Регрессионная модель

Из теории мы знаем, что

$$(4.1) \quad G(q)_i = \frac{\partial P_i}{\partial q_i},$$

где  $P_i$  - полная потенциальная энергия  $i$ -го звена робота.

Пусть  $p_i = m_i g h_i$  - потенциальная энергия  $i$ -го звена без учёта звеньев, находящихся выше по кинематической схеме, где  $h_i$  - высота центра масс  $i$ -звена.

Полная энергия звеньев равна:

$$(4.2) \quad \left\{ \begin{array}{l} P_1 = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 \\ P_2 = p_2 + p_3 + p_4 + p_5 \\ P_3 = p_3 + p_4 + p_5 \\ P_4 = p_4 + p_5 \\ P_5 = p_5 \end{array} \right.$$

Пусть  $\omega_i = \begin{bmatrix} A_{0i31} & A_{0i32} & A_{0i33} & A_{0i34} \end{bmatrix}^T$ ,  $\theta_i = \begin{bmatrix} r_{x_i} & r_{y_i} & r_{z_i} & 1 \end{bmatrix}^T$ , тогда

$$(4.3) \quad p_i = m_i \cdot g \cdot \theta_i^T \omega$$

Подставим 4.3 и 4.2 в 4.1:

$$(4.4) \quad G(q) = g \begin{bmatrix} (m_1 \cdot \theta_1) \cdot \frac{\partial \omega_1}{\partial q_1} + (m_2 \cdot \theta_2) \cdot \frac{\partial \omega_2}{\partial q_1} + (m_3 \cdot \theta_3) \cdot \frac{\partial \omega_3}{\partial q_1} + (m_4 \cdot \theta_4) \cdot \frac{\partial \omega_4}{\partial q_1} + (m_5 \cdot \theta_5) \cdot \frac{\partial \omega_5}{\partial q_1} \\ (m_2 \cdot \theta_2) \cdot \frac{\partial \omega_2}{\partial q_2} + (m_3 \cdot \theta_3) \cdot \frac{\partial \omega_3}{\partial q_2} + (m_4 \cdot \theta_4) \cdot \frac{\partial \omega_4}{\partial q_2} + (m_5 \cdot \theta_5) \cdot \frac{\partial \omega_5}{\partial q_2} \\ (m_3 \cdot \theta_3) \cdot \frac{\partial \omega_3}{\partial q_3} + (m_4 \cdot \theta_4) \cdot \frac{\partial \omega_4}{\partial q_3} + (m_5 \cdot \theta_5) \cdot \frac{\partial \omega_5}{\partial q_3} \\ (m_4 \cdot \theta_4) \cdot \frac{\partial \omega_4}{\partial q_4} + (m_5 \cdot \theta_5) \cdot \frac{\partial \omega_5}{\partial q_4} \\ (m_5 \cdot \theta_5) \cdot \frac{\partial \omega_5}{\partial q_5} \end{bmatrix}$$

Пусть

$$\bar{\theta}^T = [gm_1\theta_1^T \ gm_2\theta_2^T \ gm_3\theta_3^T \ gm_4\theta_4^T \ gm_5\theta_5^T]$$

$$\bar{\omega} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \omega_1}{\partial q_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \omega_2}{\partial q_1} & \frac{\partial \omega_2}{\partial q_2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \omega_3}{\partial q_1} & \frac{\partial \omega_3}{\partial q_2} & \frac{\partial \omega_3}{\partial q_3} & 0 & 0 \\ \frac{\partial \omega_4}{\partial q_1} & \frac{\partial \omega_4}{\partial q_2} & \frac{\partial \omega_4}{\partial q_3} & \frac{\partial \omega_4}{\partial q_4} & 0 \\ \frac{\partial \omega_5}{\partial q_1} & \frac{\partial \omega_5}{\partial q_2} & \frac{\partial \omega_5}{\partial q_3} & \frac{\partial \omega_5}{\partial q_4} & \frac{\partial \omega_5}{\partial q_5} \end{bmatrix}$$

Тогда 4.4 принимает вид:

$$(4.5) \quad G(q) = \bar{\theta}^T \cdot \bar{\omega}$$

Тогда 3.2 можно переписать следующим образом:

$$(4.6) \quad G(q) = \bar{\theta}^T \cdot \bar{\omega}(q) + \bar{F} \cdot \text{sign}(\bar{\theta}^T \cdot \bar{\omega}(q)),$$

## 5. Идентификация

Для идентификации воспользуемся РМНК, рассматривая силу трения покоя  $\bar{F} \cdot \text{sign}(\bar{\theta}^T \cdot \bar{\omega}(q))$  как аддитивный шум.

