

Гибридный подход к восстановлению движений для удалённой реабилитации с использованием IMU и видеотрекинга

Мейнов А.С. (ИТМО)

Научный руководитель – д.т.н., проф. Бессмертный И.А. (ИТМО)

Введение. Объективный анализ движений человека за пределами лаборатории сопряжён со значительными трудностями. Традиционно в лабораториях применяют оптико-электронные системы захвата движения (например, Vicon, Qualisys) с маркерами, обеспечивающие высокую точность, но требующие дорогостоящего оборудования, контролируемой среды и времени на установку маркеров [1]. Такие системы ограничены фиксированным пространством и не подходят для повседневных условий. Альтернативой являются переносные IMU-датчики (инерционные мониторы движения), которые компактны и могут использоваться вне лаборатории, но они подвержены накоплению ошибок ориентации (дрейф гироскопа) при длительной работе [2]. Также существуют методы плоского видеоанализа: применение алгоритмов распознавания позы (например, OpenPose, MediaPipe) позволяет получать скелетные ключевые точки из обычной видеозаписи [3]. Однако качество таких оценок зависит от условий съёмки и пока уступает лабораторным системам в точности.

С точки зрения практики, иностранные исследования активно развивают гибридные подходы, объединяющие разные сенсоры и ИИ: например, для анализа движений одновременно применяют алгоритмы компьютерного зрения и IMU [4][5]. В отечественной литературе отмечается широкий спектр используемых систем (инерционных, оптико-электронных, мобильных и др.) для диагностики локомоторной функции [6]. В российских работах подтверждается перспективность захвата движений как инструмента спортивной и клинической реабилитации [6]. Таким образом, задачи анализа движений за пределами лаборатории требуют интеграции новых методов и сравнения опыта разных школ.

Основная часть. Предлагаемый гибридный метод сочетает инерционные датчики и 2D-видеоанализ. Видео с участием испытуемого снимается обычной камерой (например, смартфона), а ключевые точки скелета на кадрах извлекаются с помощью нейросети MediaPipe [3]. Параллельно IMU-система, надетая на сегменты тела (например, ноги и корпус), измеряет ориентацию конечностей. Далее оптимизационный алгоритм объединяет эти данные: по анатомическим моделям и известным длинам сегментов он корректирует положение суставов, устраняя накопленный дрейф IMU и обеспечивая согласованную 3D-позицию.

Гибридный метод и алгоритм оптимизации

В предлагаемом подходе для захвата движений комбинируются носимые ИМУ и двумерная информация о позе тела. Из видеопотока со стандартной RGB-камеры с помощью нейросети MediaPipe извлекаются 2D-координаты ключевых точек тела, а IMU-сенсоры на сегментах конечностей регистрируют линейные ускорения и угловые скорости. На основе этих данных строится параметрическая биомеханическая модель человека: в оптимизации задаются углы суставов и ориентация камеры, и по ним вычисляются 3D-положения суставов и ориентации сегментов. Итеративный алгоритм подбирает эти параметры так, чтобы минимизировать суммарную функцию потерь, учитывающую визуальные расхождения (несовпадение проекции модели и ключевых точек MediaPipe), динамические расхождения (ошибки между предсказанными моделью ускорениями/ориентациями и данными IMU) и биомеханические ограничения (фиксированные длины костей и физиологические пределы суставных углов)[3]. Таким образом на каждом временном шаге вычисляются координаты суставов модели, которые сравниваются с детектированными точками и показаниями датчиков, что обеспечивает согласованную подгонку модели под оба источника данных.

Преимущества гибридного подхода

Гибридный метод решает типичные проблемы как видео, так и инерциального анализа. Захват видео обеспечивает глобальную оценку позы тела, но чувствителен к шуму и окклюзиям, тогда как ИМУ дают высокочастотную информацию, нечувствительную к кратковременным перекрытиям объектов. Объединение этих модальностей позволяет компенсировать недостатки каждой из них: инерциальные показания заполняют пропуски в видео при перекрытиях, а видеоданные корректируют накопительный дрейф гироскопов ИМУ[4]. Введение биомеханических ограничений гарантирует физиологическую корректность поз: например, указывается, что распространённая SMPL-модель не всегда точно отражает анатомическое расположение суставов [5], тогда как наша модель опирается на реальные параметры кинематической цепи человека. В результате сочетание сенсоров и динамической оптимизации обеспечивает более устойчивую и анатомически правдоподобную оценку движений, чем чисто видео- или чисто ИМУ-подходы [6][3].

