

ОТЗЫВ официального оппонента
о диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Чертополохова Виктора Александровича
на тему: «ВИЗУАЛЬНАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩИЕ
ИМИТАЦИИ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ НА СТЕНДАХ-
ТРЕНАЖЕРАХ»
по специальности 1.1.7. — «Теоретическая механика, динамика машин»

Простые тренажеры имитируют угловые и линейные ускорения, воспринимаемые вестибулярным аппаратом. Иной подход заключается в имитации изображения, воспринимаемого зрительными рецепторами. Попытка их объединить для усиления реальности приводит к необходимости синхронизации визуальной и динамической имитаций движения. Именно проблеме синхронизации, способам ее реализации и решению возникающих на этом пути задач посвящена диссертация В.А. Чертополохова.

Цель диссертации — разработать алгоритмы и соответствующее математическое обеспечение для эффективной имитации управляемых движений летательного аппарата на тренажерах. В этом контексте описываются алгоритмы для создания имитационных воздействий на подвижных стендах различных конфигураций — стенды-платформы с кривошипно-шатунными механизмами и стенды на базе робота-манипулятора. Если в динамическом имитаторе достаточно дважды продифференцировать перемещение для определения имитируемых перегрузок, то синтез визуальной и динамической имитаций заставляет заглянуть и в физиологию восприятия движений. Пожалуй, в этом заключается особенность исследования и заслуга диссертанта. Исследуются как общие закономерности и особенности этих имитационных систем, так и специфические сценарии их использования.

В процессе работы над диссертацией автором разработаны методы, обеспечивающие согласованную визуализацию и имитацию динамики движений. Результаты исследования применяются как в виртуальном, так и в реальном динамическом тренажере, демонстрируя их практическую реализуемость и применимость.

Актуальность темы

Актуальность выбранной темы диссертации не вызывает сомнений и обусловлена потребностью в создании систем, позволяющих эффективно, оперативно, безопасно и экономно обучать пилотов управлять движением в условиях неизбежных возмущений, воздействующих на аппарат. Разработка методов решения поставленных задач требуют объединения знаний по теоретической механике, управлению, математике. Следует отметить, что нарушение синхронизации приводит наряду с ошибочной имитацией и, как следствие, к неправильным вырабатываемым навыкам обучаемого также и к отрицательному физиологическому воздействию на его организм.

Степень обоснованности и достоверности положений, выносимых на защиту

Научные утверждения и выводы в диссертации обоснованы применением физиологически обоснованных подходов к проектированию алгоритмов имитации, корректности использованных моделей, применением достоверных математических методов исследования и численных расчетов, сопоставления результатов моделирования с экспериментально полученными результатами на стенде, сравнением с результатами других авторов.

Научная новизна

Автор представил новый метод синхронизации и координации визуальной и динамической имитаций управляемых движений летательного аппарата.

Разработал алгоритм идентификации геометрических параметров подвижного стенда опорного типа, который функционирует при произвольном, но не вырожденном расположении маркеров оптической системы отслеживания движений.

Важным результатом, полученным автором, является решение задачи оптимальной по быстродействию остановки на границе множества допустимых положений платформы. Это решение обеспечивает построение области активной фазы динамической имитации для двух вариантов исполнения стендов: опорного типа с кривошипно-шатунными механизмами и стенда на базе робота-манипулятора.

Также заслуживает внимания разработанный автором алгоритм управления подвижным стендом по ускорению, основанный на применении интегрального скользящего режима. Это алгоритм учитывает пороги чувствительности вестибулярной системы и ограничения на движение стенда. Его использование также позволяет устранить “дребезжание” тренажера, которое может привести к фатальным последствиям. Наличие порога чувствительности позволяет осуществить возврат тренажера в исходное состояние без ощущения этого действия обучаемым и в зависимости от фазы возврата даже обеспечивать на этом этапе имитацию ускорения. Теоретическое подтверждение эффективности алгоритма подкреплено сформулированной и доказанной теоремой о сходимости ошибки имитации к известной окрестности нуля при его применении.

Практическая значимость

Практическая значимость приведенных результатов заключается в сочетании физиологически обоснованных требований к имитации движения на тренажерах с разработанными алгоритмами идентификации геометрии тренажеров, идентификации и управления их движением. Результаты расчетов, подтвержденные математическим моделированием, доведены до

конкретных параметров алгоритмов, валидированных на динамическом стенде панорамной системы виртуальной реальности в МГУ. Разработанные подходы основываются на согласовании визуальной и динамической составляющих имитации, когда пилот сталкивается с задачей управления и принятия решений в условиях различных ускорений и движений, стараясь избежать сенсорного конфликта. Использование граничных значений угловых и линейных ускорений, которые человек не воспринимает, позволяет расширить диапазон имитации без потери ее качества. Результаты, полученные автором, могут лечь в основу математических и инженерных решений при создании тренажерных стендов для подготовки летного персонала.

Апробация работы и публикации

Полученные результаты научной работы были доложены на авторитетных всероссийских и международных конференциях. Основные результаты диссертации опубликованы в четырёх статьях в рецензируемых журналах, которые индексируются в международных базах данных Web of Science, Scopus и RSCI. Программное обеспечение, полученное в процессе выполнения диссертационной работы, зарегистрировано в установленном порядке. Результаты, полученные автором, были использованы при выполнении работ с организациями промышленности. Автореферат работы соответствует содержанию диссертации.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка обозначений и списка литературы. Полный объем диссертации – 161 страница текста с 66 рисунками и четырьмя таблицами. Список литературы содержит 117 наименований.

