

УДК 681.518

Автоматизация калибровки кинематики роботов - манипуляторов с помощью фотограмметрии

Гудым Антон Васильевич

Борисов Сергей Дмитриевич

Соколов Александр Павлович (научный руководитель)

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Современный производственный процесс требует высокой точности и надежности в работе робототехнических систем. Для достижения их максимальной эффективности необходимо аккуратно оценить или откалибровать геометрические параметры кинематики робота. В данной работе представлена схема калибровки кинематики роботов-манипуляторов с помощью фотограмметрии. Использование фотограмметрии позволяет значительно упростить процесс калибровки, повысить его точность и сократить время, затрачиваемое на настройку робототехнических систем.

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

Введение. Калибровка кинематики манипулятора по выходному звену очень распространена и достаточно хорошо представлена в научной литературе [1–6]. Стоит отметить, что значительная часть — 90 % ошибки позиционирования манипулятора вызвана неточными геометрическими параметрами кинематической цепи [7]. В работе [8] погрешность позиционирования выходного звена для ABB IRB 1600 составляет 2,158 мм до калибровки геометрических параметров кинематической модели и 0,696 мм после калибровки. В работе [3] показано, что калибровка геометрических параметров манипулятора позволяет существенно уменьшить погрешность позиционирования выходного звена или установленного инструмента, вплоть до 0,1 мм, что существенно расширяет возможность применения роботов-манипуляторов в различных сценариях автоматизации производства.

Кинематическая модель манипулятора. На рис. 1 показан цифровой двойник робота-манипулятора компании РОБОПРО, модель RC-10 в среде Blender3D [9]. Как правило, калибровку кинематики манипуляторов выполняют с помощью специальных измерительных устройств, таких как лазерные трекеры [3, 8, 10] или координатно-измерительные машины, а также иных механических систем оценки параметров положения выходного звена [4]. Однако такие устройства имеют высокую стоимость и требуют значительных затрат на их эксплуатацию и обслуживание. При этом процесс сбора данных для последующей идентификации параметров может быть довольно трудоемким. В данной работе предлагается использовать фотограмметрию для калибровки манипуляторов, что позволяет значительно упростить процесс калибровки и снизить его стоимость.

