

В диссертационный совет 24.2.334.01
(Д 212.148.02)
при ФГБОУ ВО «Российский
биотехнологический университет
(РОСБИОТЕХ)»
125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11.

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, доцента **Кайченова Александра Вячеславовича** на диссертационную работу Крахмалева Олега Николаевича «Методология построения автоматизированных систем управления манипуляционными роботами на основе математического объектного моделирования», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» (технические науки).

Актуальность темы диссертационной работы

Автоматизация производств приобретает важное значение в связи с необходимостью повышения производительности труда. В условиях острой недостаточности трудовых ресурсов актуальным становится внедрение промышленных роботов при автоматизации технологических процессов.

Робототехнические системы представляют собой комплексы оборудования, предназначенного для автоматизации технологических процессов, и являются важной составной частью современных производств в различных отраслях, в частности, в пищевых производствах. В состав оборудования современных робототехнических комплексов входят: промышленные роботы, технологическое оборудование, вспомогательное оборудование и системы управления. Системы управления промышленными роботами должны быть интегрированы в автоматизированную систему управления технологическими процессами (АСУ ТП).

Контроллеры управления промышленными роботами используют программно-математическое обеспечение, в основе которого применяются математические модели, описывающие промышленные роботы как объекты управления. Разработка алгоритмов управления и математических моделей для решения функциональных задач управления промышленными роботами является актуальной задачей.

Таким образом, можно отметить, что тема диссертационной работы Крахмалева О.Н. «Методология построения автоматизированных систем управления манипуляционными роботами на основе математического объектного моделирования» обладает актуальностью в области разработки АСУ ТП.

Содержание работы

Рукопись диссертации содержит введение, четыре главы, заключение, литературу, содержащую 148 источников, и приложения, подтверждающие практическую значимость полученных в диссертации результатов.

Во введении дано обоснование актуальности диссертационной работы, определен объект исследования, сформулирована цель и поставлены задачи, выбраны методы исследования, обоснована научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту.

В главе 1 последовательно рассмотрены основные задачи и методы моделирования кинематики и динамики манипуляционных систем роботов.

Для описания преобразования координат в манипуляционных системах роботов введено новое понятие «геометрическая модель», содержащее множество матриц (4×4) преобразования однородных координат. Для составления геометрической модели предложено использовать метод двух связываемых систем координат, принципиально отличающийся от метода Денавита-Хартенберга (Denavit-Hartenberg), традиционно используемого в теоретической робототехнике, и описано соответствие между связываемыми системами координат и системами координат, используемыми для программирования движения промышленных роботов.

Представлены методы и алгоритмы решения прямой и обратной задач кинематики, обобщение которых позволило сформулировать методологию моделирования кинематики и концепцию построения кинематического управления манипуляционными роботами.

Составлены различные динамические модели манипуляционных систем роботов. На основе полученных динамических моделей могут быть решены как прямая, так и обратная задача динамики.

Разработана методологическая концепция моделирования динамики манипуляционных систем роботов.

В главе 2 рассмотрены способы параметризации геометрических моделей, позволяющие учитывать измеряемые геометрические отклонения, возникающие при изготовлении и сборке деталей манипуляционных систем.

Описан метод коррекции интегральных отклонений, представляющих собой отклонения траекторий движения характерных точек звеньев манипуляционных систем и отклонения ориентации самих звеньев от заданной (программной) траектории движения, вызванные наличием геометрических отклонений звеньев.

Для отражения влияния изменяющихся геометрических отклонений при моделировании манипуляционных систем разработаны и представлены динамические модели, учитывающие линейные отклонения центров шарниров и угловые отклонения, соответствующие перекоосу (скручиванию) шарниров. Исключение в полученных динамических моделях элементов тождественно равных нулю позволило повысить вычислительную эффективность их алгоритмов в несколько раз.

На основе метода малого параметра и декомпозиции исходного уравнения движения получена динамическая модель, позволяющая

анализировать медленные квазистатические отклонения и быстрые упругие колебания.

В главе 3 представлена методология математического объектного моделирования манипуляционных систем роботов, позволяющая моделировать основные задачи кинематики и динамики на основе представленных в работе методов.

В соответствии с разработанной концептуальной схемой моделирование кинематики строится на основе геометрической модели манипуляционных систем, а при моделировании динамики геометрическую модель необходимо дополнить инерционной моделью манипуляционной системы, описывающей распределение масс внутри звеньев, и моделью внешней нагрузки.

В главе 4 отражены аспекты практического применения объектного моделирования манипуляционных систем роботов.

Разработанная методология математического объектного моделирования позволяет создавать объектные схемы эквивалентные соответствующим математическим моделям. При этом выделяются части математических моделей, которым могут быть поставлены в соответствие объекты определённых классов. Такие части в свою очередь также могут состоять из других более простых частей-объектов. Составление объектных схем предложено выполнять в среде специально разработанной компьютерной программы, автоматизирующей этот процесс на основе визуального программирования.

