

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Ламоткина Алексея Евгеньевича «Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования программных траекторий пространственных механизмов в кватернионной параметризации», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования.

### *Актуальность темы исследования*

Задача управления ориентацией твердого тела имеет важное прикладное значение и возникает во многих областях, например, в инерциальной навигации, в механике космических полетов, в механике роботоманипуляторов, в компьютерной анимации и т. д. В представленной диссертации Ламоткиным А.Е. рассматривается проблема проектирования программной траектории, которая является важнейшим аспектом задачи управления.

Проектируемые программные траектории понимаются в обобщенном смысле как траектории в соответствующем конфигурационном пространстве обобщенных координат. Классический выбор таких координат в случае сферического движения – углы Эйлера либо самолетные углы. Однако их использование приводит к трехмерному конфигурационному пространству с особыми точками в кинематических уравнениях. В этой связи многие отечественные и зарубежные авторы, рассматривают в качестве конфигурационного пространства 3-сферу единичных кватернионов в четырехмерном пространстве.

Использование кватернионной параметризации устраняет особенности кинематических уравнений, но лишает программные траектории трехмерного изображения. При этом в некоторых задачах это значительно усложняет анализ свойств проектируемых траекторий, что делает актуальным вопрос разработки метода их графической визуализации.

Работа развивает существующие кватернионные методы проектирования программного сферического движения тела предлагая новый метод синтеза программных траекторий, который позволяет проводить их визуальный анализ, а также более эффективно вычислять параметры траектории.

*Научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов*

*Научная новизна и теоретическая значимость* диссертационной работы А. Е. Ламоткина обусловлена новым методом проектирования программных траекторий в кватернионной параметризации, использующим их трехмерное отображение. Автором получены оригинальные результаты, к наиболее значимым относятся следующие:

- метод компьютерного моделирования для анализа и графической визуализации программных траекторий сферического движения, отличающийся использованием трехмерного отображения кватернионов;
- алгоритм для проектирования и компьютерного моделирования программной траектории переориентации твердого тела в виде многочлена пятой степени за заданное время из одного углового положения тела в другое при известных краевых условиях и отличающийся от ранее известных использованием метода отображения единичных кватернионов в трехмерное пространство векторов поворота;
- интерполяционные алгоритмы для построения программной траектории в трехмерном пространстве, отличающиеся от ранее известных использованием метода отображения единичных кватернионов в трехмерное пространство векторов поворота для проектирования и компьютерного моделирования программной траектории переориентации твердого тела близкой к траектории равномерного плоского поворота за заданное время из одного углового положения тела в другое при известных краевых условиях.

*Практическая значимость* полученных результатов состоит в возможности применения разработанных алгоритмов для проектирования движения в технических системах. В работе предлагаются варианты реализации таких алгоритмов для систем с двигателями-маховиками и для систем с линейными приводами, также предложенные в диссертации алгоритмы реализованы в двух зарегистрированных программных продуктах для ЭВМ.

#### *Достоверность полученных результатов*

Достоверность результатов диссертационной работы А. Е. Ламоткина подтверждается корректностью и аккуратностью формальных выкладок, а также многочисленными вычислительными экспериментами, выполненными с помощью системы компьютерной алгебры Wolfram Mathematica. Итоги проведенных исследований и экспериментов представлены рядом публикаций в рецензируемых научных изданиях и не противоречат положениям современной науки.

#### *Структура, объем и основное содержание диссертации*

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 129 источников. Общий объем диссертации составляет 148 страниц машинописного текста. Диссертация содержит 42 рисунка и 2 таблицы. Текст диссертации изложен доходчиво, обладает структурным единством, свидетельствует о личном вкладе автора в исследование. Автореферат в полной мере отражает основное содержание диссертации.

Во введении обоснованы актуальность выполненных диссертантом исследований и степень разработанности темы диссертации; сформулированы цель и задачи работы, положения, выносимые на защиту; приведены использованные методы исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе были рассмотрены различные методы математического описания положения твердого тела в трехмерном пространстве, оценены их преимущества и недостатки по сравнению с кватернионами. Рассмотрена роль кватернионов и особенности их применение в математическом моделировании, особенно при проектировании программного движения.

Во второй главе описывается метод проектирования и компьютерного моделирования программных траекторий сферического движения. Показано, что этот метод упрощает геометрическую интерпретацию движения, заданного кватернионами, отображая его в трехмерное пространство векторов поворота. Также исследуются виды траекторий, возникающие в результате эйлеровых (плоских) поворотов.

