

ОТЗЫВ

официального оппонента Долгого Юрия Филипповича 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 диссертационной работы. Кватернионные и бикватернионные методы и модели механики повышают эффективность аналитического исследования и численного решения многих задач небесной механики, механики твердого тела и механических систем. Они находят важные приложения в механике космического полета, инерциальной навигации и управления движением, кинематики и динамики пространственных механизмов и роботов. Задачи ориентации и управления движением космических аппаратов решаются в настоящее время с применением кватернионных кинематических уравнений. Кватернионная регуляризация считается наиболее эффективной при анализе особенностей классических дифференциальных уравнений небесной механики и астродинамики, порождаемых гравитационными силами. При геометризации, полученных аналитических результатов, приходится иметь дело с пространствами, размерность которых выше трех. Поэтому возникают проблемы с визуализацией результатов научных исследований. Они лишаются простых интерпретаций необходимых для инженерной практики. В диссертационной работе Ламоткина А.Е. геометризация кватернионных методов связана с визуализацией решений задачи нахождения программных траекторий пространственных механизмов. Предложенный автором метод показал эффективность при исследовании движений платформы Стюарта и универсального шарнира.

Структура и основное содержание работы. Диссертационная работа изложена на 148 страницах машинописного текста содержит 42 рисунка 2 таблицы, состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, который включает 129 источников.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи, научная новизна и практическая значимость, используемые методики исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе представлен аналитический обзор современных методов описания движений пространственных механизмов. Приведен критический анализ достижений в механике космического полета, инерциальной навигации и управления движением, кинематики и динамики пространственных механизмов и роботов, которые были получены благодаря использованию кватернионных методов.

Во второй главе используется геометрическая интерпретация единичного кватерниона $q = \cos \frac{\chi}{2} + \sin \frac{\chi}{2} \vec{e}$ в параметрах ось-угол, определяющая плоский поворот твердого тела, который необходимо осуществить, чтобы оси неподвижной системы координат совпали с осями подвижной системы координат. При этом \vec{e} задает единичный орт оси поворота, определяемый углами α и β , а χ задает угол поворота твердого тела вокруг выбранной оси. Такому кватерниону ставится в соответствие вектор поворота $\vec{r} = \chi \vec{e}$. Предложенная геометрическая интерпретация позволила получить координатное описание отображения единичной сферы S^3 четырехмерного пространства кватернионов и трехмерного пространства поворотов R^3 . Анализируются вопросы, связанные с неоднозначностью указанного отображения. Пространственный поворот твердого тела описывается траекторией на единичной сфере S^3 пространства кватернионов. Используя введенное отображение, находим траекторию в пространстве R^3 , которая дает возможность получить наглядное представление пространственного поворота твердого тела. Особое внимание уделяется эйлеровым поворотам. Исследованы свойства траекторий в R^3 , которые отвечают траекториям эйлеровых поворотов.

В третьей главе разрабатывается метод построения квазиоптимальной программной траектории поворота твердого тела за заданное время из одного углового положения в другое при известных краевых условиях на скорость и ускорение. При построении траектории в пространстве R^3 используются полиномы пятой степени. При нахождении коэффициентов применяются известные краевые условия. Также предлагается интерполяционный алгоритм построения программной траектории близкой к траектории равномерного плоского поворота твердого тела за заданное время из одного углового положения в другое при известных краевых условиях на скорость. В качестве интерполяционных функций рассматриваются интерполяционные многочлены или кубические сплайны. Предложенные методы используются при решении задачи управления платформой Стюарта.

В четвертой главе кватернионный подход используется для описания и анализа движений универсального шарнира. Решена задача нахождения динамических нагрузок, действующих на универсальный шарнир, с учетом

инерционных характеристик крестовины. Обсуждаются возможные пути уменьшения износа шипов крестовины.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные выводы и перспективы дальнейшей работы.

