

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

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, доцента Марины Александровны Никитиной 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» (технические науки)

Актуальность темы диссертационной работы

В Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642, указано на необходимость перехода к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, созданию систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта. Цифровые решения в области пищевых систем преследуют создание инновационных технологий на основе Big Data с предпроцессингом исходных данных; нейротехнологий и искусственного интеллекта; робототехники; технологий виртуальной и дополненной реальности и др.

Цифровые технологии в первую очередь связаны с применением сложной роботизированной техники. Промышленные роботы стали не только одной из движущих сил автоматизации, но и одним из важнейших средств для социально-экономических изменений в сфере труда. Разработка и широкое применение гибкой автоматизированной технологии являются в

настоящее время основной тенденцией развития современного агропромышленного комплекса.

Использование единого методологического подхода при разработке алгоритмов решения функциональных задач управления промышленными роботами позволяет унифицировать процесс разработки необходимого программного обеспечения.

Учитывая изложенное выше, можно утверждать, что тема диссертационной работы Крахмалева О.Н., выполненная в ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)», является актуальной, т.к. направлена на решение комплекса задач, связанных с построением автоматизированных систем управления манипуляционными роботами.

Содержание диссертационной работы

Представленная к защите диссертационная работа Крахмалева О.Н. имеет структуру, состоящую из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка литературы, включающий 148 наименований российских и зарубежных источников, 11 приложений. Основной текст диссертации изложен на 312 страницах, содержит 158 рисунков.

Во **введении** изложены актуальность, цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, оценивается степень достоверности полученных результатов.

Первая глава посвящена математическому описанию геометрии манипуляционных систем роботов. Введены новые понятия: геометрическая модель манипуляционных систем, рассматриваемая как совокупность матриц преобразования однородных координат, и инерционная модель, как совокупность матриц инерции звеньев.

При составлении динамической модели манипуляционных систем роботов использовался метод Лагранжа-Эйлера. Выведены матричные уравнения, соответствующие основной и альтернативной динамическим моделям. Разработаны методы вычисления обобщённых сил от внешней нагрузки и усилий, развиваемых приводами.

Представлены разработанные автором концепции кинематического и динамического управления манипуляционными роботами, а также алгоритмы и структурные схемы управления приводами.

Во **второй главе** рассмотрены методы параметризации геометрических моделей манипуляционных систем роботов на основе

первичных геометрических отклонений, соответствующих наиболее распространенным видам дефектов, связанных с изготовлением и сборкой деталей, составляющих конструкцию звеньев манипуляционных роботов.

Представлен метод коррекции интегральных отклонений, позволяющий на основе модифицированной геометрической модели создавать законы управления, соответствующие движению реального робота по заданной траектории. Предложена концепция кинематического управления манипуляционными роботами, учитывающая геометрические отклонения.

Разработаны методы диагностики кинематического состояния манипуляционных систем роботов, которые позволяют дополнить модели управления данными, соответствующими изменениям, возникающим в структуре манипуляционной системы, при оснащении робота новым инструментом.

Разработаны и представлены динамические модели, позволяющие учитывать линейные и угловые отклонения, возникающие в шарнирах манипуляционных систем роботов. Вычислительная эффективность полученных динамических моделей была существенно повышена за счёт исключения в вычислительных алгоритмах элементов тождественно равных нулю.

Третья глава посвящена методологии математического объектного моделирования манипуляционных систем роботов, позволяющая моделировать задачи кинематики и динамики манипуляционных систем, на основе разработанной концептуальной схемы моделирования и математических моделей, реализующих представленные в работе методы.

Особенностью разработанной методологии моделирования является её направленность на использование объектно-ориентированного подхода. В структуре данных и алгоритмов, используемых при моделировании, были выделены базовые классы. На основе разработанного формализма предложено составлять объектные схемы, соответствующие различным частям математических моделей.

Результат, полученный автором, состоит в том, что математическая модель может быть представлена в виде комплекса, а выделяемые в структуре этой объектной схемы части могут рассматриваться как отдельные компоненты, состоящие из объектов, имеющих в свою очередь

структуру классов, которые могут быть реализованы средствами объектно-ориентированных языков программирования.

Четвёртая глава посвящена аспектам практического применения объектного моделирования манипуляционных систем роботов.

Для составления объектных моделей предложено использовать специально разработанную компьютерную программу, автоматизирующую процесс на основе принципа визуального программирования. Разработанный формализм позволяет создавать объектные схемы математических моделей из объектов заранее описанных классов, а также структурных блоков, представляющих собой объектные схемы, состоящие из нескольких объектов.

Разработанные методы объектного моделирования автор предлагает распространить на технологию генетического программирования, позволяющую синтезировать и модифицировать объектные схемы, на основе использования генетического алгоритма. Это позволит оптимизировать структуру манипуляционных систем роботов на основе заданного критерия.

