

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Терехова Георгия Павловича на тему «Исследование динамики, планирование траекторий, управление сферороботами», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – теоретическая механика

Актуальность темы исследований. В последнее время существует большое разнообразие роботов, различных и по назначению, и по конструкции. Особый класс среди мобильных роботов составляют роботы, чье перемещение основано на принципе качения, с использованием сил сухого трения. Здесь представляют интерес аппараты, имеющие форму шара, обладающие рядом преимуществ: в частности, корпус такого аппарата может быть герметичным и защищенным от внешних воздействий, а сферическая форма позволяет совершать движение в любом заданном направлении.

С точки зрения теоретической механики, изучение движения подобного аппарата сводится к задаче о движении по плоскости шара Чаплыгина. Решение подобных задач, в свою очередь, существенно зависит от принимаемой модели взаимодействия между сферической оболочкой и плоскостью. Зачастую применяется модель абсолютно шероховатой плоскости. Кроме того, шар как правило предполагается уравновешенным: его центр масс и геометрический центр совпадают.

Вместе с тем, реальные эксперименты показывают, что во многих случаях достигаются эффекты, невозможные в указанных выше предположениях, в частности, робот в ряде случаев не может начать движение. Кроме того, использование неголономных моделей подвергается в последнее критике многих известных авторов. Наконец, предположение о совпадении центра масс с геометрическим центром на практике оказывается недостижимым.

Для построения алгоритмов управления роботом, применимых к реальным ситуациям, необходимо использование более сложных моделей трения, а также отказ от совпадения центра масс робота с его геометрическим центром. Полученные в работе Г.П.Терехова алгоритмы управления сферороботом позволяют решить задачу нахождения этих управлений.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций. Автор достаточно корректно обосновывает актуальность темы диссертации, определяет объект и предмет исследования, формулирует цель и определяет задачи исследования.

Автор формулирует основные предположения и допущения в работе, на основании которых строит механическую модель сферических роботов,

предполагаемых системами абсолютно твердых тел. В движение роботы приводятся посредством вращения располагающихся внутри дисков-маховиков, генерирующих внутренний кинетический момент. В работе используются широко известные и активно применяемые модели контактного взаимодействия между катящимся телом (сферической поверхностью робота) и плоскостью, такие как модель абсолютно шероховатой плоскости, вязкого трения. Также рассмотрена задача в рамках относительно новой модели трения, предложенной А.В.Карапетяном, обобщающая некоторые другие модели (в частности, Кулона и Контенсу-Журавлева). Для решения обратной задачи динамики используются общие теоремы динамики, а именно законы изменения импульса и кинетического момента. Автор использует уравнения движения как в векторном виде, так и в локальных координатах, которыми являются углы Эйлера.

Методики, использованные автором, а также проведенное им исследование динамики не вызывают сомнений. Численное моделирование позволяет оценить качество представленных аналитических результатов, а также эффективность предложенных алгоритмов для управления роботами.

Те научные выводы, которые предложены автором для дальнейшего применения в практических задачах об управлении сферороботами, в достаточной степени обоснованы.

Оценка новизны и достоверности. В качестве новых научных результатов можно выделить:

- Решение обратной задачи динамики для сферического робота на плоскости с различными моделями контактного взаимодействия (абсолютно шероховатая плоскость, плоскость с вязким трением, плоскость с двухпараметрическим трением А.В.Карапетяна)
- Решение обратной задачи динамики для сферического робота с центром масс вне геометрического центра
- Исследование свойств сил и моментов трения в модели А.В.Карапетяна, нахождение двух предельных режимов для свободного прямолинейного движения робота.
- Определение условий возможности движения для робота в рамках двухпараметрической модели трения

В целом, результаты, полученные автором, являются новыми знаниями научно-технической отрасли. Результаты работы позволяют создать управляющие алгоритмы для движения сферических роботов в условиях различных поверхностей, а также объясняют результаты практических экспериментов, в частности показывающих невозможность движения в ряде случаев. Согласно проведенному в работе анализу, можно подбирать необходимые материалы для

сферической оболочки роботов, а также электродвигатели с требуемыми параметрами. Выполненное в работе исследование для шаров с центром масс, не совпадающим с геометрическим центром, позволяет определить необходимость динамической балансировки, а в случае ее невозможности, скорректировать алгоритмы управления.

Достоверность научных положений и полученных результатов гарантируется в работе корректным использованием математических моделей и методов. Кроме того, имеет место совпадение с реальными экспериментальными данными, проводимыми для робота-шара SpheRob; совпадением модельных результатов расчетов, полученных другими авторами; проведенными экспериментами с помощью численного моделирования.