Тогда 4.5 сводится к классической регрессионной модели:

$$(5.1) \quad G(q) = \bar{\theta}^T \cdot \bar{\omega}$$

Воспользуемся РМНК для определения неизвестных параметров  $\bar{\theta}$ .

В результате эксперимента получены следующие значения:

$$\begin{cases} m_1 \hat{g}r_x = 1.0000 \\ m_1 \hat{g}r_y = 1.0000 \\ m_1 \hat{g}r_z = 1.0000 \\ m_1 \hat{g} = 1.0000 \end{cases} \quad \begin{cases} m_2 \hat{g}r_x = 1.0000 \\ m_2 \hat{g}r_y = -0.0575 \\ m_2 \hat{g}r_z = 1.0000 \\ m_2 \hat{g} = 0.0078 \end{cases} \quad \begin{cases} m_3 \hat{g}r_x = 40.8913 \\ m_3 \hat{g}r_y = -0.2375 \\ m_3 \hat{g}r_z = 1.0000 \\ m_3 \hat{g} = 0.0058 \end{cases}$$

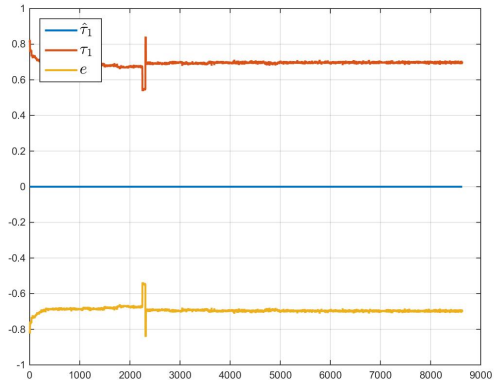
$$\begin{cases} m_4 \hat{g}r_x = -0.3048 \\ m_4 \hat{g}r_y = 0.0058 \\ m_4 \hat{g}r_z = 0.0058 \\ m_4 \hat{g} = 1.0000 \end{cases} \quad \begin{cases} m_5 \hat{g}r_x = -0.1522 \\ m_5 \hat{g}r_y = -0.0141 \\ m_5 \hat{g}r_z = 1.0000 \\ m_5 \hat{g} = -0.0002 \end{cases}$$

## **6. Заключение**

Полученные оценки не совпадают с реальными физическими параметрами робота, но обеспечивают корректную оценку моментов, развиваемых в сочленениях робота в статических положениях.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