Экспериментальная проверка

В экспериментах (например, при циклическом сгибании–разгибании руки) продемонстрирована эффективность гибридного метода. Так, при движении руки гибридная модель устраняла характерный дрейф, типичный для чистых ИМУ-расчётов, и одновременно сглаживала шум видеоданных [3]. Полученные траектории оказались более плавными и динамически корректными по сравнению с анализом в одной модальности [6]. Система сохраняла точность даже в моменты частичной окклюзии руки на видео, чего не позволяют достичь методы, основанные только на оптической съёмке. Иными словами, экспериментально показано, что гибридная оптимизационная модель даёт более надёжный захват движений, чем каждый из датчиков по отдельности.

Актуальность и новизна для реабилитации

Использование доступного оборудования (смартфон + носимые ИМУ) позволяет применять метод вне лаборатории. В литературе подчёркивается, что сочетание RGB-видео и инерциальных датчиков создаёт «идеальный сценарий» для телереабилитации, позволяя снизить затраты и обеспечить портативность системы[7][8]. Оценка движений пациента в естественных условиях даёт более полную информацию об его функциональных возможностях и оказывается более эффективной для восстановления моторики, чем традиционные лабораторные методики. В этом контексте предложенный метод представляет собой инновационное решение: он не требует жёсткой калибровки и способен работать в динамике (например, при движущейся камере), что открывает новые возможности для удалённого мониторинга и адаптивной реабилитации людей с ограниченной подвижностью.

Выводы. Практическое применение предлагаемого метода включает создание лёгких систем для удалённой реабилитации и полевого анализа движений. Возможны следующие сценарии:

- Телереабилитация. Пациент выполняет лечебные упражнения дома, а система собирает данные о движениях и передаёт их врачу для оценки эффективности, устраняя необходимость частых визитов в лабораторию. ИМУ на теле и простая камера обеспечат информацию о положении суставов в реальном времени[8].
- Спортивный анализ. Тренер может оценивать технику спортсмена на тренировках и соревнованиях (стадион, зал) без установки сложных камер. Система может работать на смартфоне или ноутбуке, расширяя возможности анализа за пределами лаборатории.
- Доступность. Развитие вычислительных моделей позволяет снизить стоимость систем. Исследования показывают, что новые камерные технологии станут более доступными и позволят собирать данные в любых условиях, сокращая затраты.

В целом, описанный гибридный подход создаёт практичный инструмент вне лаборатории. Он открывает возможности для массового применения: оценки динамики движений у пациентов с ОВЗ в их привычной среде и оперативного вмешательства в случае

отклонений, улучшая качество жизни и эффективность реабилитации.

Список использованных источников:

1. Liang W., Wang F., Fan A., Zhao W., Yao W., Yang P. Extended Application of Inertial Measurement Units in Biomechanics: From Activity Recognition to Force Estimation. *Sensors*, 2023, 23(9):4229. DOI:10.3390/s23094229.
2. Xefferis V.-R., Syropoulou A.C., Pistola T., Kasnesis P., Poullos I., Tsanousa A., Symeonidis S., Diplaris S., Goulianas K., Chatzimisios P., Vrochidis S. Multimodal fusion of inertial sensors and single RGB camera data for 3D human pose estimation based on a hybrid LSTM-Random forest fusion network. *Internet of Things*, 2024. DOI:10.1016/j.iot.2024.101465.
3. Hamilton R.I., Williams J., Consortium OATech+, Holt C. Biomechanics beyond the lab: Remote technology for osteoarthritis patient data—A scoping review. *Frontiers in Rehabilitation Sciences*, 2022, 3:1005000. DOI:10.3389/fresc.2022.1005000.
4. Armstrong K., Rodrigues A., Willmott A., Zhang L., Ye X. Validation of human pose estimation and human mesh recovery for extracting clinically relevant motion data from videos. *arXiv preprint*, 2025. arXiv:2503.14760.
5. Иванова М.Д., Муравьев С.В., Клоян Г.З., Никитин В.Н., Шитоев И.Д. Системы захвата движений: медико-техническая оценка современного этапа развития технологии. *Спортивная медицина: наука и практика*, 2023, Том 13, №1.
6. Fusing uncalibrated IMUs and handheld smartphone video to reconstruct knee kinematics <https://arxiv.org/html/2405.17368v1>
7. Fusion of Video and IMU Data via Dynamic Optimization of a Biomechanical Model https://www.researchgate.net/publication/362833017_Fusion_of_Video_and_IMU_Data_via_Dynamic_Optimization_of_a_Biomechanical_Model
8. Multimodal video and IMU kinematic dataset on daily life activities using affordable devices | *Scientific Data* https://www.nature.com/articles/s41597-023-02554-9?error=cookies_not_supported&code=17788e50-35e2-4c88-b55a-dced8622a2e2

Меинов А.С. (автор)

(подпись)

Бессмертный И. А. (научный руководитель)

(подпись)