

Разработка упрощенного метода калибровки коллаборативного робота на мобильной тележке

П. Р. Соловьев, Е. А. Рыжкова

Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва

Аннотация: В статье разрабатываются методы калибровки для повышения точности и снижения затрат на эксплуатацию роботизированных систем в складской логистике. Особое внимание уделено использованию лазерных датчиков и параметра смещения (offset), позволяющих адаптировать положение робота в изменяющихся условиях. Методология включает этапы инициализации, ориентирования и финальной проверки, что позволяет минимизировать отклонения и сократить необходимость в ручной корректировке. Такой подход способствует поддержанию устойчивой точности операций и снижению эксплуатационных расходов за счёт автоматизации и адаптивной настройки калибровки робота.

Ключевые слова: калибровка робота, автоматизация склада, лазерный датчик, offset, точность позиционирования, роботизированная система, адаптивная калибровка, автоматическая калибровка, коллаборативный робот, кобот.

Актуальность темы автоматизации складских процессов, особенно с использованием коллаборативных роботов, продолжает расти из-за стремительно меняющихся потребностей логистики и стремления компаний к более гибким и высокоэффективным решениям. В условиях роста электронной коммерции и увеличения объёмов складских операций требования к скорости, точности и оптимальному использованию пространства становятся критически важными для сохранения конкурентоспособности. Современные автоматизированные системы хранения — такие, как карусельные системы и лифтовые решения — предоставляют уникальные возможности для уплотнённого и организованного хранения товаров, что позволяет эффективно использовать ограниченное складское пространство.

В последние годы использование коллаборативных роботов, или коботов, становится предпочтительным решением на многих складах, поскольку они способны работать рядом с людьми и легко адаптируются к

различным задачам. Однако, несмотря на их гибкость, одной из ключевых сложностей остаётся вопрос точного позиционирования и калибровки, особенно когда робот установлен на мобильной платформе, перемещающейся между различными зонами хранения. На объекте одного из заказчиков есть необходимость как человеческой, так и роботизированной работы с вертикальными системами хранения, что подразумевает периодическое перемещение тележек с роботом. Постоянное перемещение в условиях динамичного склада приводит к необходимости частой перекалибровки. Для перекалибровки обычно существует два пути [1]. Если она выполняется вручную, она может занимать много времени и требует участия квалифицированного персонала. Если же она происходит автоматически, то такая процедура подразумевает применение машинного зрения, что значительно увеличивает стоимость такой ячейки. Таким образом, разработка упрощенного и автоматизированного метода калибровки становится актуальной задачей, способной стать золотой серединой, сокращая временные затраты на ручную настройку и повышая точность и стабильность работу робота, и понижая стоимость автоматической.

Кроме того, внедрение такого решения поможет решать одну из основных проблем складской логистики — недостаток квалифицированного персонала и высокий уровень текучести кадров, особенно в условиях круглосуточной работы [2]. Упрощённая калибровка позволит минимизировать зависимость от квалифицированных операторов, снижая риски ошибок и сокращая временные и финансовые затраты на обучение сотрудников. В долгосрочной перспективе это также приведёт к увеличению производительности и повышению безопасности на складах, так как автоматизированные решения снижают потребность в физическом участии операторов и минимизируют риски, связанные с человеческим фактором.

Цель данной статьи — разработка упрощенного метода калибровки коллаборативного робота, установленного на мобильной тележке, для интеграции в автоматизированные складские системы. Она направлена на создание методики, которая позволит проводить калибровку робота быстро и с минимальными затратами времени и усилий, без необходимости постоянного участия квалифицированных операторов, а также позволит удешевить дорогостоящий автоматический вариант калибровки, применяющий машинное зрение.

Проблема калибровки коллаборативного робота на складе заключается в обеспечении точного позиционирования и захвата коробок, расположенных в ячейках хранения [3]. На складе, где большинство коробок имеет ширину и глубину не менее 12 см, а минимальный гриппер робота — 10 см, номинальный запас по точности составляет 1 см с каждой стороны, или 2 см в целом. Хотя такой запас минимально достаточен для выполнения захвата, его точность может быть недостаточной для устойчивой и безопасной работы робота, особенно при частых перемещениях на складе.

В условиях, когда местоположение робота часто меняется, точность калибровки может снижаться из-за вибраций, мелких смещений тележки или изменений в складском окружении. Поэтому рекомендуется снизить запас по необходимой точности до более узкого значения, например, 0,5 см с каждой стороны, то есть до 1 см в целом. Это позволит минимизировать вероятность ошибок захвата, избежать касания других объектов и повысить надежность операций.