В заключении отражены основные результаты работы, сформулированы выводы.

Проведенный анализ материалов диссертации, автореферата, публикаций автора позволяет сделать вывод, что их содержание в целом соответствует цели и поставленным задачам. Автореферат изложен на 37 страницах, приведены выводы, отражающие содержание диссертационной работы. Часть материала диссертации не коррелирует с текстом автореферата.

Диссертация и автореферат по содержанию, структуре и объему соответствуют требованиям Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов подтверждается теоретическими и экспериментальными исследованиями, подтверждающими адекватность и непротиворечивость используемых математических моделей, и проведенным анализом точности вычислений, получаемых на основе этих моделей.

Проведенные исследования основывались на теоремах классической механики и верифицированных методах теории механизмов и машин, а также теории автоматического управления, численных методах и методах анализа параллельных вычислений.

Основные положения работы в достаточной степени апробированы, результаты исследований, в разное время, были представлены в научном сообществе и обсуждались на многочисленных конференциях и семинарах.

По теме диссертации опубликовано более 40 печатных работ, 4 монографии, 12 статей, индексируемых международными базами данных Scopus и WoS, 18 публикаций в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК по специальности 2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами», 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, 3 электронных ресурса.

Основные научные результаты, полученные соискателем

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

2. Предложен научно обоснованный подход к адаптации систем управления манипуляционными роботами, построенном на основе объектного моделирования, путём декомпозиции создаваемых объектных схем в результате применения генетического алгоритма;

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

4. Разработан метод диагностики кинематических структур манипуляционных систем роботов, содержащих методы калибровки по положению характерных точек и по ориентации звеньев;

5. Разработан метод параметризации номинальных геометрических моделей манипуляционных систем роботов, позволяющем учитывать первичные геометрические отклонения звеньев;

6. Разработан численный метод коррекции интегральных отклонений движения манипуляционных роботов, учитывающий первичные

геометрические отклонения, а также отклонения позиционирования звеньев;

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

8. Разработан метод моделирования линейных и угловых отклонений манипуляционных систем роботов, в кинематической структуре которых могут быть использованы шарниры с различной степенью подвижности;

9. Разработан алгоритм параллельных вычислений динамической модели манипуляционных роботов, с использованием матричных алгоритмов.

Теоретическая и практическая значимость полученных выводов и результатов

Основные результаты, определяющие теоретическую и практическую ценность работы, заключаются в следующем:

1. Предложена методология математического объектного моделирования манипуляционных систем роботов, позволяющая разрабатывать универсальные системы управления, настраиваемые на различные модели промышленных роботов, включая роботов, имеющих модульную конструкцию;

2. Разработаны методы параметризации геометрических моделей манипуляционных систем, обеспечивающие возможность учёта геометрических отклонений, возникающих в конструкциях роботов при их изготовлении и эксплуатации;

3. Разработаны методы самодиагностики, которые позволят решать задачи определения неисправностей, связанных с изменением структуры манипуляционных систем роботов;

4. Предложен метод структурных мутаций математических моделей, описывающий манипуляционные системы роботов, позволит реализовать адаптацию системы управления в случае обнаружения неисправностей в соответствующих звеньях манипуляционной системы.

Личный вклад автора в разработку научной проблемы

Автором самостоятельно решена научная проблема, обоснована методология и схема выполнения исследования, разработаны математические модели, алгоритмы и программное обеспечение, полученные результаты проанализированы, сформулированы выводы.

К диссертационной работе имеются **замечания:**

1. Обоснование актуальности темы исследования в диссертации представлено явно выраженным уклоном на решение задач моделирования манипуляционных систем роботов, а не на решение задач, связанных с автоматизацией.

2. В библиографическом списке нет литературы позднее 2018 года. Поясните почему не рассматривались публикации с 2019 по 2023 гг.? Проблема стала не актуальной?

3. В диссертации в качестве объекта исследования указаны математические модели манипуляционных систем роботов, в то время как в автореферате – манипуляционные системы промышленных роботов.

4. В диссертации (стр. 30) и в автореферате (стр. 10), автор сообщает, что по теме диссертации опубликовано более 60 работ. Однако, приведенный список (стр. 34-37 автореферата) содержит 40 научных публикаций. Поясните расхождения в приведенных цифрах.

5. Ни в диссертации, ни в автореферате явным образом нигде не определен предмет исследований.

6. На мой взгляд, предложенное автором диссертации определение термина «геометрическая модель» (стр. 87) требует дополнительного пояснения, т.к. в определении используются математические символы и термины, применяемые для описания математической модели. Поясните в чем разница в Вашем понимании между геометрической и математической моделью?