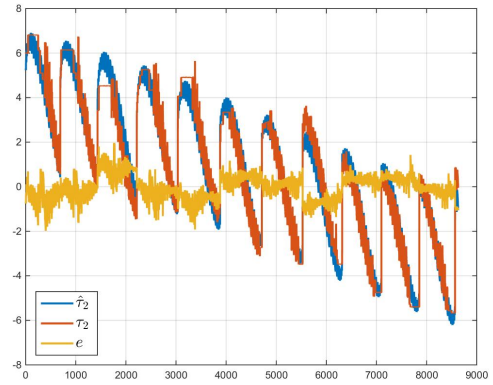
а



Временная диаграмма оценки

$\hat{\tau}_1(t)$

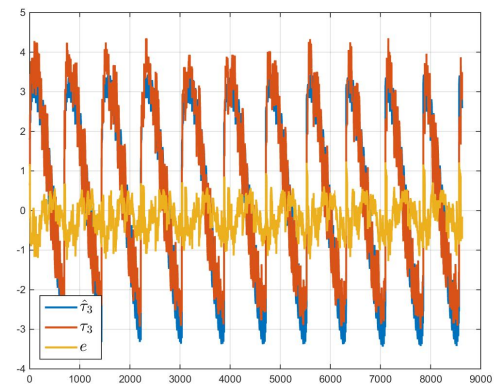
б



Временная диаграмма оценки

$\hat{\tau}_2(t)$

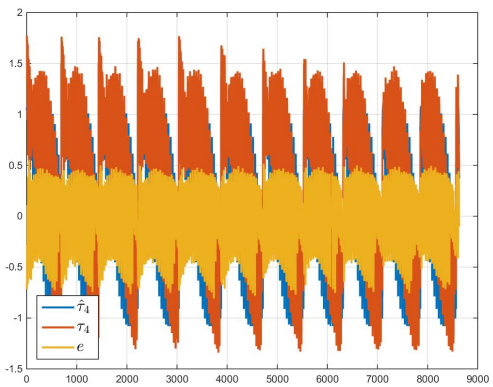
в



Временная диаграмма оценки

$\hat{\tau}_3(t)$

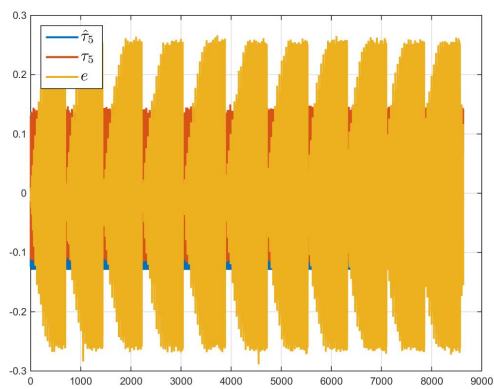
г



Временная диаграмма оценки

$\hat{\tau}_4(t)$

д

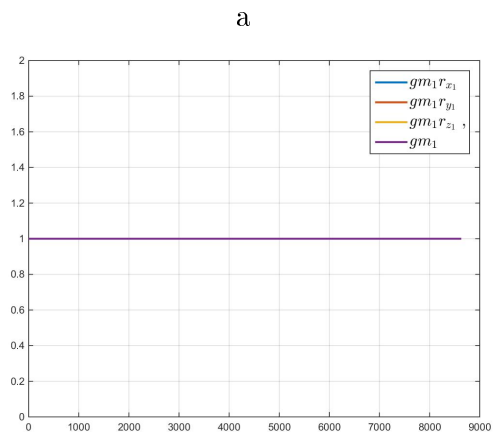


Временная диаграмма оценки

$\hat{\tau}_5(t)$

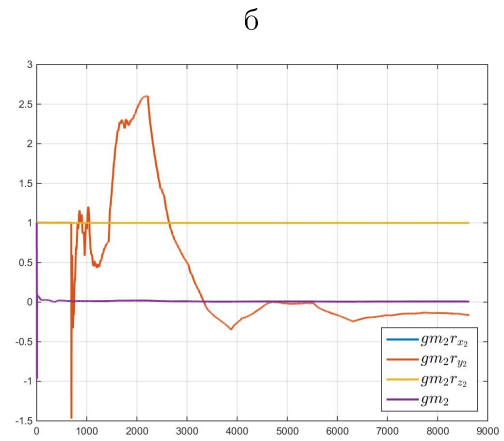
Рис. 1. Оценки моментов.





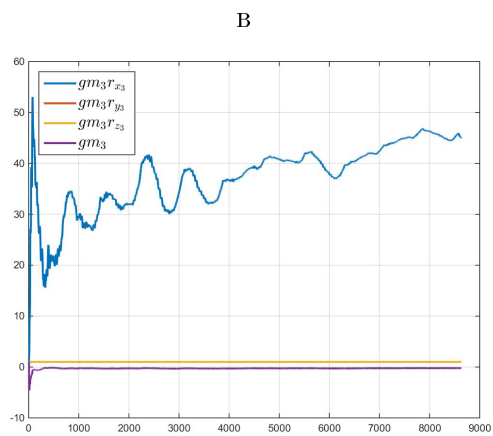
Временная диаграмма оценки

$$\hat{\theta}_1(t)$$



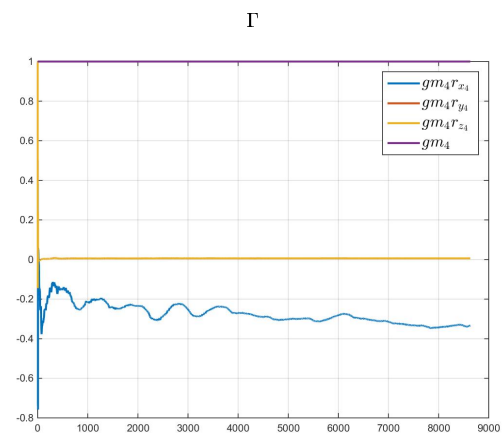
Временная диаграмма оценки

$$\hat{\theta}_2(t)$$



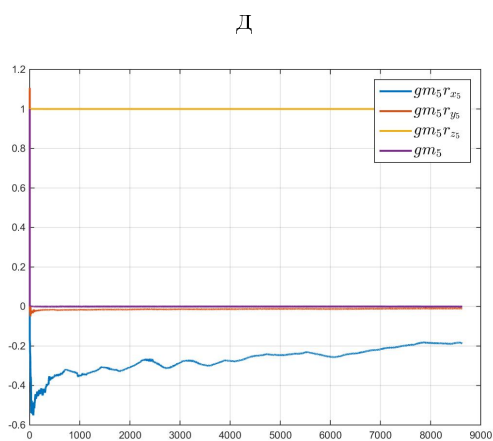
Временная диаграмма оценки

$$\hat{\theta}_3(t)$$



Временная диаграмма оценки

$$\hat{\theta}_4(t)$$



Временная диаграмма оценки

$$\hat{\theta}_5(t)$$

Рис. 2. Оценки неизвестных параметров.