

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, доцента

Обухова Артема Дмитриевича на диссертацию

Павликова Артема Евгеньевича на тему «Разработка методов и алгоритмов оценки паттернов движения человека на основе обработки визуальной информации»

по специальности 2.3.8. «Информатика и информационные процессы»

на соискание ученой степени кандидата технических наук.

1. Актуальность диссертационного исследования

Диссертационная работа Павликова Артема Евгеньевича посвящена решению значимой научно-технической задачи разработки методов и алгоритмов автоматизированной оценки биомеханических параметров движения человека с использованием технологий компьютерного зрения.

В работе убедительно обосновано, что в условиях устойчивого роста показателя DALY (годы жизни, скорректированные по нетрудоспособности) для неврологических заболеваний и дефицита квалифицированного персонала, критически важным становится внедрение масштабируемых инструментов телереабилитации. Соискатель справедливо отмечает, что существующие подходы к объективизации контроля восстановления двигательных функций обладают рядом существенных ограничений. Так, классические инструментальные методы характеризуются высокой стоимостью и сложностью эксплуатации, а набирающие популярность носимые датчики (IoT) создают неудобства для пациентов с моторными нарушениями.

В диссертации показано, что перспективным направлением является переход к бесконтактным методам оценки позы на базе доступных монокулярных RGB-камер пользовательских устройств. Однако прямое применение существующих архитектур нейронных сетей осложняется высокими требованиями к вычислительным ресурсам и необходимостью обеспечения приватности медицинских данных.

В связи с этим, заявленная цель исследования — повышение эффективности программно-аппаратных комплексов персонализированной реабилитации посредством разработки методов и алгоритмов оценки паттернов движения человека на основе обработки визуальной информации — представляется своевременной и актуальной. Тематика работы, направленная на интеллектуализацию процессов поддержки принятия врачебных решений на основе анализа и обработке информации, полностью соответствует паспорту специальности и

Выход. № 16/26
« 22 » 01 20 26.
ПОДПИСЬ

приоритетам цифровизации здравоохранения, актуальность выбранной темы не вызывает сомнений.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Объект исследования определяется автором как «информационные процессы, методы и технологии цифровой обработки визуальной информации, а также автоматизированные информационные системы, обеспечивающие поддержку принятия решений в медицинской реабилитации пациентов с нарушениями функции верхнего плечевого сустава», предмет исследования – «методы, алгоритмы и программно-технические средства цифровой обработки визуальной информации и интеллектуальной поддержки принятия решений, обеспечивающие автоматизированную оценку стереотипа движений верхнего плечевого пояса».

Для достижения поставленной цели в работе решаются пять взаимосвязанных задач: проведен анализ методов цифровой обработки визуальной информации; разработан метод оценки амплитудно-скоростных характеристик плечевого сустава; сформирован набор метрик для оценки паттернов движений; разработан алгоритм выявления нарушений функции верхней конечности; спроектирована и апробирована архитектура автоматизированной информационной системы поддержки принятия врачебных решений.

Структурно диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (121 источник), двух приложений. Объем диссертации составляет 137 страниц текста, работа содержит 28 рисунков и 11 таблиц.

Во введении обоснованы актуальность, цель, объект, предмет, сформулированы задачи, изложены научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ предметной области. Рассмотрены традиционные клинико-функциональные шкалы, гониометрия и фотограмметрия, выявлены их ограничения, связанные с низкой временной и пространственной разрешающей способностью, субъективностью экспертных оценок и высокой трудоёмкостью измерений. Показано, что данные методы недостаточны для объективного мониторинга динамики движений в реальном времени. Рассмотрены современные цифровые подходы, включающие системы на основе инерциальных датчиков, носимых IoT-устройств и технологии биологической обратной связи, алгоритмы компьютерного зрения (Human Pose Estimation, HPE), обеспечивающим восстановление скелетной модели человека по видеопотоку одной RGB-камеры. Приведен

сравнительный анализ основных архитектур и тенденций развития методов НРЕ. Сформулированы требования к проектируемой системе, регламентирующие задержки обработки и вычислительные ресурсы.

Во второй главе рассмотрены основы разработки метода и алгоритмического обеспечения для оценки амплитудно-скоростных характеристик состояния плечевого сустава на основе визуальной информации. Представлены метрики качества моделей НРЕ (РСК, PDJ, mAP). Выполнен анализ наиболее распространённых датасетов, применяемых в задачах НРЕ: COCO, MPII Human Pose, Yoga-82, Sports-102 и PennAction и проводится сравнительный анализ архитектур OpenPose, PoseNet, MoveNet и BlazePose по показателям точности, скорости и вычислительной сложности. В результате сравнения обоснован выбор легковесных моделей (BlazePose) для работы на клиентских устройствах. Предложен метод оценки амплитудно-скоростных характеристик состояния плечевого сустава посредством анализа визуальной информации, включающий нормализацию координат и сегментацию фаз движения.