Методология упрощенной калибровки направлена на создание быстрого и надежного процесса настройки коллаборативного робота, который обеспечивает высокую точность при минимальных временных затратах. Использование модульных этапов позволяет разделить процесс калибровки на последовательные шаги, каждый из которых решает

конкретные задачи [4]. Этот подход помогает снизить зависимость от участия оператора, а также оптимизирует точность и стабильность робота при взаимодействии с системами хранения, что особенно важно в условиях постоянных перемещений на складе.

Модульные этапы калибровки представляют собой поэтапный процесс настройки и калибровки робота, который позволяет обеспечить точное позиционирование для работы в различных условиях складских систем. Данный подход разделяет процесс калибровки на отдельные этапы, каждый из которых решает конкретную задачу, способствуя достижению высокой точности при минимальных временных затратах [5]. Рассмотрим ключевые этапы:

Инициализация и базовое выравнивание: первый этап включает проверку положения мобильной тележки и первичное выравнивание робота относительно основного ориентира на складе таким образом, чтобы тележка всегда находилась параллельно складу, на равноудаленном расстоянии по оси Y.

Приблизительное ориентирование: после базового выравнивания робот проходит предварительную калибровку по оси X, проверяя приблизительно допустимое положение [6]. Применяемые роботы имеют ограниченную досягаемость в 1340мм, и при установке посередине рабочей зоны самая дальняя точка находится на расстоянии 1 метра от робота. Следовательно, допускается небольшое смещение робота, но я в такой ситуации рекомендую ставить ограничение, равное 20 сантиметрам от середины как в правую, так и в левую стороны.

Финальная проверка и верификация точности: на заключительном этапе производится фиксация колес тележки, а робот повторно выполняет процедуру ориентирования по оси X. Оператору потребуется подтверждение корректности выполненной калибровки.

Такая модульная структура позволяет оптимизировать калибровку робота на мобильной тележке, обеспечивая гибкость и адаптивность в условиях динамичного складского пространства.

Рассмотрим инструменты, необходимые для выполнения описанных выше этапов калибровки.

На этапе инициализации используется простое механическое приспособление, изображенное на рисунке 1, представляющее собой прямоугольную конструкцию из алюминиевых профилей, закрепленную на тележке робота. На дальнем конце прямоугольника расположены два колеса, с помощью которых тележка устанавливается в прямое соприкосновение с автоматизированной системой хранения (АСХ) [7]. Такое устройство позволяет точно позиционировать тележку параллельно зоне хранения, что закладывает базу для дальнейшей высокоточной калибровки и гарантирует необходимое расстояние по оси Y. Для программной проверки корректности этого события можно использовать дискретные индуктивные датчики с малым расстоянием срабатывания.



Рис. 1. – Конструкция из алюминиевого профиля

На рисунке 2 изображена блок-схема, наглядно демонстрирующая алгоритм процедуры калибровки.

