

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

доктора технических наук, доцента Обухова Артёма Дмитриевича  
на диссертационную работу Гайниязова Игоря Мадыхатовича на тему «Разработка алгоритмического и программного обеспечения для обработки сигналов программно-аппаратного комплекса измерения и сопоставления движений», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

### **1. Актуальность темы исследования**

Вопрос отслеживания движений и положения отдельных ключевых точек человека в процессе взаимодействия с различными человеко-машинными системами является крайне актуальным для многих сфер человеческой деятельности. Говоря о направлении систем виртуальной реальности (VR) и конкретно о VR-реабилитации, нельзя не отметить важность сбора, обработки и анализа больших объемов информации о двигательной активности человека при выполнении упражнений для получения объективных метрик и оценки качества данного процесса. Исследование мелкой моторики требует разработки и использования как высокоточных аппаратных средств, так и создания теоретических и практических подходов к анализу и обработке полученной от таких средств информации для решения задач сопоставления паттернов движения, их классификации, интеграции в другие информационные и технические системы. Создание таких высокоточных систем неизбежно сопряжено с проблемами избыточности данных, необходимости разработки алгоритмического и программного обеспечения для анализа и обработки данных о траекториях движения, имеющего достаточно высокую программную сложность. В своей работе Гайниязов И. М. подробно рассматривает решение обозначенных проблем для программно-аппаратного комплекса отслеживания движений кисти человека с спецификой применения МЭМС для отслеживания и анализа движений мелкой моторики руки.

Таким образом, диссертационное исследование Гайниязова Игоря Мадыхатовича посвящено решению актуальных проблем, обладает достаточной научной новизной и имеет высокое теоретическое и практическое значение.

### **2. Научная новизна полученных результатов**

В диссертационной работе представлены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1. Разработана методика хранения информации о движении кисти человека на основе анализа информационных сигналов с МЭМС-датчиков, позволяющая учитывать дрейф нулевого уровня выходных каналов датчиков единожды.

2. Обоснована возможность уменьшения размерности матрицы с данными о движении кисти человека от 24 до 48 раз без потери значимой информации о самом движении, основанная на вейвлет-преобразовании и корреляционном анализе.

3. Разработана научно-обоснованная методика для сравнения цифровых паттернов движений, обеспечивающая увеличение быстродействия программно-аппаратного комплекса от 14 до 17 раз по сравнению с аналогичными решениями без сжатия матрицы с данными о движении.

Представленные результаты соответствуют пунктам 5, 12 и 14 паспорта специальности 2.3.1.

### **3. Обоснованность и достоверность научных положений, сформулированных в диссертации**

Достоверность полученных результатов и научных положений подтверждается применением верифицированных методов системного анализа, математических, алгоритмических и инженерных методов, успешной апробацией на международных конференциях и форумах. Список использованных источников состоит из 128 наименований, включающий актуальные отечественные и зарубежные публикации.

Автором опубликовано 17 работ, включая 7 статей в рецензируемых изданиях, определённых ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, 5 статей в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science. Оформлено 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

### **4. Практическая значимость результатов диссертации**

Практическая значимость подтверждена внедрением полученных результатов внедрены в лабораторию клинико-поведенческих исследований человека УГИ УрФУ. Гайниязов И. М. успешно разработал программно-аппаратный комплекс измерения и сопоставления движений кисти человек, в котором реализовал представленные в диссертации методы сбора, обработки и визуализации данных, а также методики анализа биомеханической избыточности и сопоставление движений. Полученные результаты могут найти практическое применение при реализации программно-аппаратных комплексов на основе виртуальной реальности в профессиональной подготовке, реабилитации и диагностике заболеваний двигательной аппаратуры.

## 5. Оценка содержания диссертации и её оформления

Диссертационная работа содержит 121 страницу основного текста (всего 178 страниц), 56 иллюстраций (без приложений), 20 таблиц (без приложений). Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений.

В **первой главе** рассматривается анализ состояния предметной области с акцентом на следующих вопросах: проблемы контроля движений кисти человека; анализ, классификация и сравнение методов отслеживания движений, построенных на различных аппаратных решениях; применимость данных методов для отслеживания движений кисти человека; проблемы использования инерциальных датчиков, необходимость выполнения процедур обработки, фильтрации информации для снижения уровня шума; анализ специфики движений на основе биомеханического представления кисти человека. Проведенный анализ позволил успешно сформулировать постановку задач исследования и выявить существующие проблемы в предметной области.

Во **второй главе** рассматривается анализ особенностей информационных сигналов в комплексе контроля движений кисти человека. Автор подробно рассматривает специфику сигналов, полученных от акселерометра и гироскопа, проводит сравнение различных типов датчиков для обеспечения наилучшей точности сигнала, а также исследует различные варианты фильтрации и обработки данных. В рамках данной главы автором сформулирована концепция сбора, обработки и хранения информации от 16 датчиков, размещенных на кисти человека. Изложена методика хранения информации о движении кисти человека на основе анализа информационных сигналов с МЭМС-датчиков. Обоснована возможность уменьшения размерности матрицы с данными о движении кисти человека, основанная на вейвлет-преобразовании и корреляционном анализе. Разработано алгоритмическое обеспечение для учета дрейфа нулевого уровня выходных каналов датчиков.