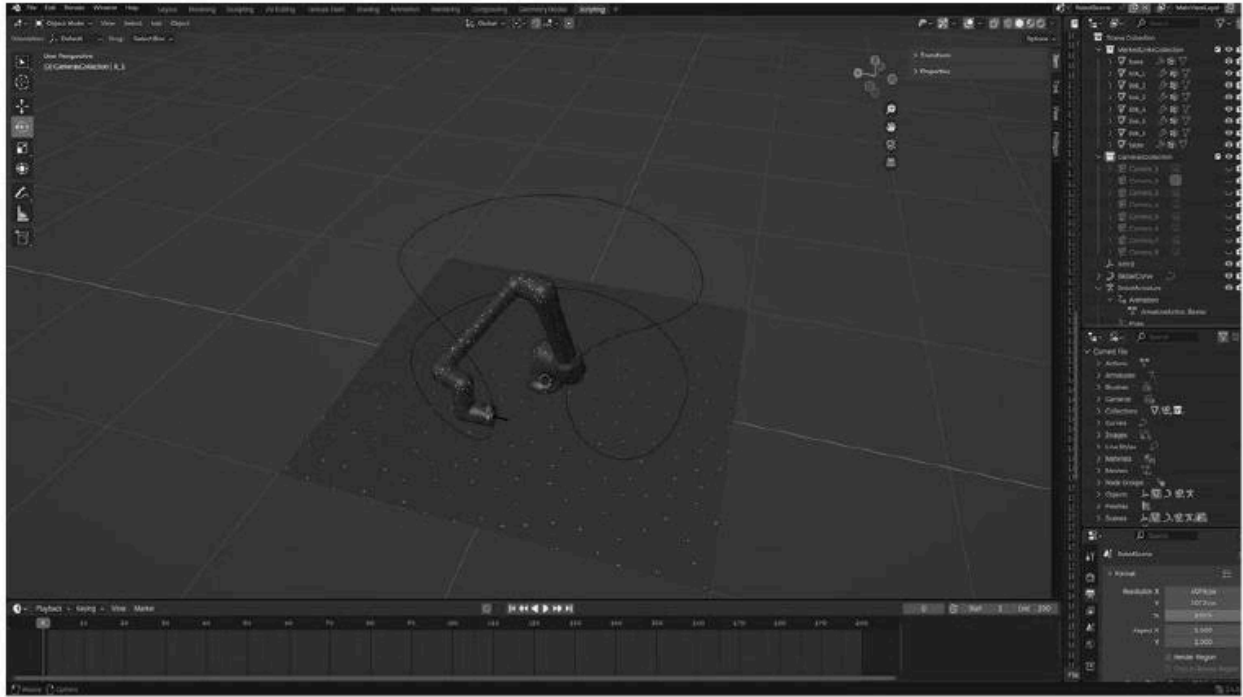


Рис. 1. Цифровой двойник робота-манипулятора компании РОБОПРО, модель RC-10 в Blender3D [9]

Для начала определим кинематическую модель манипулятора. Прямая кинематика позволяет определить положение и ориентацию выходного звена манипулятора в пространстве, зная геометрические параметры его звеньев и углы их поворота. Обратная кинематика позволяет определить углы поворота звеньев манипулятора, зная положение и ориентацию выходного звена. Модель прямой кинематики манипулятора удобно представить в виде последовательности матриц трансформации, которые связывают между собой локальные системы координат звеньев манипулятора [11, 12]. Каждая матрица трансформации описывает положение и ориентацию одного звена относительно предыдущего звена. В общем случае положение выходного звена l_n манипулятора относительно неподвижной базы l_0 можно записать в виде

$${}^{l_0}T_{l_n}(\mathbf{q}) = {}^{l_0}T_{l_1}(q_1) {}^{l_1}T_{l_2}(q_2) \dots {}^{l_{n-1}}T_{l_n}(q_n), \quad (1)$$

где ${}^{l_0}T_{l_n}(\mathbf{q})$ — позиция выходного (последнего) звена l_n относительно неподвижной базы l_0 , определяется умножением локальных трансформаций (приращений) ${}^{l_{i-1}}T_{l_i}(q_i)$ — положения звена l_i относительно l_{i-1} . Матрицы ${}^{l_{i-1}}T_{l_i}(q_i)$ можно параметризовать различным образом, например часто используются четыре ДН-параметра [11]

$${}^{l_{i-1}}T_{l_i} = \begin{pmatrix} \cos q_i & -\sin q_i \cos \alpha_i & \sin q_i \sin \alpha_i & a_i \cos q_i \\ \sin q_i & \cos q_i \cos \alpha_i & -\cos q_i \sin \alpha_i & a_i \sin q_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где a_i — длина звена; d_i — смещение по оси z ; α_i — угол между осями z_{i-1} и z_i ; q_i — угол между осями x_{i-1} и x_i . Три параметра из четырех неизменны или стационарны в процессе работы манипулятора, а один — угол поворота звена q_i является переменным и зависит от управляющих сигналов, которые подаются на привод манипулятора для его перемещения. Задача калибровки геометрических параметров кинематической модели заключается в том, чтобы вычислить неизменные параметры из формулы (1) и, фактически, сводится к решению обратной задачи кинематики относительно стационарных параметров, в форме нелинейной задачи оптимизации, решаемой, например методом Левенберга — Марквардта [3]. Для этого требуется априорная информация о положении и ориентации выходного звена манипулятора, которая может быть получена с помощью различных методов, таких как лазерные трекеры [3, 8, 10] или фотограмметрия [5, 6]. Далее рассмотрим фотограмметрию как метод калибровки манипуляторов.