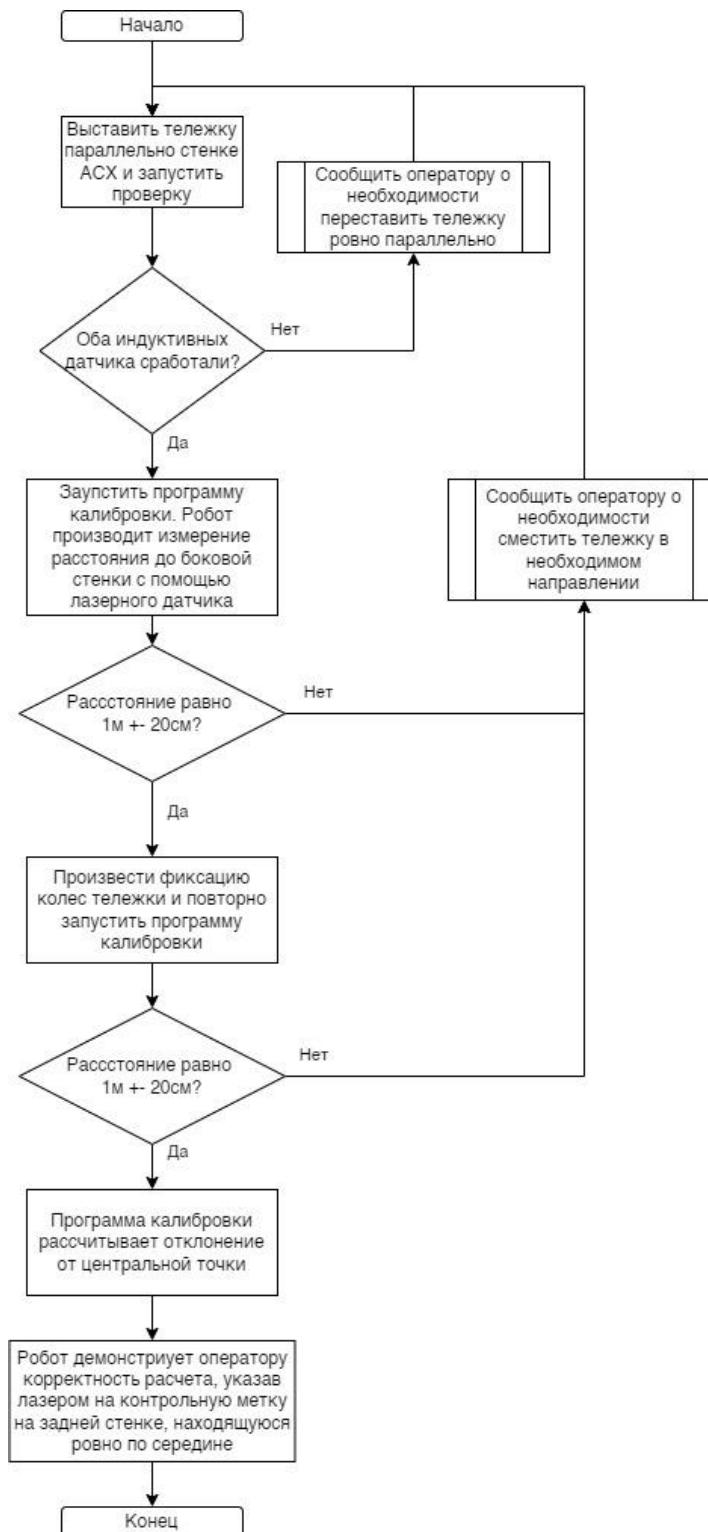


Рис. 2. – Блок-схема алгоритма калибровки

На этапах приблизительного ориентирования и завершающей проверки робот применяет специализированный гриппер, который служит исключительно для калибровки и не выполняет функции захвата. Этот гриппер изображен на рисунке 3. На гриппере установлен аналоговый лазерный датчик, обладающий высокой линейностью и погрешностью не более 5 мм при максимальном удалении [8]. Диапазон измерений датчика варьируется от минимального значения, не превышающего 300 мм, до максимального, не менее 1200 мм. Это позволяет датчику проводить точные измерения на различных расстояниях, соответствующих рабочему пространству робота в складской зоне, и поддерживать требуемую точность позиционирования. Примером такого датчика может являться лазерный датчик расстояния Sick OD2000-7002T15. Диапазон его измерений находится в пределах от 200 до 1200 мм, линейность на расстоянии 700..1200 мм находится на уровне ± 3 мм, а на расстоянии 200..700 мм – всего лишь ± 1 мм. Повторяемость данного датчика находится на уровне 100 микрон.



Рис. 3. – Гриппер для калибровки с лазерным датчиком

Эти инструменты обеспечивают высокоточный процесс калибровки, упрощая выполнение всех этапов и минимизируя необходимость участия оператора при стандартных процедурах настройки.

Программная составляющая процесса калибровки играет ключевую роль в обеспечении точности и адаптивности робота при его работе на складе. Помимо заложенных в робота базовых движений, процесс калибровки интегрирован с цифровым двойником, который моделирует положение и действия робота в реальном времени.

В соответствии с данными цифрового двойника, в центральном положении лазерный датчик робота должен фиксировать расстояние в 500 мм, пересчитанное из аналогового сигнала. Программа робота считывает показания датчика, преобразуя вольтовые значения в реальные данные о расстоянии [9]. При выявлении отклонений от установленного центрального положения программа рассчитывает величину смещения относительно оси Y. Это смещение затем преобразуется в корректировочный параметр, называемый *offset*, который интегрируется в дальнейшие действия робота. Однако, если смещение составит более 200мм, то в процессе калибровки оператору будет выведено предупреждение о необходимости сместить тележку в сторону, противоположную сильному отклонению (направление будет указано на экране, в зависимости от направления текущего смещения).

Параметр *offset* обеспечивает адаптацию траекторий движения робота, корректируя его положение с учётом ранее обнаруженного смещения [10]. Таким образом, даже при возникновении небольших отклонений в расположении тележки, система программно компенсирует эти ошибки, что позволяет поддерживать стабильную точность при выполнении захватов и перемещений на складе без необходимости повторной ручной калибровки.

