

КОРРЕКЦИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ОШИБКИ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

А.А. Рыбалкин

Санкт-Петербургский государственный университет
Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9
E-mail: st061287@student.spbu.ru

Д.В. Шиманчук

Санкт-Петербургский государственный университет
Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9
E-mail: d.shimanchuk@spbu.ru

Ключевые слова: робот-манипулятор, кинематическая цепь, измерительная система, управление, ПИД-регулятор, корректировка.

Аннотация: В работе рассматривается проблема применения промышленных роботов-манипуляторов на производстве для выполнения высокоточных операций. Дано описание алгоритма управления, который, используя результаты измерения от внешней измерительной системы, корректирует положение робота-манипулятора на основе известных вычислительных методов и методов регулирования для понижения погрешности позиционирования его рабочего инструмента. Исследованы различные схемы алгоритма управления. Представлены результаты применения реализованной системы управления на практике.

1. Введение

В промышленности повсеместно используются роботы-манипуляторы (далее по тексту – робот), которые за счет наличия шести степеней свободы имеют высокую подвижность. Это позволяет перемещаться в трудно доступные места и выполнять сложные технологические операции. К сожалению, из-за того, что кинематика роботов последовательная, то погрешность каждой оси накладывается друг на друга [4–6]. Кроме того, влияет также низкая жесткость конструкции роботов. В результате получается высокая погрешность для итогового позиционирования рабочего инструмента в пространстве: до 2 мм. В связи с этим невозможно использовать роботов в таких задачах, где требуются высокие точности обработки: до 0.1 – 0.2 мм. Для решения этих задач используются различные станки, которые дают необходимую точность. Однако станки имеют недостатки, например, ограниченные степени свободы, большие габариты установки, высокую стоимость, сложные пуско-наладочные работы. Более того, существуют задачи, для которых

требуется наличие сразу двух факторов – высокая точность позиционирования, как у станка, и высокая подвижность, как у робота. Для того, чтобы обеспечить данное условие можно использовать робототехнический комплекс (робот + контроллер + внешняя измерительная система), который будет измерять положение рабочего инструмента робота и корректировать его оси таким образом, чтобы он выдерживал требуемые погрешности [1–3].

2. Постановка задачи

Пусть имеется робот с соответствующей кинематической цепью. Робот в зависимости от неточности кинематики (параметров кинематической цепи) и динамики (динамики электроприводов, положения центров масс звеньев, значений их моментов инерции и т. д.) имеет погрешность позиционирования до 2 мм. При этом присутствует возможность управлять электроприводами робота с минимальной дискретизацией в осях 10^{-4} град и ему соответствует значение повторяемости до 60 мкм. Пусть также имеется внешняя измерительная система, способная измерять реальное положение инструмента робота с погрешностью порядка 10 мкм для декартовых координат и 10^{-4} град для ориентации.

Предполагая, что робот и внешняя измерительная система имеют фиксированное положение друг относительно друга, требуется построить систему управления робота с обратной связью, которую можно назвать внешней, для увеличения точности его позиционирования.

3. Построение внешней системы управления

Для построения корректирующего управления роботом требуется определить величину ошибки по углам вращения осей, а далее с помощью регулятора передать значения корректировки.

3.1. Численные методы вычисления ошибки позиционирования

На вход внешней системы управления подается два набора параметров положения – желаемое от интерполятора робота и измеренное от внешней измерительной системы. Требуется по этим параметрам определить величину ошибки по углам вращения осей. Для решения данной задачи были применены и было проведено сравнение двух подходов: с помощью линейного приближения, используя матрицу Якоби, и с помощью оптимизации, решая обратную задачу кинематики.

В первом случае строилась матрица частных производных для текущего положения осей робота, которая далее умножалась на вектор ошибки позиционирования: разность между параметрами позиционирования (разность между координатами, а также вращательный вектор от измеренного положения к желаемому). Таким образом получался вектор ошибки по углам вращения осей.

Второй случай состоит из двух этапов: определение положения, в которое необходимо скорректировать робота, и решение обратной задачи кинематики.

Для определения положения, в которое необходимо скорректировать робота, требуется определить переход от измеренного положения к желаемому и далее применить данный переход к текущему положению робота (где он находится по его мнению). Например, пусть робот хочет оказаться в положении 1000 мм по координате X . Он фактически находится в координатах 999.5 мм. Значит необходимо отправить робота в положение в 1000.5 мм, то есть переместить на 0.5 мм по данной координате. Можно понять, что из-за ошибки кинематики в необходимое положение робот сразу не попадет.