Третья глава посвящена разработке метода оценки двигательных паттернов у пациентов с нарушением функции верхней конечности и разработанного алгоритмического обеспечения, обеспечивающего его функционирование в режиме реального времени. Осуществлена формализация пространственно-кинематических характеристик движений для формирования пяти метрик оценки реабилитационных упражнений. Совокупность представленных критериев формирует формализованную основу для последующей автоматической проверки техники выполнения движений. Разработанный метод интегрирован в пять функциональных групп упражнений, охватывающих основные типы двигательных паттернов верхних конечностей

В четвертой главе рассмотрена интеграция разработанных методов цифровой обработки визуальной информации в состав автоматизированной информационной системы (АИС) для домашней телереабилитации. Представлены архитектурные и программно-алгоритмические решения, а также результаты её апробации и оценки эффективности, описана микросервисная архитектура разработанной АИС, результаты нагрузочного тестирования и экспериментальная валидация метода путем сравнения с инерциальной системой «СТЭДИС-Кинематика».

Обоснованность выводов в целом достигается использованием корректного математического аппарата, достаточным объемом экспериментальных данных и успешной апробацией разработанного программного обеспечения.

3. Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций

Научная новизна диссертации сформулирована автором следующим образом:

1. Разработаны метод и алгоритмическое обеспечение цифровой обработки визуальной информации, отличающиеся от существующих тем, что реализуют безмаркерную оценку позы человека, позволяющие извлекать амплитудно-скоростные характеристики движения в режиме реального времени (2.3.8, п.4).

2. Разработан метод интеллектуального анализа пространственно-временных паттернов движений посредством обработки визуальной информации, отличающийся от существующих реализацией оценки траекторий ключевых точек движения, позволяющий автоматически классифицировать типы отклонений кинематико-скоростных профилей движения верхней конечности (2.3.8, п.4).

3. Разработано алгоритмическое обеспечение локальной и распределённой обработки медицинских визуальных данных, отличающееся модифицированной компактной нейросетевой моделью, позволяющее выполнять весь вычислительный цикл на стороне клиента без серверной обработки (2.3.8, п.6).

4. Разработана архитектура автоматизированной информационной системы поддержки принятия врачебных решений, отличающаяся микросервисной архитектурой с включением модулей оценки паттернов движения по монокулярному зрению, позволяющая реализовать цикл «наблюдение–оценка–адаптация» и динамически корректировать реабилитационный протокол упражнений по объективным кинематическим признакам (2.3.8, п. 16).

Достоверность научных положений и выводов диссертации базируется на корректном использовании методов автоматической обработки визуальных данных, машинного и глубокого обучения, методов цифровой обработки сигналов и векторной алгебры при построении математических моделей оценки кинематики движений. Примененный автором аппарат статистического анализа соответствует современным стандартам.

Полученные теоретические результаты подтверждены достаточным объемом экспериментальных данных, полученных в ходе сравнительного тестирования разработанного программно-аппаратного комплекса с эталонной инерциальной системой «СТЭДИС-Кинематика». Достигнутый коэффициент корреляции (0/956) и отсутствие значимых расхождений в измерениях свидетельствуют о высокой точности предложенных алгоритмов оценки амплитудно-скоростных характеристик в реальных условиях эксплуатации.

5. Значимость для науки и практики полученных автором результатов

Научная значимость исследования заключается в развитии методов автоматизированного анализа биомеханики человека методами технического зрения. Автором формализована задача бесконтактной оценки качества выполнения реабилитационных упражнений как процесс анализа временных рядов координат ключевых точек, получаемых с монокулярной камеры. Предложенные методы сегментации фаз движения и метрики оценки (на основе угловых скоростей и симметрии) вносят вклад в теорию цифровой обработки сигналов сложной формы, позволяя объективизировать процесс диагностики моторных нарушений без применения дорогостоящего оборудования. Также научно значимым является обоснованный архитектурный подход к построению распределенных медицинских систем, реализующий перенос вычислительного цикла работы нейросетевых моделей на конечные устройства, что решает проблему баланса между приватностью данных и производительностью в телемедицине.

Практическая значимость работы состоит в создании и внедрении импортонезависимого программного обеспечения, готового к применению в клинической практике. Разработанная автоматизированная информационная система позволяет проводить мониторинг состояния пациентов в домашних условиях на широком спектре пользовательских устройств. Результаты работы подтверждены актами внедрения в лечебный процесс ООО «Басалдук» и ООО «ЦМР», где использование системы позволило сократить время на составление программ реабилитации и снизить нагрузку на медицинский персонал. Кроме того, практическая полезность подтверждается использованием разработанных алгоритмов в учебном процессе МТУСИ при подготовке специалистов в области информационных технологий.

6. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы к широкому использованию в сфере цифрового здравоохранения и медицинской реабилитации:

1. Медицинским учреждениям и реабилитационным центрам рекомендуется использовать разработанную автоматизированную информационную систему для организации процессов телереабилитации пациентов с заболеваниями опорно-двигательного аппарата и последствиями нарушений мозгового кровообращения.

2. Разработчикам медицинского программного обеспечения целесообразно применять предложенные автором архитектурные решения по организации распределенной обработки визуальных данных на стороне клиента.

