

АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОГРЕШНОСТЕЙ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РОБОТОВ

Чжу Лянлян

chzhul@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Проанализированы причины, влияющие на точность позиционирования роботов. На основании различных стандартов составлена классификация погрешностей позиционирования. Рассмотрены два основных способа повышения точности позиционирования робота: предотвращение погрешностей и компенсация погрешностей, охарактеризованы условия их применения. В рамках указанных способов выполнен обзор методов, обеспечивающих точность позиционирования робота, проанализированы условия их применения, обобщены преимущества и недостатки каждого метода. Результаты исследования закладывают основу для дальнейшей разработки алгоритмов устранения погрешностей позиционирования роботов, а также для проектирования высокоточных роботов и повышения точности позиционирования существующих роботов.

Ключевые слова

Точность робота, погрешности позиционирования робота, предотвращение погрешностей, компенсация погрешностей, технология управления обратной связью онлайн-обнаружения, технология автономной калибровки, калибровка кинематических моделей робота, калибровка физических ограничений робота, безмодельная технология калибровки

Поступила в редакцию 23.05.2022

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022

Введение. С развитием производства и ускорением процесса модернизации обрабатывающей промышленности в современных индустриальных державах роботы широко используются в таких областях, как автомобилестроение, пищевая промышленность, аэрокосмическая промышленность, медицина и т. д. После десятилетий развития робототехники роботы начали внедряться в сферу, требующую высокой точности, например, хирургические операции, сборка самолетов и т. д. Для качественного выполнения этих операций выдвигаются более высокие требования к точности позиционирования роботов.

Принято выделять два основных вида точности роботов: абсолютную точность позиционирования и точность повторного позиционирования. Обычно промышленные роботы обладают высокой точностью повторного позиционирования и невысокой абсолютной точностью [1]. Низкая абсолютная точность позиционирования промышленных роботов часто не может удовлетворить производственные потребности в ситуациях, когда требуется высокая точность позиционирования. В связи с этим необходимо повысить абсолютную точность позиционирования робота. Для этого необходимо сначала проанализировать причины, влияющие на точность позиционирования робота.

Анализ причин, влияющих на точность позиционирования роботов. Точность роботов определяется погрешностями позиционирования характеристической точки ТСП (англ. *Tool Center Point* — центральная точка инструмента) и погрешностями ее угловой ориентации. [2]. Погрешности позиционирования определяются технологическими отклонениями размеров звеньев, зазорами в кинематических парах и механизмов приводов, деформациями (упругими и температурными) звеньев, погрешностями системы управления и датчиков обратной связи и т. п. [3]. В соответствии с разными стандартами существуют разные классификации погрешностей позиционирования роботов.

По характеристикам погрешностей можно выделить три основных категории [4]: определенные погрешности (например, геометрические погрешности), погрешности изменения во времени (например, тепловая деформация, вызванная температурой) и стохастические погрешности (например, колебания внешней среды).

По видам факторов, вызывающих погрешности позиционирования исполнительного органа робота, погрешности подразделяются на обусловленные факторами, связанными с параметрами (ошибка параметров в кинематической модели); факторами, связанными с нагрузкой (например, деформация, вызванная гибкостью звена); факторами, связанными со считыванием (например, точность считывания кодовых дисков суставов робота); факторами, связанными с окружающей средой (влияние температуры, влажности и т. д.).

По источнику погрешностей системы выделяют в основном отклонение размеров деталей, погрешности установки и погрешности, возникающие во время эксплуатации робота (погрешности передачи, деформации и т. д.). Основными факторами погрешности являются плохое качество изготовления и сборки деталей, износ рабочих поверхностей компонентов и зазор в шарнирах, силовая деформация и тепловая деформация компонентов робота [5].

По форме выражения погрешности можно подразделить на геометрические и негеометрические.

По моделям управления можно подразделить на погрешности, связанные с кинематической моделью и динамической моделью.

В большинстве случаев факторы, влияющие на точность позиционирования робота, можно подразделить на две категории: статические (квазистатические) факторы и динамические факторы [1, 6].

Статические факторы означают, что они остаются постоянными в течение всего движения робота [1]. К статическим факторам в основном относятся геометрические погрешности, погрешности, вызванные факторами окружающей среды, и погрешность системы управления.