Литература

1. Соловьев П.Р., Савина Л.Ю., Захаркина С.В., Масанов С.В., Рыжкова Е.А.. Разработка системы управления квадрокоптером в SimMechanics. Инженерный вестник Дона. 2023. №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8906.
 2. Гаврилов А.И., Тун Мин Мин, Аунг Ситу Со, Аунг Тхет. Адаптивная система управления сварочным оборудованием. Инженерный вестник Дона. 2014. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2385.
 3. Kuhl Michael E., Bhisti Rukshar, Bhattathiri Sriparvathi Shaji, Li Maojia P. Warehouse Digital Twin: Simulation Modeling and Analysis Techniques. 2022 Winter Simulation Conference (WSC). 2022. URL: ieeexplore.ieee.org/document/10015265
 4. Li Xin, He Bin, Zhipeng Wang, Yanmin Zhou, Li Gang. Digital Twin-Driven Task Replanning Method for Robot-Environment Physical Interaction. 12th International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Baishan. IEEE. 2022. С. 407-412
 5. Wu Zhenyong, Wang Yuan, Wu Hanzhao, Zhang Wei, Zhou Rong. Digital Twin-Driven Design and Optimization Method for Smart Warehouse. Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference. 2022. URL: informs-sim.org/wsc22papers/298.pdf
 6. Deogratias Kibira, Shao Guodong, Ventekesh Rishabh. Building a Digital Twin of an Automated Robot Workcell. Annual Modeling and Simulation Conference (ANNSIM). 2023. URL: tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=936285
 7. Kuts Vladimir, Marvel Jeremy A., Aksu Murat, Pizzagalli Simone L., Sarkans Martinš, Bondarenko Yevhen, Tauno Otto. Digital Twin as Industrial Robots Manipulation Validation Tool. MDPI Robotics. 2022. URL: doi.org/10.3390/robotics11050113
-

8. Батранюк И.А., Шемет Д.В. Взаимодействие коллаборативных роботов при совместной работе с людьми и другими роботами. Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2021. С. 492-495.

9. Belokopytov, M. D. Collaborative Robots. Proceedings of Young Scientists and Specialists of Samara University. 2022. № 2(21). С. 160-164.

10. Карпов, В. Э. Сигнальная коммуникация для управления поведением коллаборативного робота. Мехатроника, автоматизация, управление. 2023. Т. 24, № 5. С. 260-268.

References

1. Solov`ev P.R., Savina L.Yu., Zaxarkina S.V., Masanov S.V., Ry`zhkova E.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8906.

2. Gavrilov A.I., Tun Min Min, Aung Situ So, Aung Txet. Inzhenernyj vestnik Dona. 2014. No. 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2385.

3. Kuhl Michael E., Bhisti Rukshar, Bhattathiri Sriparvathi Shaji, Li Maojia P. Warehouse Digital Twin: Simulation Modeling and Analysis Techniques. 2022 Winter Simulation Conference (WSC). 2022. URL: ieeexplore.ieee.org/document/10015265.

4. Li Xin, He Bin, Zhipeng Wang, Yanmin Zhou, Li Gang. Digital Twin-Driven Task Replanning Method for Robot-Environment Physical Interaction. 12th International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Baishan. IEEE. 2022. pp. 407-412

5. Wu Zhenyong, Wang Yuan, Wu Hanzhao, Zhang Wei, Zhou Rong. Digital Twin-Driven Design and Optimization Method for Smart Warehouse. Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference. 2022. URL: informs-sim.org/wsc22papers/298.pdf.

6. Deogratias Kibira, Shao Guodong, Ventekesh Rishabh. Building a Digital Twin of an Automated Robot Workcell. Annual Modeling and Simulation



Conference (ANNSIM). 2023. URL:
tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=936285.

7. Kuts Vladimir, Marvel Jeremy A., Aksu Murat, Pizzagalli Simone L., Sarkans Martinš, Bondarenko Yevhen, Tauno Otto. Digital Twin as Industrial Robots Manipulation Validation Tool. MDPI Robotics. 2022. URL: doi.org/10.3390/robotics11050113.

8. Batranyuk I.A., Shemet D.V. Aktual`ny`e problemy` aviacii i kosmonavtiki. 2021. P. 492-495.

9. Belokopytov, M.D. Collaborative Robots. Proceedings of Young Scientists and Specialists of Samara University. 2022. No. 2(21). pp. 160-164.

10. Карпов, В. Е`. Мехатроника, автоматизация, управление. 2023. Т. 24, № 5. pp. 260-268.

Дата поступления: 20.10.2024

Дата публикации: 9.12.2024