Разработан и представлен алгоритм параллельных вычислений динамической модели манипуляционных систем роботов, в котором определен последовательный ряд уровней (ярусов) на которых выполняются параллельные вычисления и дана оценка количества процессоров, необходимых для обеспечения требуемых показателей эффективности алгоритма. Метод реализован на основе объектного представления динамической модели, что позволило реализовать независимые вычисления отдельных частей модели.

Перспективной составляющей разработанной методологии, отражающей ее объектно-ориентированную направленность, является разработанный метод целенаправленных структурных мутаций в моделях механизмов. Метод позволяет создавать приближённые математические модели манипуляционных систем путем модификации их математических моделей, полученных аналитическим способом.

В заключении дано краткое описание полученных в диссертационной работе результатов и сделан вывод о том, что сформулированная в диссертации цель достигнута.

Представленные в диссертации и автореферате материалы позволяют сделать вывод о том, что их содержание в целом соответствует цели и поставленным задачам. Рукописи диссертации и автореферата по содержанию, структуре и объёму соответствуют требованиям Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ.

Основные научные результаты диссертационной работы

В диссертационной работе Крахмалева О.Н. разработаны теоретические положения, которые в совокупности можно классифицировать как научное достижение, имеющее важное прикладное значение, содержащееся в следующих результатах:

- разработанной методологии математического объектного моделирования манипуляционных систем роботов, позволяющей создавать сложные математические объекты с использованием средств визуального программирования и выполнять параллельные вычисления их отдельных частей;

- предложенном научно обоснованном подходе к адаптации систем управления манипуляционными роботами, построенном на основе объектного моделирования путем декомпозиции создаваемых объектных схем в результате применения генетического алгоритма;

- описанном методе структурных мутаций, позволяющем распространить возможности генетического алгоритма на задачи модификации объектных схем, соответствующих математическим моделям манипуляционных систем роботов;

- разработанных методах диагностики кинематических структур манипуляционных систем роботов, содержащих методы калибровки по положению характерных точек и по ориентации звеньев;

- разработанном методе параметризации номинальных геометрических моделей манипуляционных систем роботов, позволяющем учитывать первичные геометрические отклонения звеньев;

- разработанном численном методе коррекции интегральных отклонений движения манипуляционных роботов, учитывающем первичные геометрические отклонения, а также отклонения позиционирования звеньев;

- разработанном методе моделирования манипуляционных систем с упругими шарнирами при малых деформациях, возникающих в направлении изменения основных обобщённых координат, отвечающих за программные движения манипуляционных роботов;

- разработанном методе моделирования линейных и угловых отклонений манипуляционных систем роботов, в кинематической структуре которых могут быть использованы шарниры с различной степенью подвижности;

- разработанном алгоритме параллельных вычислений динамической модели манипуляционных роботов.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы

Предметная область исследования охватывает теоретическую механику, теорию механизмов и машин и теорию автоматического управления в приложении к исследованию многозвенных механизмов, относящихся к манипуляционным системам роботов. Обоснованность полученных в диссертационной работе научных результатов подтверждается

непротиворечивостью теоретических выводов, подкреплённых экспериментальными исследованиями.

Результаты исследований, вынесенные на защиту, в достаточной степени апробированы, многократно обсуждались на конференциях и семинарах. По теме диссертации опубликовано более 60 печатных работ, 4 монографии, 12 статей, индексируемых в Scopus и WoS, 16 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК, зарегистрировано 3 электронных ресурса и 2 компьютерные программы.

Научная новизна исследований заключается в том, что:

- представлена методология математического объектного моделирования манипуляционных систем роботов;
- предложен научно обоснованный подход к адаптации систем управления манипуляционными роботами;
- разработаны методы: диагностики кинематических структур манипуляционных систем роботов, параметризации номинальных геометрических моделей манипуляционных систем роботов, коррекции интегральных отклонений движения манипуляционных систем роботов, моделирования манипуляционных систем с упругими шарнирами при малых деформациях, моделирования линейных и угловых отклонений в динамике манипуляционных систем роботов с шарнирами с различной степенью подвижности;
- разработан алгоритм на основе параллельных вычислений динамической модели манипуляционных систем роботов с использованием матричных алгоритмов.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

Представленная в диссертационной работе методология математического объектного моделирования манипуляционных систем роботов позволяет создавать автоматизированные системы управления инвариантные к различным моделям промышленных роботов и манипуляционных роботов, составляемых из отдельных модулей.

Разработанный метод параметризации номинальных геометрических моделей манипуляционных систем роботов на основе первичных геометрических отклонений, возникающих в конструкциях роботов при их изготовлении и эксплуатации и выявляемых метрологическими методами, позволяет повысить точность движения, выполняемого промышленным роботом.

Разработанные методы калибровки инструмента и базы расширяют функциональные возможности систем управления промышленными роботами необходимыми процедурами, обеспечивающими подготовку робота при его вводе в эксплуатацию после оснащения новым инструментом.

