

УДК 681.518

Многозвенная калибровка кинематики роботов-манипуляторов с использованием фотограмметрии

Борисов Сергей Дмитриевич¹

sborisov@principal-component.ru

Гудым Антон Васильевич²

agudym@bmstu.ru

SPIN-код: 2418-7532

Соколов Александр Павлович²

alsokolo@bmstu.ru

SPIN-код: 9317-9916

¹ ООО «Робопро», Москва, Россия² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В процессе изготовления и эксплуатации любого изделия неизбежно появляются отклонения номинальных размеров от фактических. Если расхождения небольшие, ими можно пренебречь. Однако с учетом значительных размеров роботов, накопленная ошибка позиционирования выходного звена (эффектора) робота может намного превышать требуемые значения, необходимые для выполнения ряда задач. Задача калибровки последовательного робота-манипулятора заключается в корректировке параметров кинематической модели робота-манипулятора таким образом, чтобы минимизировать отклонение расчетного положения выходного звена робота от его фактического положения. Использование фотограмметрии позволяет осуществлять точное позиционирование звеньев робота, а также позволяет предложить способ калибровки кинематики с использованием информации о положении нескольких звеньев робота.

Ключевые слова: калибровка роботов, кинематика, фотограмметрия, точность, оптимизация

Введение. Калибровка кинематики робота — хорошо изученная задача. В литературе представлено множество методов, предлагающих калибровку робота по выходному звену [1–3]. Наличие точного измерительного метода для позиционирования звеньев робота — важная составляющая калибровки кинематики. Существуют методы точного позиционирования с использованием лазерных трекеров [3–5], координатно-измерительных машин. Также существуют способы механической оценки позиционирования эффектора робота. Представленные методы имеют недостатки, в виде высокой стоимости оборудования, сложности настройки, трудности в точной оценке параметров. Компромиссным решением, с точки зрения соотношения стоимости, сложности эксплуатации и точности оценки пространственных положений объектов, представляются измерительные методы на основе фотограмметрии.

Методы и материалы; результаты. Матрицей трансформации ${}^wM_o \in SE3$ описывается положение локальной системы координат (СК) относительно мировой СК. Для движущегося манипулятора, используя измерительную систему на основе фотограмметрии, можно определить позицию ин-

струмента ${}^wM_{t,j}$ в моменты времени $j \in [1..m)$ для соответствующих конфигураций робота $\{q_j\}_{j=1}^m$, $q_j = (q_{1,j}, \dots, q_{n,j})^T$. В таком случае задача калибровки кинематики робота-манипулятора сводится к решению системы с уравнениями вида

$${}^wM_{t,j}^{-1} \cdot {}^wM_b \cdot {}^bM_{l_n}(q_j) \cdot {}^{l_n}M_t = I_{4 \times 4}, \quad (1)$$

для m различных конфигураций при известном ${}^wM_{t,j}$.

Отыскание поправок параметров для системы уравнений (1) сводится к решению оптимизационной задачи:

$$\begin{aligned} \Delta_x, {}^wM_b, {}^{l_n}M_t = \arg \min_{\substack{\Delta_x \in R^{4n-6}, \\ {}^wM_b \in SE3, \\ {}^{l_n}M_t \in SE3}} L(\Delta_x, {}^wM_b, {}^{l_n}M_t), \\ L(\Delta_x, {}^wM_b, {}^{l_n}M_t) = \\ = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^8 \left\| {}^wM_{t,j}^{-1} \cdot {}^wM_b \cdot {}^bM_{l_n}(q_j, \Delta_x) \cdot {}^{l_n}M_t \cdot p_k - p_k \right\|_2^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где p_k — произвольно выбранные габаритные точки инструмента определенные в СК инструмента.

Задача (2) эффективно решается методами численной оптимизации, такими как метод Гаусса — Ньютона, Левенберга — Марквардта и подобными.

Фотограмметрия позволяет вычислить трехмерные координаты меток (облако 3D-точек) на поверхности каждого звена робота. Результатом является определение положения облаков точек каждого звена относительно МСК. В данной работе предлагается продвинутое формулирование задачи (2) для учета трансформации каждого звена:

$$\begin{aligned} L(\Delta_x, {}^wM_b, {}^{l_1}M_{c_1}, \dots, {}^{l_n}M_{c_n}) = \\ = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^8 \left\| {}^{wM_{c_i,j}^{-1}} \cdot {}^wM_b \cdot {}^bM_{l_i}(q_j, \Delta_x) \cdot {}^{l_i}M_{c_i} \cdot p_k - p_k \right\|_2^2, \end{aligned}$$

Заключение. В настоящем исследовании проведен анализ существующих методов калибровки роботов-манипуляторов. Разработана модель невязки, предназначенная для проведения калибровки на основе фотограмметрических измерений с отслеживанием нескольких звеньев робота, показана ее эффективность для высокоточного определения положения звеньев.

*Работа выполнена в рамках госзадания
Минобрнауки России (тема № FSN-2024-0083).*

Список источников

- [1] Hayati S.A. Robot arm geometric link parameter estimation. The 22nd IEEE conference on decision and control, 1983, pp. 1477–1483.
- [2] Park I.-W. et al. Laser-based kinematic calibration of robot manipulator using differential kinematics. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, vol. 17, № 6, pp. 1059–1067.

- [3] Wu Y. et al. Geometric calibration of industrial robots using enhanced partial pose measurements and design of experiments. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2015, vol. 35. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.03.007>
- [4] Nubiola A., Bonev I.A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, vol. 29, № 1, pp. 236–245.
- [5] Novak P., Stoszek S., Vyskocil J. Calibrating industrial robots with absolute position tracking system. 25th IEEE international conference on emerging technologies and factory automation (ETFA), 2020, vol. 1, pp. 1187–1190.