7. Следовало бы дать более подробное описание структуры баз данных (стр. 58, 82, 89, 180, 245 диссертации), предлагаемых для дальнейшего использования. Представить логическую схему базы данных. Описать, что является сущностью, что атрибутом. Какой тип связи между таблицами. По какому ключу осуществляется переход.

8. Рисунок 1.11 озаглавлен как «Моделирование k-го звена геометрическими телами». Полагаю, что этот рисунок следовало бы назвать

«Схема положения начала и поворота центральных систем при моделировании k -го звена геометрическими телами» Аналогичные замечания по рисункам 1.12, 2.19, 2.20, 2.21, 2.22, 2.23, 2.25, 2.26, 2.27, 2.28, 3.2, 3.3, 3.13, 3.14, 3.15, 3.34, 3.37, 3.38, 3.39, 3.53, 3.54, 4.2, 4.8, 4.9, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26.

9. Присутствует много повторов информации (стр. 58, 82; 38-39, 103-105; 40-41, 116; 87, 178; 181, 186, 243; 237, 241; 181, 243).

10. В диссертации (стр. 17) автор сообщает, что *«достоверность полученных в работе результатов подтверждается строгостью математической постановки»*. Возникает вопрос почему не верификацией и валидацией?

11. Из текста диссертации неясно, проводилась ли проверка на адекватность и достоверность разработанных математических моделей и алгоритмов в условиях реального производства.

12. В уравнении (2.164, стр. 163 диссертации) малых упругих колебаний, возникающих в шарнирах манипуляционных систем, не указана информация об источнике для определения значения параметра: b_i – коэффициент вязкости в i -м шарнире (справочник или решение математической задачи). Также не описано, являются эти коэффициенты постоянными или нет? Тогда от каких показателей они зависят?

13. В диссертации (стр. 181) сказано, что в работе под объектами моделирования понимаются определённые части математических моделей, соответствующие понятию «рода структуры» в бурбаковском формализме, однако не представлен источник, раскрывающий это понятие.

14. В диссертации (стр. 187, рис. 3.9; стр. 219, рис. 3.47), в автореферате (стр. 22, рис. 16; стр. 32, рис. 29) представлены наследственные цепочки классов `Geometric_model` и `Inertial_model`. На мой взгляд, наследственность классов `Geometric_model` и `Inertial_model` не совсем очевидна, т.к. структура описывающих классов должна содержать не отдельные матрицы, а массивы матриц. В диссертации не представлено как происходит инкапсулирование и полиморфизм.

15. В разделе 4.2 автором предложено использовать генетическое программирование в задачах моделирования манипуляционных систем роботов, однако рассмотренный пример, иллюстрирующий использование структурных мутаций при модификации динамических моделей, не доведен до наглядного результата.

16. На рис. 4.14 (стр. 284 диссертации) представлен «Простой генетический алгоритм». Из текста диссертации неясно, это заимствованный рисунок или разработанный автором? Если заимствованный, то должна быть ссылка на информационный источник. Это замечание также касается текста на стр. 282-283.

17. В диссертации (стр. 285) автор предлагает использовать генетический алгоритм. Какой? Их достаточно много: китовый алгоритм, алгоритм искусственных водорослей и т.д.

18. В тексте диссертации не сказано ни о технико-экономической или социально-экономической эффективности разработанной методологии.

Отмеченные замечания, в целом, не снижают научной ценности, теоретической и практической значимости диссертационной работы.

Выводы, сформулированные автором, аргументированы, достоверны, обладают несомненной научной новизной; основные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых отечественных и зарубежных научных изданиях.

Заключение по диссертации

Несмотря на вышеизложенные замечания, диссертационное исследование Крахмалева Олега Николаевича заслуживает общей положительной оценки. Тема исследования является актуальной, отвечает вызову Индустрии 4.0, нацеленной на автоматизацию и роботизацию обрабатывающей и перерабатывающей промышленности, имеет важное значение и соответствует научно-техническим задачам специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Диссертационная работа Крахмалева Олега Николаевича «Методология построения автоматизированных систем управления манипуляционными роботами на основе математического объектного моделирования» в целом, по структуре рукописи, объему исследований, степени их аналитической проработки и прикладной значимости 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. (редакция 26.10.2023 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

Положительно оценивая диссертационную работу, следует заключить, что она соответствует критерия ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор – Крахмалев О.Н., заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

Официальный оппонент:

Доктор технических наук

(05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в пищевой промышленности)»);

05.18.04 – «Технология мясных, молочных и рыбных продуктов и холодильных производств»),

доцент, ведущий научный сотрудник,

руководитель направления «Информационные технологии»

Центра «Экономико-аналитических исследований и информационных технологий»,

Никитина Марина Александровна

11.12.2023.

Федеральное государственное
бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный центр
пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН

109316, Москва, ул. Талалихина, 26

+7(495)676-95-11 доб. 297

E-mail: nikitinama@yandex.ru