1. Геометрические погрешности означают погрешности изготовления элементов и деталей механизма и погрешности сборки роботов (отклонение разме-

ров деталей, погрешность установки), которые приводят к несоответствию действительной и номинальной величин кинематических геометрических параметров, таких как размеры звеньев или присоединенного угла, и влияют на геометрическую конфигурацию робота. Геометрические погрешности включают погрешность присоединенного угла $\Delta\theta_i$, погрешность линейного смещения Δa_i , погрешность расстояния между пересечением оси Z_{i-1} с осью X_i (Δd_i), погрешность углового смещения $\Delta\alpha_i$ и т. д. [7]. Погрешность сустава также является очень важной геометрической погрешностью. Погрешность сустава в основном включает в себя погрешность, собственную суставов, погрешность присоединенного угла из-за износа кинематических пар [8] и погрешность передачи в движении суставов. Кроме того, люфт в шарнирах также повлияет на точность позиционирования робота.

2. Погрешности, вызванные факторами окружающей среды, включают в себя тепловые погрешности, погрешность, вызванная влажностью или электрическим шумом, погрешность вибрации и другие стохастические погрешности. Например, длительная эксплуатация приведет к износу механической структуры робота. Изменение температуры рабочей среды робота вызовет деформацию звена робота. Все эти погрешности станут причиной изменения кинематических параметров робота, что повлияет на его точность.

3. Погрешности системы управления включают в себя погрешности, связанные с алгоритмами управления и методами программирования: погрешность интерполяции, погрешность сервосистемы, погрешность элемента обнаружения (датчика) и т. д. — все это влияет на точность системы управления.

Под **динамическими факторами** понимают факторы, которые изменяются со временем в течение всего периода движения робота [1]. Динамические факторы в основном связаны с вибрацией или упругой деформацией звеньев и суставов робота, вызванной такими факторами, как сила инерции, внешняя сила и собственный вес [1]. При нагрузке внешняя сила может привести к упругой деформации механизма робота. В процессе ускоренного движения чрезмерная сила инерции также вызовет деформацию механизма робота. Таким образом, чтобы устранить погрешность, вызванную упругой деформацией, робот должен работать с подходящим ускорением во время движения, что достигается путем планирования значений ускорения и измерения конечных точек и их компенсации в системе числового программного управления [9].

По результатам анализа источников погрешностей позиционирования робота видно, что статическая погрешность и динамическая погрешность являются основными факторами, влияющими на точность позиционирования робота, когда температура окружающей среды не сильно меняется, в то время как статическая погрешность является основной причиной, влияющей на точность позиционирования робота, что составляет 70 % общей погрешности [10].

Методы обеспечения точности позиционирования робота. Существуют два основных способа обеспечения точности позиционирования робота: предотвращение погрешностей [2, 6] (проектирование точности [11]) и компенсация погрешностей.

Предотвращение погрешностей заключается в создании модели погрешностей структурных параметров на этапах проектирования и изготовления робота и использовании подходящих критериев проектирования для разумного распределения погрешностей каждого структурного параметра системы, чтобы определить допуск каждого компонента в процессе производства и максимально повысить точность сборки и системы управления для обеспечения точности позиционирования робота [1, 2, 6, 11].

С целью обеспечения точности робота при проектировании конструкции в основном учитываются следующие моменты: выбор высокоточных датчиков и способов привода, меры по устранению зазора между компонентами и т. п. Можно использовать следующие методы для предотвращения погрешностей: структурный и параметрический синтез, устранение погрешности передачи, коррекцию «на люфт» в шарнирах, компенсацию тепловых деформаций, применение датчиков с более высокой разрешающей способностью, более совершенных двигателей и редукторов, избежание погрешностей обработки и применение высокоточной сборки и т. д.

Повышение качества изготовления деталей механизма и общей точности сборки может устранить часть погрешностей, остальные погрешности могут быть компенсированы без изменения аппаратного обеспечения механизма робота кинематической калибровкой и т. п. [2, 12].

При практической эксплуатации, учитывая такие факторы, как себестоимость производства и время изготовления, часто нежелательно проектировать робота с нуля, поэтому повышение точности робота без изменения его механизма является важной задачей. В этом случае необходимо использовать метод компенсации точности для устранения погрешностей позиционирования робота.

Суть **компенсации погрешностей** заключается в компенсации исходной погрешности текущего промышленного робота путем искусственно сгенерированной погрешности.

Современные средства компенсации точности можно подразделить на технологию управления обратной связью онлайн-обнаружения и технологию автономной калибровки (Offline calibration technology). Технология управления с обратной связью онлайн-обнаружения включает в себя технологию компенсации точности с полным замкнутым контуром на основе концевой обратной связи и технологию компенсации точности с полузамкнутым контуром на основе суставной обратной связи [7].