**Третья глава** посвящена методике уменьшения размерности первичной информации, собираемых с инерционных датчиков. В ходе ее реализации обоснована возможность уменьшения размерности матрицы с данными о движении кисти человека от без потери значимой информации о самом движении, основанная на вейвлет-преобразовании и корреляционном анализе. Предложены методики трансформации данных о движении с помощью вейвлет-преобразования, выбора уровня вейвлет-преобразования и комбинации столбцов матрицы движения. Суммарный эффект применения предложенной методики позволили снизить объема данных составило от 24 до 48 раз по сравнению с исходным.

**Четвертая глава** включает материал о практической реализации алгоритмической и программной части системы контроля движений кисти человека, в ходе которого проведена апробация полученных ранее теоретических результатов и разработанных методик. Автором успешно выполнена задача классификации 7 различных движений. В ходе реализации программно-аппаратного комплекса за счет уменьшения объемов обрабатываемой информации достигнуто увеличение быстродействия программно-аппаратного комплекса от 14 до 17 раз по сравнению с аналогичными решениями.

В заключении содержатся выводы о решении поставленных задач, основные результаты, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

В приложениях к диссертационной работе представлен программный код процедур обработки и визуализации данных, снижения избыточности данных, выделения паттерна движения, отбора признаков движения, а также подробное описание аппаратной реализации программно-аппаратного комплекса для измерения и сопоставления движений кисти человека, что дополнительно подтверждает достоверность полученных результатов и их практическую значимость.

## **6. Замечания и вопросы по диссертации**

Вместе с этим следует отметить некоторые замечания и вопросы по содержанию диссертационной работы:

1. Проведенный анализ существующих подходов к отслеживанию движений человека недостаточно подробно раскрыл направление, основанное на технологиях компьютерного зрения, так как набор из нескольких камер позволил бы осуществить распознавание большого количества точек, причем, не только рук, но и тела целиком. Недостаточно рассмотрены особенности как маркерных, так и безмаркерных технологий отслеживания, хотя их применимость с каждым годом растет.

2. Рассматриваемый на странице 46 диссертации дрейф нулевого уровня выходного значения гироскопа на протяжении 300 миллисекунд вызывает вопросы, так как существующие исследования в этой области используют интервалы от десятков минут до нескольких часов для сбора необходимого объема данных. Необходимо также прокомментировать, исследовался ли нулевой дрейф по всем трем осям.

3. Рисунок 2.5 (страница 51 диссертации) вызывает вопросы в нескольких моментах: некоторые фильтры могли бы объединены и применены последовательно; также не представлено обоснование выбора параметров некоторых фильтров (например, фильтр Калмана с коэффициентом 3,29).

4. Есть определенные противоречия между рисунком 2.4 и таблицей 2.3 (страницы диссертации 49 и 53 соответственно), так как среди указанных устройств только MPU-9250 позволяет получать данные на частоте 3200 Гц и выше, судя же по тексту предпочтение отдается модели ВМ1160, которая ограничена частотой 1600 Гц. Впрочем, возможно в таблице 2.3 допущены опечатки, так как в дополнение к указанному гироскопу MPU-9250 имеет частоту дискретизации 8000 Гц.

5. На странице 81 диссертационной работы в разделе «Комбинация столбцов матрицы движения» рассматривается сортировка столбцов матрицы исходных данных, полученных с акселерометра и гироскопа. Вызывает вопрос, почему такая сортировка отсутствует по умолчанию в процессе сбора данных? Если же сортировка уникальна для различных сценариев сбора данных, этот момент стоит прокомментировать.

6. К сожалению, представив достаточно интересное решение с научной и технической точки зрения, автор работы недостаточно подробно показал его практическое применение, например, путем демонстрации траектории движения и углы поворота датчиков, размещенных на руке, для каждого из выбранных паттернов движения. Сравнение исходных данных от всех датчиков до и после оптимизации количества обрабатываемых каналов с визуальной точки зрения также представляет интерес, включая сравнение точности реконструкции всего массива точек из ограниченного их количества.

7. Общим замечанием ко многим рисункам, представленным в диссертации, является отсутствие пояснений относительно выбранной оси измерений (2.7-2.9) и опечатки в подписях к осям (рис. 3.5), а также отсутствие размерности на графиках со значениями после вейвлет-преобразования (например, 3.16, 4.2).

Приведенные замечания, в целом, не влияют на высокий научный уровень и практическую значимость диссертационной работы Гайнирова И.М.

## **7. Общая характеристика работы**

Диссертационная работа Гайнирова Игоря Мадыхатовича имеет высокую практическую и научную значимость, посвящено актуальной теме. Исследование выполнено в достаточном объеме, имеет строгую и логичную структуру, содержит теоретическую основу и практическую реализацию, является завершенной самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой. В работе представлен анализ предметной области, постановка задачи, описание авторских методик и их практическая реализация. Автореферат соответствует тексту диссертации.

## 8. Заключение по работе

Диссертация написана грамотным научно-техническим языком с выполнением требований по актуальности, научной новизне, практической значимости и представлению результатов в публикациях и результатах интеллектуальной деятельности. Считаю, что работа Гайнирова Игоря Мадыхатовича соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ и специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

### Официальный оппонент:

Доктор технических наук, доцент

Ведущий научный сотрудник НИЛ «Лаборатория медицинских VR тренажерных систем для обучения, диагностики и реабилитации» управления фундаментальных и прикладных исследований,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет»,

Тел.: +7 (915) 867-69-15

e-mail: obuhov.art@gmail.com

Адрес: 392000, Тамбов, Советская, 106/5, помещение 2

Обухов Артём Дмитриевич

 \_\_\_\_\_ 07.08.2024  
(подпись) (дата)

М.П.