2. Фотограмметрия для калибровки манипуляторов. Фотограмметрия — метод измерения пространственных координат точек поверхности объектов на основе анализа изображений, полученных с помощью цифровых камер [13, 14]. Выходным результатом по наблюдаемым изображениям является облако 3D-точек или полигональная сетка. В данной работе предлагается использовать фотограмметрию как основной механизм определения положения и ориентации разных звеньев манипулятора относительно неподвижной базы. Для максимальной точности требуется использовать несколько камер, а также специальные светоотражающие метки, наклеенные на поверхность манипулятора (рис. 2).

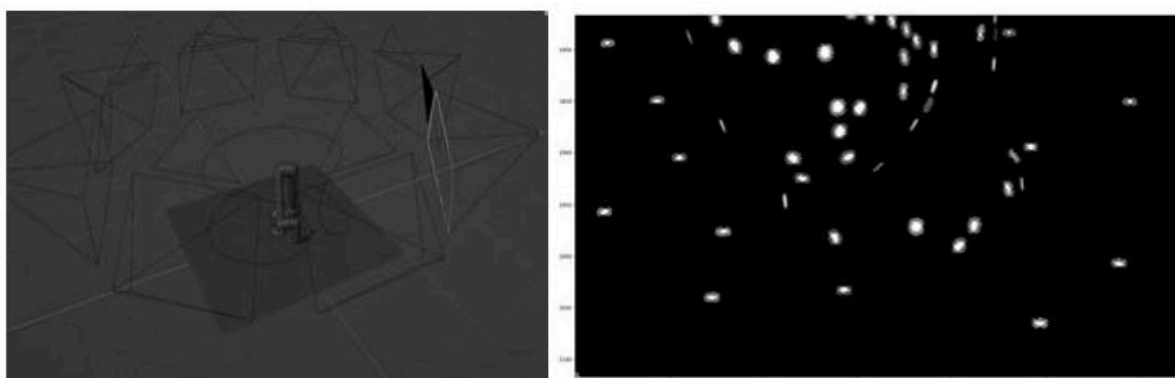


Рис. 2. Слева модельная конфигурация камер (пирамиды) относительно робота. Справа увеличенное изображение с одной из камер (ось Y в пикселях), с результатом детектирования — контуром фотограмметрических меток на поверхности робота

Фотограмметрическая система позволяет определить позицию локальной системы координат облака точек i -го звена относительно главной камеры ${}^{cam}T_{c_i}$. Минимизируя среднеквадратическое расстояние между одноименными точками из динамической сцены, восстановленных с помощью фотограмметрии в произвольный момент времени (относительно базы робота) и точек каждого из звеньев (полученных заранее), можно найти евклидову трансфор-

мацию ${}^{cam}T_{c_i}$ [13] между системой координат камеры и любым из звеньев. Другими словами, позиционировать объект относительно некоторой системы координат. В тоже время, ${}^{cam}T_{c_i}$ можно установить через совокупность трех взаимных позиций:

$${}^{cam}T_{c_i} = {}^{cam}T_{l_0} {}^{l_0}T_{l_i} {}^{l_i}T_{c_i}, \quad (2)$$

где ${}^{cam}T_{l_0}$ — позиция базового звена относительно главной камеры (искомая величина); ${}^{l_0}T_{l_i}$ — позиция i -го звена относительно базового звена (прямая кинематика (1)); ${}^{l_i}T_{c_i}$ — позиция локальной системы координат i -го звена относительно системы координат соответствующего облака точек (также искомая величина). Таким образом, введя две дополнительных трансформации ${}^{cam}T_{l_0}$ (шесть параметров) и ${}^{l_i}T_{c_i}$ ($6 \cdot 6 = 36$ параметров), можно получить уравнение невязки (2) для последующей оптимизации геометрических ДН-параметров манипулятора.

Рассмотрим погрешность позиционирования (табл. 1 и 2) звеньев робота-манипулятора относительно его основания, в зависимости от величины шума детектирования (одно стандартное отклонение).