1. Технология управления с обратной связью онлайн-обнаружения. Технология компенсации точности с полным замкнутым контуром на основе концевой

вой обратной связи позволяет значительно повысить абсолютную точность позиционирования робота. Основная идея состоит в добавлении внешнего датчика на конечном звене робота, чтобы в режиме реального времени возвращать действительное положение конечного звена робота. Таким образом, можно получить погрешности позиционирования конечного звена робота и быстро их исправить с помощью алгоритма компенсации погрешности. Это образует полное замкнутое управление [4, 7, 12, 13].

В настоящее время часто используются следующие внешние датчики: лазерный датчик перемещения, электро-вихретоковый датчик, емкостный датчик, система машинного зрения, система измерения и позиционирования рабочего пространства (Workspace Measuring and Positioning System) и т. д. [12].

Максимальная точность, которая может быть достигнута после компенсации, в основном определяется точностью измерения внешнего измерительного оборудования и минимальной разрешающей способностью самого робота, а точность измерения внешнего измерительного оборудования намного превышает точность позиционирования робота, поэтому данный метод теоретически обладает наиболее высокой точностью среди всех методов. Абсолютная точность позиционирования для этого метода управления часто может достигать 0,1 мм или выше. Недостатками метода являются высокие требования к оборудованию и стратегиям управления, высокие затраты, сложные процессы внедрения и обслуживания [4], а также то, что их легко ограничить условиями на месте (такими как укрытие, освещение и т. д.).

Технология компенсации точности с полузамкнутым контуром на основе суставной обратной связи в основном использует схему внешнего вторичного кодера для повышения абсолютной точности роботов [7]. Полузамкнутое управление означает наличие замкнутой обратной связи между входным элементом и входным суставом, которая обеспечивает точность ввода. Для всех механизмов, хотя точность входного элемента гарантирована данным методом, из-за наличия источников погрешностей на конечно звене механизма все еще присутствуют погрешности, которые не могут быть устранены [12]. Этот метод позволяет в максимальной степени устранить погрешности роботов в суставах (погрешность гибкости, погрешность зазора шестерни, погрешность управления движением двигателя и т. д.), которые трудно устранить кинематической калибровкой, теоретически их точность компенсации уступает только технологии компенсации точности с полным замкнутым контуром на основе концевой обратной связи [7].

2. Технология автономной калибровки (Offline calibration technology).

Технология автономной калибровки заключается в создании автономной модели погрешности положения и позы или библиотеки пространственных погрешностей. Кроме того, предварительно задаются данные компенсации в алгоритме управления. Компенсированный робот не нуждается в помощи внешнего обо-

рудования для выполнения фактической операции, поэтому данная технология обладает высокой адаптивностью и универсальностью [13].

Roth [14] и другие ученые разделили калибровку робота на три уровня:

а) *суставный уровень*. Найти соотношение между действительным значением угла поворота сустава и выходным значением кодера суставов;

б) *кинематический уровень*. Калибровка полной кинематической модели робота, включая геометрические параметры робота или негеометрические параметры, описывающие гибкости суставов робота;

в) *некинематический уровень*. Калибруются инерционные характеристики каждого шатуна робота, погрешность гибкости каждого сустава, зазор механизма привода, трение и т. д.

Калибровка на кинематическом уровне обычно включает калибровку на суставном уровне. Их также называют калибровкой кинематических моделей робота (или статической калибровкой).

Технология калибровки погрешности робота по принципу калибровки или методу измерения может быть подразделена на калибровку кинематических моделей робота, некинематическую калибровку робота и калибровку физических ограничений робота [1].

1. Калибровка кинематических моделей робота. На практике широко используется калибровка кинематических моделей робота. Данный метод означает использование передовых методов измерений для идентификации реального значения каждого параметра в кинематической модели робота в соответствии с характеристиками его погрешности, а затем изменение параметров в контроллере робота или путем добавление определенных алгоритмов внешнего управления для повышения точности [4, 6].

Калибровку кинематических моделей робота можно подразделить на четыре этапа: кинематическое моделирование робота и моделирование погрешностей позиционирования робота, измерение погрешности в конце робота, идентификация параметров и компенсация погрешностей. Погрешность измерений может быть получена от внешних измерительных приборов или от внутренних датчиков робота, в связи с чем калибровка кинематических моделей также может быть классифицирована как внешняя и внутренняя калибровка.

Метод калибровки кинематических моделей робота в основном предназначен для калибровки геометрических погрешностей робота и игнорирования негеометрических погрешностей параметра, потому что они невелики (около 20 % общих погрешностей), поэтому повышенная точность позиционирования робота данным методом ограничена.