Представленные в диссертации методы и алгоритмы могут быть использованы для разработки математического обеспечения систем

управления манипуляционными роботами с различной кинематической структурой.

Результаты, полученные в диссертации, отражены в монографиях и учебных пособиях и внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлениям «Мехатроника и робототехника», «Автоматизация технологических процессов и производств», «Управление в технических системах» и др.

Личный вклад автора в разработку научной проблемы

Автором самостоятельно решена научная проблема, разработаны модели и алгоритмы, предложен подход, полученные результаты обработаны и проанализированы.

К диссертационной работе имеются замечания:

1. В разработанной автором методике построения геометрических моделей манипуляционных систем роботов использован метод двух связанных систем координат. В работе заявлено, что данный метод имеет преимущество по сравнению с традиционно используемыми методами в том, что позволяет разделить матрицы преобразования однородных координат на два множества, одно из которых не изменяется в процессе движения манипуляционной системы и зависит только от исходных данных. Данное преимущество не полностью раскрыто и обосновано.

2. В положении 7, выносимом на защиту (стр. 27), описана возможность получения прогноза, позволяющего адаптировать управление роботом. Из текста диссертации неясно, может ли такой прогноз использоваться для коррекции задания по перемещению.

3. В структурной схеме управления приводами (рис. 15, стр. 85) приведена динамическая модель двигателя. В качестве динамического элемента приведено типовое динамическое звено первого порядка. В тексте диссертации не приведены пояснения по виду моделируемого электродвигателя и обоснование использования в модели звена первого порядка.

4. Вторая глава посвящена разработке математических моделей, учитывающих первичные геометрические отклонения, возникающие при изготовлении и сборке манипуляционных систем роботов. В тексте диссертации не рассмотрены математические модели, учитывающие влияния изменения температуры окружающей среды, в то время как температурные изменения размеров могут превышать допуски на изготовления деталей машин.

5. Во второй главе приведена оценка точности динамической модели. Из текста диссертации неясно, соответствует ли полученное значение точности установленной величине или диапазону для таких объектов.

6. В третьей главе предложено рассматривать отдельные части математических моделей, соответствующие понятию «рода структуры» в

бурбаковском формализме. Однако сам формализм в работе не описан и нет ссылок на источники с описанием этого формализма.

7. В третьей главе рассмотрена методология математического объектного моделирования манипуляционных систем роботов, основывающаяся на концептуальной схеме моделирования (рис. 3.1, стр. 177), отличающейся от рассмотренной ранее концептуальной схемы построения управления (рис. 16, стр. 86) отсутствием динамических моделей приводов. Следовало бы дать комментарии такому упрощению, поскольку именно сервоприводы являются исполнительными элементами в автоматизированных системах управления манипуляционными роботами.

8. В четвертой главе рассмотрена постановка задачи генетического программирования в задачах моделирования манипуляционных систем роботов. В работе подробно описан только метод структурных мутаций, в то время как для реализации генетического алгоритма помимо мутации необходима реализация и других операторов этого алгоритма. Кроме того, не дано рекомендаций по выбору фитнес-функций для решения задач структурной оптимизации манипуляционных систем.

9. В четвертой главе диссертации для практической реализации параллельных вычислительных алгоритмов автором предлагается использование многокристальных реконфигурируемых вычислительных систем, созданных на основе применения программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). В тексте диссертации не приведена оценка возможной производительности таких схем при реализации параллельных вычислительных алгоритмов и методов синхронизации работы кристаллов.

Указанные недостатки, в целом, не снижают научной ценности и практической значимости диссертационной работы.

Заключение по диссертации

На основании проведенного анализа представленной на оппонирование диссертационной работы Крахмалева О.Н. «Методология построения автоматизированных систем управления манипуляционными роботами на основе математического объектного моделирования» можно заключить, что данная диссертация является законченным научным трудом, который можно квалифицировать как значимое научное достижение для решения важных социально-экономических задач. Оппонируемая работа по актуальности, объему проведенных исследований, научно-методическому уровню и полученным результатам соответствует паспорту научной специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами», требованиям п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 26.10.2023 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

Считаю, что автор диссертационной работы «Методология построения автоматизированных систем управления манипуляционными роботами на

основе математического объектного моделирования» Крахмалев Олег Николаевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

Заведующий кафедрой автоматики и вычислительной техники ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет», доктор технических наук (2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»), доцент



А.В. Кайченев

«7» декабря 2023г.

183010, Мурманск, ул. Спортивная, д.13

+7(8152)40-33-78

E-mail: kaychenovav@mstu.edu.ru

Подпись заведующего кафедрой автоматики и вычислительной техники, доктора технических наук, доцента Кайченова Александра Вячеславовича заверяю:

Ученый секретарь ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет»



Т.В. Пронина

«7» декабря 2023г.