Для решения обратной задачи кинематики применяется оптимизационный подход: решается прямая задача кинематики по текущему положению осей робота, строится ошибка позиционирования с требуемым положением и далее с помощью метода Ньютона определяется, как изменить значения осей робота, чтобы эта ошибка уменьшилась. За 3 итерации метода результат гарантированно получается около ошибки округления – 10^{-8} .

После тестирования рассмотренных подходов на практике, второй метод показал более быструю скорость сходимости и устойчивость к расхождению. Однако он требует более высокой мощности предложенной системы управления для решения задачи в режиме реального времени.

3.2. Управление движением робота

Был рассмотрен метод управления движением, который принят в качестве отраслевого стандарта, – ПИД-регулятор. На вход управления подается ошибка по углам робота, получаемая с помощью предыдущего пункта, а на выход – корректировка для каждой оси. Схема системы управления приведена на рис. 1.

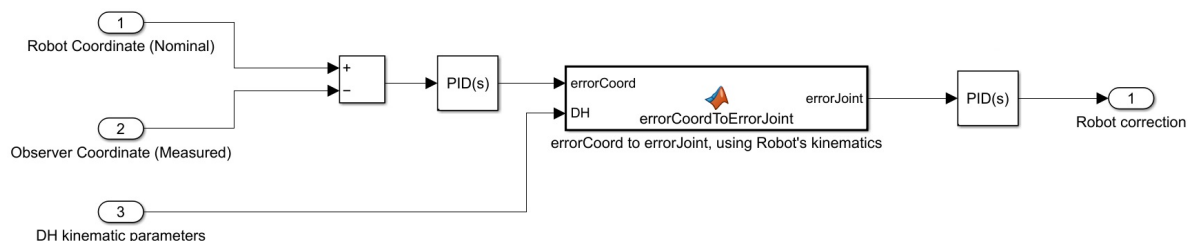


Рис. 1. Блок-схема системы управления

3.3. Модернизации алгоритма

Были проведены следующие модернизации представленной схемы алгоритма управления:

1. **Фильтрация измерений.** Одной из главных особенностей системы управления является фильтрация измерений от внешней измерительной системы. Большие внешние и внутренние погрешности (вибрация инструмента, вибрация робота) вызывают высокую ошибку корректировки, из-за которой робот выполняет колебания. Решением проблемы стало применение линейных фильтров. Было проведено сравнение двух видов фильтрации: со скользящим

средним и простейший фильтр Калмана. Так как оба фильтра вызывают запаздывание, при этом фильтр Калмана дает динамическое запаздывание, то применение данного фильтра невозможно на практике. В этом случае не представляется возможным синхронизировать координаты и ориентацию отфильтрованную и желаемую, полученную от интерполятора робота. При этом скользящее среднее дает фиксированное запаздывание, поэтому оно может быть применимо, если будет проведена следующая модернизация.

2. **Синхронизация данных.** В качестве модернизации была добавлена система автоматической синхронизации, которая сравнивает данные от робота и измерительной системы и «понимает», какие данные соответствуют одному и тому же моменту времени.
3. **Адаптация ПИД-регулятора и подбор коэффициентов.** Из-за шумов при практическом применении пришлось отказаться от дифференциальной составляющей. Кроме того, если в интегральную составляющую включить все предыдущие измерения, то вместо уменьшения ошибки, эта составляющая накапливает ошибку. Поэтому с помощью серии испытаний, было подобрано оптимальное количество предыдущих показаний, которые должны быть включены в интегральную составляющую. При подборе коэффициентов ПИД-регулятора были учтены особенности конструкции робота, а также вид управляющих программ. В частности, на рассматриваемом роботе присутствовал гидравлический балансир, у которого имелась задержка на реакцию корректировки.