2. Некинематическая калибровка робота (безмодельная технология калибровки). Только калибровка геометрических погрешностей робота недостаточна для удовлетворения требований высокоточной обрабатывающей про-

мышленности к точности робота. Следовательно, необходимо учитывать влияние негеометрических факторов на позиционирование робота и компенсировать негеометрические погрешности. Однако негеометрические факторы сложно меняются во время движения робота, и влияние их на точность позиционирования робота является неопределенным, поэтому точно описать их с помощью создания математической модели очень сложно.

Некинематическая калибровка робота заключается в том, чтобы описывать кинематические погрешности робота с помощью приближенного метода и реализовать оценку и компенсацию погрешностей позиционирования целевого положения путем построения соотношения отображения погрешностей. Это позволяет избежать сложного процесса моделирования погрешностей робота и решать проблему неточной идентификации параметров калибровки кинематических моделей робота. Основная идея состоит в том, чтобы рассматривать систему робота как «черный ящик», без учета конкретного механизма действия источника погрешностей робота, и изучать только взаимосвязь отображения между погрешностями конечного позиционирования и теоретическим положением робота или углом сустава, а также создать библиотеку погрешностей позиционирования робота, чтобы компенсировать его погрешности [1].

В соответствии с различными принципами калибровки некинематическую калибровку роботов можно подразделить на три категории: калибровка погрешностей позиционирования робота на основе подгонки кривой, калибровка погрешностей позиционирования робота на основе пространственной интерполяции и калибровка погрешностей позиционирования робота на основе нейронной сети.

Некинематическую калибровку робота в принципе можно рассматривать как метод численной оценки, чем больше используемых данных, тем выше точность калибровки.

3. Калибровка физических ограничений робота. Как калибровка кинематических моделей робота, так и некинематическая калибровка робота требуют высокоточного внешнего измерительного оборудования для измерения погрешности позиционирования конца робота. Кроме того, для управления программным обеспечением измерения требуется квалифицированный персонал, поэтому его использование в некоторых случаях ограничено. Чтобы решить эту проблему, исследователи предложили метод калибровки физических ограничений робота, который может завершить калибровку робота без какого-либо оборудования. Основная идея заключается в том, что конечное звено робота находится в контакте с физическими ограничениями, такими как шары и плоскости, для построения уравнения ограничения. Затем устанавливают модель погрешностей робота на основе уравнения ограничения и выполняют калибровку параметров робота в соответствии с данной моделью [1].

Заключение. Существует множество причин, влияющих на точность позиционирования робота, среди которых статическая и динамическая погрешности являются основными. Среди двух способов обеспечения точности позиционирования робота метод предотвращения погрешностей отличается обеспечением точности позиционирования робота за счет рационального проектирования конструктивных параметров робота на этапах проектирования и изготовления робота. Если нежелательно проектировать робот с нуля, можно использовать метод калибровки погрешностей.

Литература

- [1] Tian W., Liao W. Accuracy compensation technology and application of industrial robot. Science Press, 2019.
- [2] Feng M. Research on high precision 3-PPSR Parallel micro-manipulator. Master tech. sci. diss. Harbin, Harbin Institute of Technology, 2009.
- [3] Баланев Н.В., Янов Р.А. Анализ факторов, влияющих на точность позиционирования промышленного робота и методы обеспечения заданной точности. *Достижения науки и образования*, 2016, № 1, с. 11–14.
- [4] Mei D. Compensation method of 6R industrial robot positioning accuracy. Master tech. sci. diss. Nanjing, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics.
- [5] Ma L., Yu Y., Cheng W. et al. Positioning error compensation for a parallel robot based on BP neural networks. *Optics and Precision Engineering*, 2008, vol. 16, no. 5, pp. 878–883.
- [6] Zhou W. Compensation method of industrial robot accuracy and experimental research for aircraft automated assembly. Cand. tech. sci. diss. Nanjing, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [7] Hong P. Robot flexible automatic drilling and riveting integrated control technology based on accuracy compensation application. Master tech. sci. diss. Nanjing, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [8] Wen R. Research on error sources analysis and dynamic simulation of 6-DOF measurement robot. Master tech. sci. diss. Xi'an, Xi'an University of Technology, 2008.
- [9] Zhao C. Experimental study of error compensation and calibration of an over-constrained five-DOF hybrid robot. Master tech. sci. diss. Yanshan, Yanshan University, 2019.
- [10] Shi C., Zhang T., Ding H. The development of accuracy research on the variable-axes numerical control machine tool. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2001, no. 4, pp. 8–10.
- [11] Huang P. Reliability analysis and optimization design of industrial robot kinematic accuracy under mixed uncertainties. Cand. tech. sci. diss. Chengdu, University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [12] Zeng L. Research on the calibration method and control system of planar 3-RRR parallel mechanism. Master tech. sci. diss. Guangzhou, South China University of Technology, 2017.
- [13] Yin S. Research on the graded calibration and accuracy maintenance technique for industrial robot. Cand. tech. sci. diss. Tianjin, Tianjin University, 2015.