Во введении представлена проблематика динамической имитации, визуальной имитации и алгоритмов управления стендами-тренажерами.

Проведен обзор литературы по теме диссертации. Сформулированы цель работы и задачи, подлежащие решению.

В первой главе изложена постановка задачи динамической имитации управляемых движений летательного аппарата, включая взаимосвязь процесса имитации и устройства вестибулярного аппарата человека. Предложен подход, предусматривающий синтез алгоритмов динамической имитации в задаче моделирования полета с помощью платформы опорного типа с тремя степенями свободы. Представлен метод идентификации геометрических параметров платформы и построено множество допустимых положений стенда.

Во второй главе основное внимание уделяется принципам создания системы визуализации. Описывается математический аппарат задания преобразований пространства для визуализации "сцены" с учетом положения виртуальной камеры и предложена техника визуализации с учетом физиологических особенностей глаза человека.

В третьей главе решена задача синхронизации визуальной и динамической составляющих имитации. Предложен метод отслеживания угловых движений и строится прогноз углового движения подвижного стенда. Также в этой главе описано управление на основе интегрального скользящего режима с учетом порога чувствительности вестибулярного аппарата человека.

В четвертой главе представлена реализация алгоритмов синхронизации динамической и визуальной составляющих имитации для стенда-тренажера, основанного на комплексе, состоящем из промышленного робота-манипулятора и шлема виртуальной реальности. Описывается модель подвижного стенда, исследуется зависимость ускорений, используются методы теории игр для проверки робастности предложенного управления.

Заключение обобщает полученные в диссертационной работе результаты.

Замечания по тексту работы

1. В первой главе представлены различные функционалы, характеризующие качество динамической имитации. Однако, большинство из них не используются в последующих главах, что не дает возможности оценить их эффективность и релевантность.
2. Обозначения осей на рис.1.2. (стр.18) не соответствует обозначению осей системы координат, введенной на стр.19.
3. Угловая скорость ω получается из динамических уравнений вращательного движения, а выражение на стр. 19 устанавливает связь между угловой скоростью и производными координат (здесь – углов ориентации).
4. Введенные на стр. 109 координаты q станут обобщенными лишь после указания диапазонов их изменения, иначе отсутствует взаимно однозначное соответствие между координатным состоянием стенда и их значениями.
5. Не указаны единицы изменения шага интегрирования (стр. 127).
6. На странице 128 перемешаны единицы измерения (здесь и метры, и миллиметры).
7. Построение матрицы переходов между системами координат (стр.133) не должно зависеть от управления.
8. В работе есть указание на апробацию результатов в организациях космической и авиационной отраслей. Но характерные времена изменения линейных и угловых ускорений и скорости “бега” изображений в летательных аппаратах, используемых в этих отраслях, сильно разнятся. Этот факт не комментируется и не используется.
9. Про тактильные (реакция на локти от подлокотников, на спину от спинки кресла, на подошвы ног, на рукоятки управления) и звуковые сигналы лишь упоминается вскользь. Следовало бы оценить их вклад в общий объем информации, получаемой пилотом.

В целом диссертация написана грамотным и понятным языком. Лишь удалось обнаружить несоответствие на стр. 14 – XIII Мультиконференция проходила в онлайн формате, а не в Москве, на стр. 33 присутствие двух лишних запятых, использование вместо “векторы” во множественном числе – “вектора”, отсутствие ссылки в тексте на рис. 2.2 и использование одинаковых фонтов для обозначения векторов и скаляров.

Автор демонстрирует квалифицированное владение современными методами теоретической механики, теории оптимизации и робастного управления, а также эффективное применение вычислительных методов. Указанные выше замечания не уменьшают ценности проведенного исследования. Работа соответствует критериям и стандартам, установленным Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова для диссертаций.

Круг решенных задач подчеркивает комплексность проблемы создания тренажеров для подготовки летного состава и характеризует новизну полученных результатов. Постановка задач, используемые методы их решения и содержание диссертации в целом соответствуют специальности 1.1.7. – «теоретическая механика, динамика машин» (по физико-математическим наукам), а именно следующим ее направлениям: пп. 5. Управление движением, наблюдаемость и идентификация механических систем; пп. 12. Механика робототехнических и мехатронных систем, а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Чертополохов Виктор Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7. — «Теоретическая механика, динамика машин»

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,

главный научный сотрудник, и.о. заведующего отделом "Динамика космических систем" Федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук

Овчинников Михаил Юрьевич

—
"08" июня 2023 г.

Контактные данные:

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.02.01 Теоретическая механика

Адрес места работы:

125047, Москва, Миусская пл., 4

ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, отдел "Динамика космических систем"

Тел.: +7(499)220-78-13; e-mail: ovchinni@keldysh.ru

Подпись сотрудника ИПМ им. М.В. Келдыша РАН М.Ю. Овчинникова удостоверяю:
Ученый секретарь Федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук",

кандидат физ.-мат. наук

/А.А. Давыдов/

"08" июня 2023 г.