Научная новизна и практическая значимость

Предложенный метод проектирования и математического моделирования программных траекторий сферического движения твердого тела позволяет эффективно решать задачу переориентации твердого тела за заданное время из одного углового положения в другое при известных краевых условиях, находить траектории близкие к плоскому повороту. Он позволил также провести анализ траектории движения крестовины универсального шарнира и действующих на нее динамических нагрузок.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. В перечне основных задач, решенных в диссертационной работе, лишним является анализ существующих методов математического моделирования ориентации твердого тела в трехмерном пространстве.
2. Обоснование достоверности результатов диссертационной работы должно быть более развернутым и не формальным.
3. В тексте диссертации понятия «движение» и «траектория» твердого тела не всегда правильно употребляются. Например, это имеет место на стр. 54, 58, 60, 114.
4. В постановке задачи управления переориентацией твердого тела в конфигурационном пространстве S^3 управляемая динамическая система определяется системой дифференциальных уравнений (2.19), (2.21)? В этой постановке задача нахождения силовых управлений является тривиальной?
5. В разделе 2.3.2 предложена постановка задачи управления переориентацией твердого тела в пространстве R^3 . Какие величины являются управлениями в этой постановке?
6. В чем отличие предлагаемого автором в третьей главе квазиоптимального алгоритма переориентации от соответствующего алгоритма из работы Ермошина О.В., Крищенко О.В. ?
7. Имеются опечатки на стр. 82, 85, 89, 125.
8. На стр. 88 используется неудачное выражение «интерполяция кусочными многочленами».
9. При нахождении угловых скоростей двигателей-маховиков интегрируется система дифференциальных уравнений (3.19)?

10. Формулы на стр. 101 требуют пояснений. Здесь не определена величина $R(t)$.
11. Представление матрицы поворота в самолетных углах известно и приведено в монографии Лурье А.И. по аналитической механике. Поэтому для нахождения этой матрицы в специальной ситуации, рассматриваемой в диссертационной работе, не требуется дополнительный вывод представления.
12. В формулах (4.5) описаны связи между компонентами версоров и самолетными углами без необходимых пояснений.
13. Результаты подстановки (4.6) при нахождении проекций угловой скорости крестовины находились, с помощью пакета аналитических вычислений или используя численные методы?
14. Предложенные в диссертационной работе методы планируется использовать для синтеза, анализа и графической визуализации программных траекторий систем твердых тел?

Заключения по работе

Отмеченные вопросы и замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы Ламоткина А.Е., в которой проведен большой объем работы и получены интересные результаты, имеющие новизну и возможности для их практического использования. Основные выводы и положения диссертационной работы достоверны и обоснованы. Автореферат диссертации отражает ее основное содержание по всем квалификационным признакам. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях. По теме диссертационной работы опубликовано 18 научных работ, из них 5 статей в рецензируемых научных изданиях, определенных перечнем ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 3 статьи в международной базе цитирования Scopus. Получено 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Диссертационная работа Ламоткина А.Е. «Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования программных траекторий пространственных механизмов в кватернионной параметризации» соответствует паспорту научной специальности 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования.

Диссертационная работа Ламоткина А.Е. является законченной научно-квалификационной работой, удовлетворяющей требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» в УрФУ, в которой разработан метод проектирования и математического моделирования для синтеза, анализа и графической визуализации программных траекторий сферического движения твердого тела.

Считаю, что Ламоткин Алексей Евгеньевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования.

Даю согласие на обработку моих персональных данных.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор кафедры прикладной математики и механики Института естественных наук и математики



Долгий Юрий Филиппович

Адрес:

620002, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19,

тел. +7(343) 350-75-21

E-mail: jury.dolgy@urfu.ru

«27» ноября 2023 г.

Подпись Долгого Юрия Филипповича заверяю



Нач. отдела аттестации

научно-педагогических кадров УрФУ



Т.Н. Стрехнина