Основные результаты диссертации опубликованы в шести печатных работах, в том числе, в двух статьях журналов из перечня ВАК по специальности 01.02.01. Они неоднократно обсуждались на различных конференциях и получили одобрение ведущих специалистов.

Замечания по диссертационной работе в целом.

1. В работе отсутствует четкая постановка задачи. Конечно, она становится ясной в результате чтения работы, однако хотелось бы, чтобы (для удобства читателя) этому был посвящен отдельный раздел.
2. Уравнение кинетического момента (2) на стр. 12 текста диссертации записано не совсем корректно: в левой части фигурирует производная от вектора, проекции которого определены (как это указано далее автором) в подвижной (жестко связанной с телом) системе координат, а в правой части указан вектор моментов сил в неподвижной системе осей. Отмечу, что в исходной статье автора это уравнение записано вполне корректно. Кроме того, на указанной странице отсутствуют обозначения некоторых используемых величин, например, не написано, что такое « ω с крышкой». Читателю приходится догадываться до смысла таких символов самому.
3. В п. 2.1 диссертации приведены три примера конкретных конструкций роботов – шаров, для которых представлены результаты расчетов их инерционных параметров (матриц инерции) и которые впоследствии используются для подсчета кинетического момента робота и соответствующих управляющих угловых скоростей роторов. Здесь хотелось бы увидеть более подробные пояснения к тому, как были получены соответствующие матрицы инерции. По моему мнению, здесь не все результаты являются правильными. В частности, я считаю, что матрица C на стр. 15 текста диссертации (п. 2.1.2 «Шар с тремя маховиками на одной оси») должна иметь вид

$$C = \text{diag}\{c, c, c\}$$

в то время как в тексте диссертации она имеет вид

$$C = \text{diag} \{c+1/2, c+1/2, c\},$$

где $c = \frac{B_2}{2ml^2}$. Это следует из того, что матрица C «отвечает» за вклад, вносимый в кинетический момент шара-робота чисто управляющими угловыми скоростями роторов α (т.е., без учета угловой скорости самой шаровой оболочки).

4. Не все понятно в п. 2.1.3 «Шар с маховиком на вращающемся кольце», стр. 17 диссертации. Судя по представленному в работе описанию, диск-маховик помещен в кардановом подвесе, укрепленном внутри шаровой оболочки. Цитирую по тексту диссертации: «...внутри шара находится плоское твердое кольцо массы m_1 , центр которого совпадает с центром шара и которое может поворачиваться вокруг своих двух взаимно-перпендикулярных диаметров. Внутри этого кольца расположен диск-маховик, массы m_2 , вращающийся относительно его нормали, совпадающей с нормалью плоскости кольца....». В этом случае, очевидно, распределение и геометрия масс внутри шара при вращении этих маховиков будет меняться с течением времени, а подсчитать кинетический момент системы тогда будет крайне затруднительно. Тем не менее, такая задача решается в теории гироскопов и ей посвящено немало исследований. Однако, возможно, такую конструкцию можно реализовать, используя так называемые шаровые подвесы, ранее описанные в литературе. В таком случае автору стоило бы привести соответствующие более подробные объяснения и ссылки. Тем не менее и в этом случае, по моему мнению, будет меняться положение главных осей инерции системы внутри шара.
5. Не совсем понятно утверждение 1.1 на стр. 19 диссертации, где приведен первый векторный интеграл (3) в том случае, когда момент реакций относительно точки контакта μ^0 является полной производной по времени от некоторой вектор-функции в силу системы (1), (2). Однако, на мой взгляд, здесь возникает логический порочный круг, так как этот момент сам входит в правую часть системы (1), (2).
6. В п. 4.1.2 «Вращение вокруг вертикали» на стр. 70 диссертации, в главе, посвященной динамике несбалансированного шара, не совсем понятен вывод уравнения кинетического момента, приведенного на стр. 71 диссертации.

Отмеченные недостатки указывают на некоторую неопытность автора диссертации при литературном изложении своих научных исследований и не

вливают на мою положительную оценку диссертации в целом, как научно-квалификационного исследования в области теоретической механики.

Заключение. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Диссертационная работа Терехова Георгия Павловича содержит решение сложной и актуальной научно-технической проблемы, связанной с изучением динамики и построения управления сферическим роботом (в рамках различных моделей трения (в т.ч. двухпараметрическим трением А.В.Карапетяна) для решения многих практических задач, что отвечает квалификационным требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – теоретическая механика.

Официальный оппонент,

д.ф.-м.н, профессор кафедры

теоретической механики Московского

автомобильно-дорожного государственного

технического университета (МАДИ)



Розенблат Г. М.

*Проректор
по научной
работе*



Ушаков В.В.

27.09.2019