- [14] Roth Z.S., Mooring B., Ravani B. An overview of robot calibration. *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 1987, vol. 3, no. 5, pp. 377–385. DOI: <https://doi.org/10.1109/JRA.1987.1087124>

Чжу Лянлян — аспирант кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Чжу Лянлян. Анализ причин погрешностей и методы повышения точности позиционирования роботов. *Политехнический молодежный журнал*, 2022, № 05(70). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-05-797>

ANALYSIS OF ERROR CAUSES AND METHODS TO IMPROVE ROBOT POSITIONING ACCURACY

Zhu Lianliang

chzhul@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The reasons affecting the positioning accuracy of robots are analyzed. Various standards are used to make a multidimensional classification of positioning errors. Two main ways to improve the accuracy of robot positioning are considered: error prevention and error compensation, and the conditions for their application are characterized. Within the framework of the mentioned methods, a review of the methods providing the accuracy of robot positioning is performed, the conditions of their application are analyzed, the advantages and disadvantages of each method are summarized. The results of the study provide a basis for the further development of algorithms for eliminating the positioning errors of robots, as well as for designing high-precision robots and improving the positioning accuracy of existing robots.

Keywords

Robot accuracy, robot positioning errors, error prevention, accuracy compensation, online detection feedback control technology, autonomous calibration technology, calibration of robot kinematic models, calibration of robot's physical constraints, model-free calibration technology

Received 23.05.2022

© Bauman Moscow State Technical University, 2022

References

- [1] Tian W., Liao W. Accuracy compensation technology and application of industrial robot. Science Press, 2019.
- [2] Feng M. Research on high precision 3-PPSR Parallel micro-manipulator. Master tech. sci. diss. Harbin, Harbin Institute of Technology, 2009.
- [3] Balanov N.V., Yanov R.A. Analysis of factors making effect on positioning accuracy of industrial robot and methods for providing given accuracy. *Dostizheniya nauki i obrazovaniya*, 2016, no. 1, pp. 11–14 (in Russ.).
- [4] Mei D. Compensation method of 6R industrial robot positioning accuracy. Master tech. sci. diss. Nanjing, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics.
- [5] Ma L., Yu Y., Cheng W. et al. Positioning error compensation for a parallel robot based on BP neural networks. *Optics and Precision Engineering*, 2008, vol. 16, no. 5, pp. 878–883.
- [6] Zhou W. Compensation method of industrial robot accuracy and experimental research for aircraft automated assembly. Cand. tech. sci. diss. Nanjing, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [7] Hong P. Robot flexible automatic drilling and riveting integrated control technology based on accuracy compensation application. Master tech. sci. diss. Nanjing, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [8] Wen R. Research on error sources analysis and dynamic simulation of 6-DOF measurement robot. Master tech. sci. diss. Xi'an, Xi'an University of Technology, 2008.

- [9] Zhao C. Experimental study of error compensation and calibration of an over-constrained five-DOF hybrid robot. Master tech. sci. diss. Yanshan, Yanshan University, 2019.
- [10] Shi C., Zhang T., Ding H. The development of accuracy research on the variable-axes numerical control machine tool. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2001, no. 4, pp. 8–10.
- [11] Huang P. Reliability analysis and optimization design of industrial robot kinematic accuracy under mixed uncertainties. Cand. tech. sci. diss. Chengdu, University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [12] Zeng L. Research on the calibration method and control system of planar 3-RRR parallel mechanism. Master tech. sci. diss. Guangzhou, South China University of Technology, 2017.
- [13] Yin S. Research on the graded calibration and accuracy maintenance technique for industrial robot. Cand. tech. sci. diss. Tianjin, Tianjin University, 2015.
- [14] Roth Z.S., Mooring B., Ravani B. An overview of robot calibration. *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 1987, vol. 3, no. 5, pp. 377–385. DOI: <https://doi.org/10.1109/JRA.1987.1087124>

Zhu Liangliang — PhD student, Department of Computer Systems of Production Automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Zhu Liangliang. Analysis of error causes and methods to improve robot positioning accuracy. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2022, no. 05(70). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-05-797.html> (in Russ.).