В качестве направления дальнейших исследований рекомендуется расширить спектр детектируемых патологических паттернов и провести валидацию предложенных метрик на более широкой выборке пациентов с различной степенью тяжести моторных нарушений, а также рассмотреть возможность интеграции данных монокулярного зрения с показаниями носимых датчиков для повышения робастности системы в условиях сложных окклюзий.

7. Оценка содержания диссертации

Диссертация представляет собой завершенное научное исследование. Материал изложен логично, язык изложения соответствует требованиям технической литературы. Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертации. Публикации автора (12 работ, из них 3 в перечне ВАК) в достаточной мере отражают полученные результаты.

8. Замечания по диссертационной работе

При общем положительном впечатлении от работы необходимо отметить следующие замечания:

1. В работе делается упор на использование монокулярного RGB-видеопотока как исходного источника данных. Однако недостаточно полно проанализирована проблема зависимости точности измерений полученного решения от ракурса съемки, условий освещенности и перекрытия. Соискатель упоминает нормализацию координат, но не приводит оценки погрешности измерения углов (например, сгибания в локте) при отклонении оптической оси камеры от нормали к плоскости движения, что критично для домашних условий, где пациент не всегда может идеально позиционировать камеру и подобрать внешние условия.

2. В первом пункте научной новизны заявлен «метод и алгоритмическое обеспечение цифровой обработки визуальной информации». Однако, как следует из второй главы диссертации, задача детекции ключевых точек решается путем применения предобученной библиотеки MediaPipe без структурных изменений её архитектуры. Эксперименты по дообучению проводились автором для модели MoveNet, однако в итоговой реализации системы используется именно стандартная модель MediaPipe. В связи с этим

возникает вопрос: в чем заключается собственный вклад автора в метод обработки визуальной информации, если фактически используется готовое решение для экстракции признаков, а авторская разработка сводится к постобработке координат?

3. Проводилась ли проверка устойчивости предложенного алгоритма сегментации фаз движения (формула 2.13) у пациентов с неврологическими нарушениями? В таких условиях часто наблюдается тремор или неравномерность движения (рывки), что может приводить к ложному детектированию смены фаз.

4. Выборка для экспериментальной валидации (N=10, пятикратное повторение) представляется недостаточной для утверждения о надежности метода для широкой популяции, особенно учитывая антропометрическое разнообразие пациентов. Не ясно, включала ли выборка людей различного возраста, с различным индексом массы тела или выраженными патологиями опорно-двигательного аппарата.

5. В третьей главе описан контроль «наклона туловища» (метрика №4). Однако при использовании одной камеры проблематично достоверно отличить истинный наклон корпуса от поворота корпуса вокруг вертикальной оси (ротации), который в 2D-проекции также выглядит как смещение плеч.

6. Отсутствует анализ устойчивости системы к условиям освещенности. Для методов компьютерного зрения это ключевой фактор. Следовало бы привести граничные требования к освещенности сцены (в люксах) или отношению сигнал/шум, при которых гарантируется заявленная точность метрик PCK/PDJ.

7. В работе рассматривается микросервисная архитектура системы (рис. 4.1), однако для задачи, где основная вычислительная нагрузка лежит на клиенте, такая сложность серверной части может быть избыточной. Обоснование и сравнение данного подхода с монолитной архитектурой было бы уместно.

8. В диссертации не уделено внимания вопросу обработки окклюзий (самоперекрытий) частей тела, характерных для сложных реабилитационных упражнений. Использование параметра видимости упоминается, но алгоритм восстановления пропущенных данных при потере трекинга сустава детально не описан.

Указанные замечания не снижают ее научной и практической значимости.

9. Заключение

Диссертация Павликова Артема Евгеньевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной задачи повышения эффективности персонализированной реабилитации за счет внедрения методов

компьютерного зрения и автоматизированного анализа биомеханических паттернов. Работа соответствует паспорту специальности 2.3.8 – «Информатика и информационные процессы» (пункты 4, 6, 16) и отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

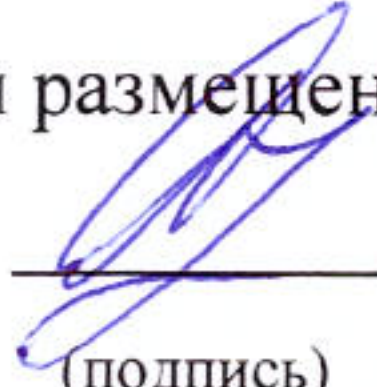
Считаю, что автор диссертационной работы Павликов Артем Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.8 – «Информатика и информационные процессы».

Официальный оппонент,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Системы автоматизированной
поддержки принятия решений»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ»

 / Обухов Артём Дмитриевич /
(подпись) (расшифровка подписи)
19.01.2026 г.

Научная специальность, по которой присуждена степень доктора технических наук:
2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации»

Я, Обухов Артём Дмитриевич, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 55.2.002.02 на базе ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» и их дальнейшую обработку и размещение.

 / Обухов Артём Дмитриевич /
(подпись) (расшифровка подписи)
19.01.2026 г.

Контактная информация:

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

Тел.: +7 (915) 867-69-15

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

e-mail: obuhov.art@gmail.com

Подпись Обухова Артёма Дмитриевича заверяю:

