

В диссертационный совет
24.2.334.01 (Д212.148.02)
при ФГБОУ ВО «Российский
биотехнологический университет
(РОСБИОТЕХ)»

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, доцента Шкапова Павла Михайловича на диссертационную работу Крахмалева Олега Николаевича на тему: «Методология построения автоматизированных систем управления манипуляционными роботами на основе математического объектного моделирования», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Актуальность диссертационной работы

Управление манипуляционными роботами строится на основе программно-математического обеспечения, в основе которого используются математические модели. Применение объектно-ориентированного подхода позволяет представить структуру математических моделей в виде объектных схем, отражающих объекты, составляющие математические модели, и связи между ними.

Использование элементов компьютерной графики позволяет при создании объектных схем реализовать визуальное программирование математических моделей, что является актуальной задачей, так как обеспечивает автоматизацию процесса разработки программно-математического обеспечения.

Методы построения динамических моделей манипуляционных систем роботов, до настоящего времени, ориентировались на создание эффективных вычислительных алгоритмов решения обыкновенных дифференциальных уравнений. При оценке эффективности этих алгоритмов проводят сравнение количества совершаемых ими арифметических операций. Создание параллельных вычислительных алгоритмов повышает эффективность вычислений за счёт увеличения степени параллелизма таких алгоритмов. Поэтому разработка параллельных вычислительных алгоритмов является актуальной задачей.

При разработке математических моделей важно, чтобы используемые при этом методы и получаемые на их основе алгоритмы были бы объединены общим методологическим подходом. Это существенно упрощает внедрение получаемого программно-математического обеспечения в системы

управления манипуляционными роботами и позволяет успешно интегрировать их в современные АСУТП.

Разработка реконфигурируемых систем управления на основе использования функций самодиагностики позволяет решать актуальную задачу создания систем управления манипуляционными роботами с изменяющимися кинематическими структурами.

Содержание диссертационной работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель, определены задачи, выбраны методы исследования, обоснованы научная новизна и практическая значимость работы, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлено математическое описание геометрии манипуляционных роботов, построенное на основе матриц (4×4) преобразования однородных координат, составляющих множество для определения которого автором введено понятие – геометрическая модель манипуляционной системы.

Сформулирована концепция построения кинематического управления манипуляционными: объект управления – манипуляционный робот → геометрическая модель → моделирование кинематики → К-управление.

Для моделирования динамики манипуляционных роботов использован метод Лагранжа-Эйлера, в котором вычисление кинетической энергии основывается на использовании матриц инерции, моделирующих распределение масс внутри звеньев манипуляционных систем роботов. Множество таких матриц предложено рассматривать как инерционную модель манипуляционной системы.

Динамическая модель манипуляционного робота, помимо уравнений движения, включает и динамические модели приводов с учетом передаточных функций их редукторов.

Разработан алгоритм динамического управления: объект управления – манипуляционный робот → геометрическая модель + инерционная модель + модель внешней нагрузки + динамические модели приводов = полная динамическая модель → моделирование динамики → Д-управление.

Вторая глава посвящена моделированию геометрических отклонений имеющихся в конструкциях манипуляционных роботов и влияющих на их движение.

Для моделирования влияния геометрических отклонений, возникающих в манипуляционных системах роботов, было разработано несколько способов модификации их номинальных геометрических моделей, путем параметризации учитываемыми отклонениями. На основе использования параметризованных геометрических моделей предложен

метод компенсации интегральных отклонений, возникающих при движении манипуляционных роботов.

Дополнительно рассмотрены модели, позволяющие учитывать отклонения позиционирования, представляющие собой отклонения обобщённых (шарнирных) координат.

На основе разработанных методов модификации геометрических моделей была предложена учитывающая геометрические отклонения концепция кинематического управления манипуляционными роботами: объект управления манипуляционных систем \rightarrow номинальная геометрическая модель \times модификатор геометрических отклонений $=$ параметризованная геометрическая модель \rightarrow моделирование кинематики \rightarrow К-управление.

Разработаны математические модели для методов диагностики кинематического состояния манипуляционных систем роботов. Использование данных методов в системах управления манипуляционными роботами, позволит настраивать (калибровать) эти системы при оснащении манипуляционного робота новым инструментом.

Разработаны динамические модели, учитывающие линейные и угловые отклонения, возникающие в шарнирах манипуляционных систем роботов. В полученных динамических моделях были исключены элементы тождественно равные нулю, это позволило повысить вычислительную эффективность этих алгоритмов.

В третьей главе представлена методология математического объектного моделирования манипуляционных систем. В основе которой использовано объектное представление математических моделей, описывающих кинематику и динамику манипуляционных систем роботов. Разработанный в рамках методологии подход позволяет дополнить рассмотренные ранее концепции кинематического и динамического управления манипуляционными роботами, возможностью проведения структурной модификации геометрической и инерционной моделей их манипуляционных систем.

В четвёртой главе рассмотрены аспекты практического применения объектного моделирования манипуляционных систем роботов.

На основе разработанной методологии предложено создавать объектные схемы эквивалентные используемым математическим моделям, составленные из отдельных, независимых друг от друга частей-объектов. В свою очередь эти части также могут состоять из других более простых объектов.

Таким образом математическая модель может быть представлена в виде объектной схемы, состоящей из объектов, имеющих структуру определённых классов, реализуемых с использованием объектно-ориентированных языков программирования.

Для составления объектных схем разработан формализм, который содержит правила связывания объектов друг с другом и позволяющий автоматизирующей этот процесс на основе принципа визуального программирования в специально разработанной компьютерной среде.

Разработан многоуровневый алгоритм параллельных вычислений динамической модели манипуляционных систем роботов. На соответствующих уровнях этого алгоритма выполнено распараллеливание вычислений матричных операций.

В **заключении** диссертации обобщены полученные результаты и приведены краткие выводы.

Основные научные результаты диссертационной работы

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, базируются на результатах обширного теоретического анализа и имеющемся экспериментальном материале. Диссертант Крахмалев О.Н. в процессе исследований получил ряд новых научных результатов, среди которых следует отметить следующие:

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

- предложен научно обоснованный подход к адаптации систем управления манипуляционными роботами, построенными на основе объектного моделирования, путём декомпозиции соответствующих объектных схем в результате применения генетического алгоритма;

- описан метод структурных мутаций, позволяющий распространить возможности генетического алгоритма на задачи модификации объектных схем, соответствующих математическим моделям манипуляционных систем роботов;

- разработаны методы диагностики кинематических структур манипуляционных систем роботов, содержащие методы калибровки по положению характерных точек и по ориентации звеньев;

- разработан метод параметризации номинальных геометрических моделей манипуляционных систем роботов на основе первичных геометрических отклонений их звеньев;

- разработан численный метод коррекции интегральных отклонений движения манипуляционных роботов, учитывающий первичные геометрические отклонения, а также отклонения позиционирования звеньев;

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

- разработаны методы моделирования линейных и угловых отклонений манипуляционных систем роботов, в кинематической структуре которых могут быть использованы шарниры с различной степенью подвижности;
- разработан алгоритм параллельных вычислений динамической модели манипуляционных роботов, с использованием матричных алгоритмов.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций работы

Представленные в диссертационной работе теоретические и экспериментальные исследования позволяют оценить достоверность полученных результатов, подтверждающихся адекватностью и непротиворечивостью используемых математических моделей, проведенным анализом получаемой на основе этих моделей точности вычислений.

Выполненные исследования основывались на принципах моделирования систем тел, обосновываемых в теоретической механике и теории механизмов и машин, методах теории автоматического управления, реализующих принцип регулирования по отклонению, численных методах и методах параллельных вычислений.

На различных этапах выполнения исследовательской работы полученные результаты докладывались и обсуждались на многочисленных семинарах и конференциях.

По теме диссертации опубликовано более 60 печатных работ, в том числе учебное пособие, 4 монографии, 12 статей, индексируемых в Scopus и WoS, 16 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК по специальности 2.3.3, зарегистрировано 3 электронных ресурса и 2 компьютерные программы.

Теоретическая и практическая значимость выводов и результатов

Основным научным результатом является разработанная автором методология объектного моделирования манипуляционных систем роботов. На основе предложенной методологии может быть реализована универсальная система управления манипуляционными роботами различных моделей, а также роботами, конструкция которых может состоять из различных модулей, в зависимости от выполнения той или иной технологической операции.

В методологии заложены принципы разработки перспективных систем управления, которые позволят выполнять адаптацию к существенно изменяющимся условиям путём изменения структуры модели управления. При этом должны быть выполнены процедуры самодиагностики и калибровки. Это позволит получить необходимые данные о новой структуре робота и с учётом этих данных модифицировать модель управления.

Разработанные в диссертации объектно-ориентированные методы моделирования могут обеспечить решение задачи синтеза оптимальных структур манипуляционных систем роботов на основе использования генетического алгоритма. Использование генетического алгоритма в адаптивной системе управления позволит определять оптимальную кинематическую структуру манипуляционных систем роботов, наиболее подходящую для выполнения конкретной задачи.

Разработано программное обеспечение для моделирования кинематики и динамики манипуляционных роботов позволяющее решать различные прикладные задачи.

Разработанные модели и методы внедрены в образовательные процессы подготовки бакалавров и магистров по профильным направлениям, таким как, «Автоматизация технологических процессов и производств», «Управление в технических системах» и «Мехатроника и робототехника».

Соответствие результатов заявленной научной специальности

Научные результаты соответствуют следующим пунктам научной специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»:

– «п. 2. Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) ...»;

– «п. 3. Теоретические основы и методы математического моделирования ... функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация.»;

– «п. 5. Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления.»;

– «п. 7. Формализованные методы анализа, синтеза, исследования и оптимизация модульных структур систем сбора и обработки данных в АСУТП ...»;

– «п. 9. Методы синтеза специального математического обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистему АСУТП, АСУП, АСТПП и др.»;

– «п. 13. Теоретические основы, методы и алгоритмы диагностирования, (определения работоспособности, поиск неисправностей и прогнозирования) АСУТП, АСУП, АСТПП и др.»;

– «п. 14. Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения ...»;

- «п. 15. Теоретические основы, методы и алгоритмы построения диалоговых подсистем, включенных в АСУТП ...»;
- «п. 19. Цифровизация управления в промышленности, функциональное моделирование объектов автоматизации».

Замечания по диссертационной работе

По диссертации Крахмалева О.Н. можно сделать следующие замечания:

1. Из рассмотренных в первой главе двух методов моделирования динамики манипуляционных систем роботов в работе используется только метод, основанный на уравнении Лагранжа, в то время как второй метод, основанный на уравнении Аппеля, нигде больше не встречается. Сравнительный анализ этих двух методов не приведен.
2. В предложенной методике построения инерционных моделей манипуляционных систем роботов сделан акцент на моделирование распределения масс с привязкой к конструктиву исполнения звеньев, в то время как существуют более простые методы, основывающиеся на использовании сосредоточенных масс.
3. Предложены две динамические модели, основная (1.94) и альтернативная (1.95). В дальнейших исследованиях используется только основная модель. Целесообразность использования альтернативной модели обосновывается возможностью исследования на ее основе обособленного влияния сил инерции, таких как центробежные и кориолисовы. Однако прикладное значение такого разделения сил инерции в работе не раскрывается.
4. Рассмотренные во второй главе математические модели, учитывающие первичные неизменяющиеся геометрические отклонения в качестве параметров в уравнениях моделей, необходимо дополнить методиками определения таких отклонений в конструкциях реальных манипуляционных роботов.
5. Для динамических моделей, учитывающих изменяющиеся линейные и угловые отклонения в шарнирах манипуляционных систем роботов, необходим метод определения обобщённых сил, составляющих правую часть соответствующих уравнений движения.
6. Для компьютерной среды конструктора объектных схем математических моделей подробно описаны правила составления объектных схем и их шаблонов для часто используемых алгоритмов, но недостаточно полно рассмотрен необходимый пользовательский функционал, реализующий выполнение таких действий.

Сделанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общий высокий уровень диссертационной работы.

Завершенность и качество оформления диссертации

Диссертация состоит из введения и четырех глав, заключения, списка литературы (148 источников) и 11-и приложений. Работа изложена на 323 страницах машинописного текста, содержащего формулы и рисунки. Диссертация является завершенной и грамотно оформленной рукописью. Представленная работа в полной мере отражает полученные автором результаты исследований. По формальным признакам работа соответствует требованиям ВАК РФ к докторским диссертациям.

Автореферат изложен на 37 страницах, соответствует предъявляемым требованиям и достаточно полно отражает основные положения и научные результаты диссертации, выносимые на защиту.

Результаты исследований опубликованы в рецензируемых журналах и трудах научных конференций, оформлены в виде зарегистрированных электронных ресурсов и программ для ЭВМ. Всего по теме диссертации опубликовано более 60 печатных работ, в том числе учебное пособие, 4 монографии, 12 статей, индексируемых в Scopus и WoS, 16 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК по специальности 2.3.3, зарегистрировано 3 электронных ресурса и 2 компьютерные программы.

Заключение

В диссертации представлены теоретические результаты, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, заключающееся в разработке математических моделей и методов моделирования манипуляционных роботов, позволяющих учитывать и анализировать влияние разного рода отклонений и возмущений и основывающихся на единой методологии и объектно-ориентированном подходе, составляющих основу специального математического обеспечения для решения функциональных задач управления манипуляционными роботами, позволяющего проводить параллельные вычисления и синтез управления путём реконфигурации модели управления на основе процедур самодиагностики и оптимизации.

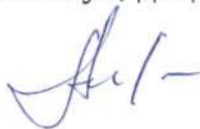
Автор продемонстрировал высокий квалификационный уровень в области математики и теоретической механики. Разработанные автором методы прошли необходимую апробацию и подтверждены лабораторными исследованиями. Получено подтверждение заинтересованности результатами диссертационной работы профильной организацией и акт-справка о внедрении ею этих результатов.

На основании анализа содержания диссертации и автореферата, а также опубликованных автором работ можно сделать следующее заключение: диссертация Крахмалева О.Н. является законченной научно-квалификационной работой и соответствует требованиям, изложенным в п.п.

9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (редакция 11.09.2021), предъявляемым Высшей аттестационной комиссией Министерства науки и высшего образования РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

Считаю, что автор диссертационной работы на тему: «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 «Теоретическая механика»
ФГБОУ ВО Национального Исследовательского
университета «Московский государственный
технический университет им. Н.Э. Баумана»,
доктор технических наук, доцент



П.М. Шкапов
04.12.2023

105005, г. Москва, Рубцовская наб., 2/18.

+7(499) 263-69-69

E-mail spm@bmstu.ru



ПОДПИСЬ ЗАВЕДУЮЩЕГО КАФЕДРОЙ

П.М. ШКАПОВА

04.12.2023



Подпись заведующего кафедрой,
доктора технических наук, доцента
Шкапова Павла Михайловича
заверяю