В третьей главе предложен алгоритм синтеза программной траектории поворота из одного углового положения в другое в виде многочлена пятой степени. Также предложены интерполяционные алгоритмы, позволяющие синтезировать программные траектории поворота, близкие к траекториям плоского поворота. Показано, что использование трехмерного отображения кватернионов в данных алгоритмах приводит к уменьшению времени вычислений.

В четвертой главе рассматривается использование кватернионов и их отображения при изучении движения универсального шарнира. Показано, что используя данный подход можно провести эффективный анализ динамических нагрузок, действующих на шарнир, учитывающий инерционные характеристики крестовины.

В заключении работы автором сформулированы выводы по результатам исследования и перспективы дальнейшей работы по данному направлению.

В целом отметим, что диссертационная работа в надлежащем объеме описывает выбранную проблематику с указанием используемых методов и иллюстрацией полученных результатов, с их дальнейшим анализом и выводами.

Основные результаты работы опубликованы в 18 работах, в частности в 5 статьях в журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ. Результаты достаточной степени доложены на Всероссийских и Международных научных конференциях. Получено 2 свидетельства о регистрации программы ЭВМ.

*По диссертации имеются некоторые замечания.*

1. Структура диссертационной работы не сбалансирована: глава 1 занимает 52 стр. из 132 страниц содержательного текста диссертации, в том время как глава 2 содержит всего 20 страниц, а результаты в главе 4, связанные с компьютерным моделированием и исследованием движения универсального шарнира с использованием кватернионного формализма, следовало бы представить более детально.
2. В работе предложены постановки задач переориентации и оптимальной переориентации твердого тела с использованием отображения кватернионов в пространстве в  $\mathbb{R}^3$ . Для решения данных задач в работе предложены два оригинальных интерполяционных метода нахождения траектории поворота, близкой к траектории равномерного плоского поворота. Однако, в тексте диссертации не приведены качественные и/или - количественные оценки решений поставленных задач интерполяционными методами в сравнении с решениями в замкнутой форме.
3. Представленный в работе метод решения задачи кинематического управления ориентацией твердого тела продолжает идеи построения квазиоптимальных управлений, предложенных в работах Ермошиной О. В. и Велищанского М. А., однако представленные в главе 3 результаты компьютерных экспериментов не содержат сравнительного анализа, содержащего количественные оценки качества работы данного метода в сравнении с указанными ранее методами.

4. В тексте диссертации есть ошибки в нумерации пунктов глав (указаны повторно), также на ряде графиках, например, рисунки 3.4 -3.6, изображена зависимость между физическими величинами, однако их размерности не указаны.
5. В тексте диссертации не обоснован выбор поиска программной траектории в виде многочлена 5 степени.
6. В п.4.2.2 автор предлагает изменять величину динамической нагрузки в подшипниках универсального шарнира за счет изменения инерционных характеристик крестовины, при этом автор не указывает способ изменения этих характеристик.
7. В разделе введение диссертации не указан личный вклад диссертанта в исследование.

#### *Общее заключение*

Вышеуказанные замечания не влияют на положительную оценку результатов работы и не ставят под сомнение значимость выполненных исследований. Диссертация является законченным научным исследованием, выполненным автором на достаточно высоком научном уровне. Она написана хорошим научным языком и аккуратно оформлена. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Содержание диссертации соответствует следующему пункту паспорта специальности 2.3.7.

Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования:

*п.9. разработка и реализация новых методов и компьютерных моделей для синтеза анализа и графической визуализации сложных технических объектов проектирования, включая системы виртуальной (VR) и дополненной реальности.*

Диссертация «Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования программных траекторий пространственных механизмов в кватернионной параметризации» и автореферат соответствуют критериям,

установленным Положением о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» для диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук; отвечает требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ». Автор диссертации, Ламоткин Алексей Евгеньевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования.

Официальный оппонент,  
доцент, доктор технических наук,  
заведующий научно-исследовательской  
лабораторией «Интеллектуальные  
информационные технологии и системы»

  
Вохминцев Александр Владиславович

ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет».

15 ноября 2023 г.

Адрес: Россия, 454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129.

Телефон: +7 (351) 799-7288

E-mail: vav@csu.ru



*15.11.2023*

*Вохминцева Александра Владиславовича*