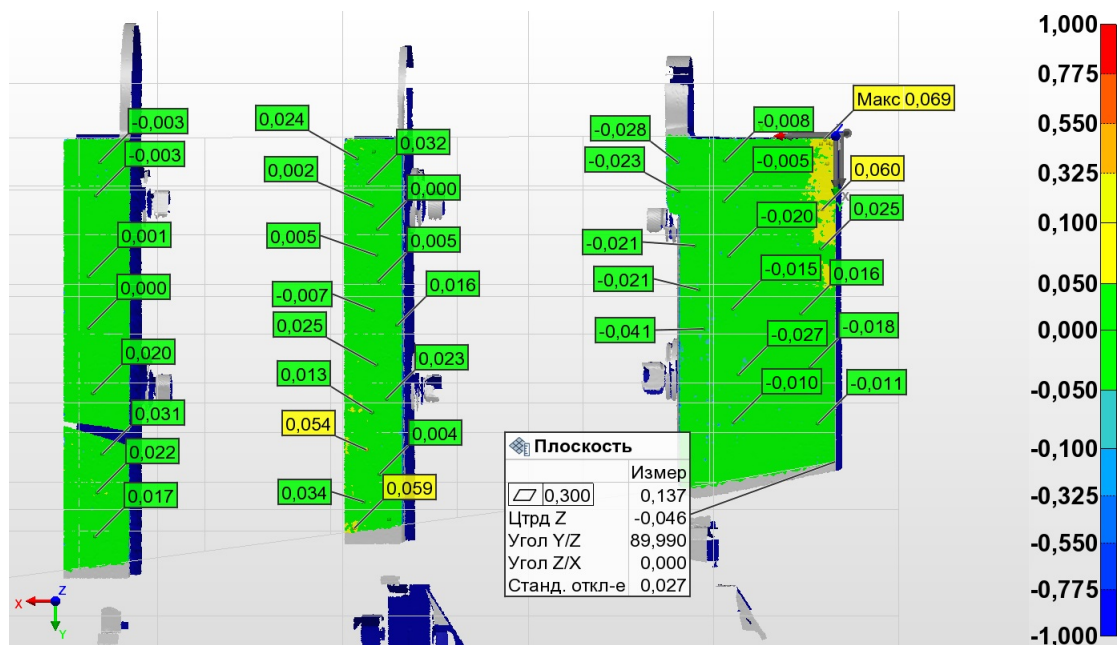


Рис. 2. Отклонение от номинальной модели и параметры получившейся плоскости

4. Применение системы управления на практике

Для тестирования предложенной системы управления была выполнена обработка различных материалов с помощью шпинделя, который выступал в качестве рабочего инструмента, с дальнейшей метрологической инспекцией результата. Основные типы выполняемых траекторий: линейные и круговые движения для обработки плоскостей, цилиндров, конусов. Все траектории движения робота с работающим шпинделем были проведены с предложенной системой управления в режиме реального времени. На рис. 2 представлены результаты обработки изделия – отклонения фактического результата обработки от номинальной 3D модели, где приведены параметры получившейся плоскости.

5. Заключение

Разработанная система управления позволяет перемещать робота по заданной траектории его инструмента с высокой точностью. При этом система управления учитывает возможные вибрации изделия и робота, шум измерений, а также особенность конструкции конкретного робота. Разработанная схема алгоритма показала работоспособность для таких операций, как фрезеровка, шлифовка, сверление, нарезка резьбы и лазерная резка. Система управления была реализована в рамках робототехнического комплекса, который применен в аэрокосмической отрасли. Кроме того, данная система управления будет поставлена на различные российские предприятия, поэтому исследования и разработки по данному направлению имеют высокую ценность.

В дальнейшем планируется исследовать алгоритмы, использующие классические методы управления с обратной связью и теорией устойчивости на основе математической модели (кинематическая и динамическая модели) робота. Кроме того, планируется добавить еще одну внешнюю измерительную систему – силовой датчик, который способен вычислять динамические параметры робота. Будет необходимо разработать математические методы управления, учитывающие данную измерительную систему.

Список литературы

1. Бабаджанянц Л. К., Пупышев Ю. А, Пупышева Ю. Ю. Классическая механика. Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2013. 259 с.
2. Гантмахер Ф. Р. Лекции по аналитической механике. М.: Наука, 1966. 300 с.
3. Лукас В. А. Теория автоматического управления: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1990. 416 с.
4. Рыбалкин А.А. Управление роботом-манипулятором в режиме реального времени с внешней измерительной системой в качестве наблюдателя // Процессы управления и устойчивость. 2023. Т. 10, № 1. С. 144-150.
5. Garcia L., Bielke U., Neumann C., et al. Online position correction approach of an industrial robot by using a new photogrammetric measurement system. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2022.
6. Zheng Wang, Runan Zhang, Patrick Keogh. Real-Time Laser Tracker Compensation of Robotic Drilling and Machining // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2020.