

*Пашинин Артём Артёмович*

*магистрант, Московский авиационный институт (национальный  
исследовательский университет), город Москва*

## **ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ПОЗЫ ЧЕЛОВЕКА И АДАПТИВНОЙ ВИЗУАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ ДВИЖЕНИЙ В БИОТЕХНИЧЕСКИХ РЕАБИЛИТАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

**Аннотация.** В работе рассматривается задача разработки интеллектуального алгоритма анализа позы человека и формирования адаптивной визуальной обратной связи для коррекции движений верхней конечности в биотехнических реабилитационных системах с дополненной реальностью. Современные средства компьютерного зрения позволяют получать координаты суставов с высокой точностью, однако сами по себе эти данные не обеспечивают содержательной оценки корректности выполнения реабилитационного упражнения и не определяют параметры визуальной подсказки. Предложен гибридный алгоритмический подход, объединяющий базовый контур на фиксированных правилах и обучаемый временной модуль, реализованный в вариантах классического классификатора по агрегированным признакам и нейросетевой модели с одномерными временными свёртками. Правила обеспечивают интерпретируемую связь с эталонной моделью микрофазы движения, а обучаемый компонент учитывает совокупность признаков и временную динамику. Выходом алгоритма является структурированное решение: оценка качества выполнения микрофазы, тип ошибки из фиксированного каталога, выраженность отклонения и параметры визуальной подсказки (шаблон, пространственная привязка, интенсивность, длительность). Проведено экспериментальное сравнение пяти вариантов обработки на синтетическом наборе скелетных микрофаз с контролируемыми отклонениями, а также демонстрационная проверка на

открытом наборе данных REHAB24-6. Результаты показывают, что гибридная схема с нейросетевым модулем обеспечивает наилучшее качество оценки движения: средняя абсолютная ошибка оценки качества составила 0,083 против 0,250 у базового алгоритма на правилах при времени обработки менее 0,21 мс на микрофазу.

**Ключевые слова:** анализ позы человека, скелетное представление, оценка корректности движения, визуальная обратная связь, дополненная реальность, реабилитационные системы, гибридный алгоритм, временные свёрточные сети

**Annotation.** The paper addresses the problem of developing an intelligent algorithm for human pose analysis and adaptive visual feedback generation for upper limb movement correction in biotechnical rehabilitation systems with augmented reality. Modern computer vision methods provide joint coordinates with high accuracy, but these data alone do not offer a meaningful assessment of rehabilitation exercise correctness and do not determine the parameters of a visual cue. A hybrid algorithmic approach is proposed, combining a fixed-rule baseline with a learned temporal module implemented in two variants: a classical classifier over aggregate features and a neural network model with one-dimensional temporal convolutions. The rules ensure an interpretable link with the reference microphase model, while the learned component accounts for the set of features and temporal dynamics. The algorithm output is a structured decision: microphase quality score, error type from a fixed catalog, deviation magnitude, and visual cue parameters (template, spatial anchor, intensity, duration). An experimental comparison of five processing variants was performed on a synthetic dataset of skeletal microphases with controlled deviations, along with a demonstration check on the open REHAB24-6 dataset. Results show that the hybrid scheme with the neural module achieves the best movement quality assessment: mean absolute error of the quality score was 0.083 versus 0.250 for the rule-based baseline, with processing time under 0.21 ms per microphase.

**Keywords:** human pose analysis, skeletal representation, movement quality assessment, visual feedback, augmented reality, rehabilitation systems, hybrid algorithm, temporal convolutional networks

## **Введение**

Развитие методов компьютерного зрения позволило получать координаты суставов человека в реальном времени с высокой точностью. Однако в реабилитационных биотехнических системах сами по себе координаты не решают ключевую задачу: автоматическую оценку корректности выполнения упражнения и определение параметров корректирующей подсказки. Биотехническую систему сопровождения двигательной активности можно представить как замкнутый контур «наблюдение --- интерпретация --- корректирующее воздействие», где центральным звеном является интерпретирующий алгоритм.

Дополненная реальность (AR) --- перспективная среда для визуальной обратной связи в реабилитации, поскольку позволяет расположить подсказку непосредственно в пространственной сцене, совмещая виртуальные индикаторы с реальным движением. Однако эффективность AR-подсказки критически зависит от качества вычислительного модуля, который определяет тип, привязку и интенсивность подсказки.