Таблица 1

Линейная погрешность позиционирования в зависимости от шума детектирования в миллиметрах

Звено (n — число наблюдаемых точек)	Стандартное отклонение детектора σ_{det} , пиксели		
	0,01	0,05	0,100
Link1 (13)	0,044	0,188	0,358
Link2 (89)	0,026	0,116	0,187
Link3 (40)	0,075	0,297	0,664
Link4 (17)	0,101	0,526	1,092
Link5 (7)	0,087	0,465	0,964
Link6 (5)	0,093	0,490	1,001

Таблица 2

Угловая ошибка позиционирования в зависимости от шума детектирования в радианах

Звено (n — число наблюдаемых точек)	Стандартное отклонение детектора σ_{deb} пиксели		
	0,010	0,050	0,100
Link1 (13)	>0,001	0,001	0,002
Link2 (89)	>0,001	0,001	0,001
Link3 (40)	>0,001	0,001	0,001
Link4 (17)	>0,001	>0,001	0,001
Link5 (7)	>0,001	0,001	0,002
Link6 (5)	>0,001	0,002	0,004

Заключение. В работе были рассмотрены различные методы калибровки манипуляторов, предложена модель невязки для калибровки с помощью фотограмметрии, продемонстрирована высокая эффективность фотограмметрии, как метода точного позиционирования звеньев манипулятора. В будущем авторы планируют провести экспериментальную проверку предложенной модели на реальном манипуляторе и привести оценки достигнутой точности робота.

Литература

- [1] Hayati S.A. Robot arm geometric link parameter estimation. The 22nd IEEE conference on decision and control, 1983, pp. 1477–1483. <https://doi.org/10.1109/cdc.1983.269783>
- [2] Park I.-W. Laser-based kinematic calibration of robot manipulator using differential kinematics. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, vol. 17, no. 6, pp. 1059–1067.
- [3] Wu Y. Geometric calibration of industrial robots using enhanced partial pose measurements and design of experiments. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2015, vol. 35, pp. 151–168. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.03.007>
- [4] Gan Y., Duan J. A calibration method of robot kinematic parameters by drawstring displacement sensor. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, vol. 16, art no. 172988141988307.
- [5] Balanji H.M., Turgut A.E., Tunc L.T. A novel vision-based calibration framework for industrial robotic manipulators. Robot. Pergamon Press Inc., 2022, vol. 73, no. C.
- [6] Puerto P. Analyses of key variables to industrialize a multi-camera system to guide robotic arms. Robotics, 2023, vol. 12, art. no. 10.
- [7] Elatta A. An overview of robot calibration. Information Technology Journal, 2004, vol. 3, no. 1, pp. 74–78.
- [8] 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, no. 1, pp. 236–245.
- [9] Community B.O. Blender — a 3D modelling and rendering package. Amsterdam, Blender Foundation, 2024.
- [10] 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.
- [11] Denavit J., Hartenberg R.S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. Journal of Applied Mechanics, 2021, vol. 22, no. 2, pp. 215–221.
- [12] Corke P. A simple and systematic approach to assigning denavit–hartenberg parameters. Robotics. IEEE Transactions, 2007, vol. 23, pp. 590–594.
- [13] Hartley R., Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision. New York, Cambridge University Press, 2003.
- [14] Triggs B. Bundle adjustment — a modern synthesis. Proceedings of the international workshop on vision algorithms: Theory and practice. Berlin, Springer-Verlag, 1999, pp. 298–372.

Photogrammetry for robotic arms kinematics calibration

Gudym Anton Vasilievich

Borisov Sergey Dmitrievich

Sokolov Alexander Pavlovich (*scientific advisor*)

BMSTU, Moscow, Russia

Modern manufacturing processes require high precision and reliability in the operation of robotic systems. To achieve maximum efficiency, it is necessary to accurately assess or calibrate the geometric parameters of a robot's kinematics. In this work, the authors present an approach for calibrating the kinematics of robotic arms using photogrammetry. The use of photogrammetry significantly simplifies the calibration process, increases its accuracy, and reduces the time required to set up robotic systems.

Keywords: robot calibration, kinematics, photogrammetry, accuracy, optimization