Задача автоматической оценки качества реабилитационных движений активно исследуется, но большинство работ ограничиваются бинарной оценкой «правильно / неправильно» без указания конкретного типа ошибки и параметров визуальной коррекции. Цель данной работы --- разработка гибридного алгоритма анализа позы верхней конечности и формирования адаптивной визуальной обратной связи, объединяющего детерминированный контур правил и обучаемый временной модуль. Выходом алгоритма является структурированное решение: оценка качества микрофазы, тип ошибки, выраженность отклонения и параметры визуальной подсказки.

## **Обзор существующих методов**

Современные детекторы позы --- OpenPose, BlazePose, HRNet, RTMPose --- позволяют извлекать скелетное представление из RGB-изображений с точностью, достаточной для анализа движений. На уровне временной интерпретации скелетных последовательностей применяются многостадийные временные свёрточные сети MS-TCN, эффективно выделяющие пространственно-временные паттерны.

Визуальная обратная связь играет центральную роль в моторном обучении, а AR демонстрирует преимущество перед традиционными экранами за счёт совмещения подсказки с реальной сценой. Автоматическая оценка движений с использованием машинного обучения рассмотрена в, где предложена архитектура для классификации движений и оценки их качества на основе скелетных данных.

Ключевой пробел рассмотренных систем --- отсутствие явной связки между типом выявленной ошибки и формой корректирующего воздействия. Результат, как правило, сводится к бинарной или численной оценке. Данная работа направлена на устранение этого пробела: алгоритм определяет конкретный тип отклонения относительно эталона и формирует параметры визуальной подсказки для AR-модуля. Для демонстрационной проверки используется открытый набор реабилитационных упражнений RENAB24-6.

## **Предлагаемый алгоритм**

### **Формализация задачи**

Движение верхней конечности рассматривается на уровне микрофазы — короткого временного окна, содержащего одно полное выполнение упражнения. Пусть микрофаза представлена окном скелетных наблюдений  $Z_k = \{s_t\}$ , где  $s_t$  — координаты суставов (плечо, локоть, запястье) в момент  $t$ . Эталонная модель  $M_k$  задана набором допустимых диапазонов:  $M_k = \{a_k, g_k, v_k, r_k, \tau_k, s_k\}$ , где  $a_k$  — амплитуда,  $g_k$  — направление,  $v_k$  — скорость,  $r_k$  — целевая

область,  $\tau_k$  — длительность,  $s_k$  — устойчивость. Каждый компонент сопровождается допуском, определяющим границы фиксации отклонения. Для окна  $Z_k$  вычисляются кинематические и траекторные признаки  $\Phi_k$  (углы суставов, скорость запястья, расстояние до цели, устойчивость) и агрегированный вектор  $x_k$  (фактические значения амплитуды, направления, скорости, минимального расстояния до цели, длительности, устойчивости). Выход алгоритма — тройка  $(q_k, e_k, \delta_k)$ , где  $q_k \in [0, 1]$  — оценка качества,  $e_k$  — тип ошибки из каталога  $E = \{ a, g, v, r, \tau, s, str \}$  (соответственно: амплитуда, направление, скорость, недостижение цели, длительность, устойчивость, структура),  $\delta_k \in [0, 1]$  — выраженность отклонения.

### Гибридная архитектура

Предлагаемый алгоритм состоит из трёх компонентов (рисунок 1). Базовый контур на правилах: для каждого типа ошибки вычисляется компонентное отклонение  $\delta_i$  как нормированная величина выхода параметра за допустимый диапазон эталона. Оценка качества:  $q_V = 1 - \sum w_i \cdot \delta_i$ , где  $w_i$  — настраиваемые веса важности компонентов. Обучаемый временной модуль реализован в двух вариантах: классический классификатор по агрегированному вектору  $x_k$  (логистическая регрессия или гауссов наивный байесовский классификатор) и нейросетевой модуль с одномерными временными свёртками (TCN) над последовательностью  $\Phi_k$ . Выход: распределение вероятностей по классам ошибок  $p_k$  и оценка качества  $q_N$ . Модуль объединения: итоговая оценка — взвешенная линейная комбинация:  $q = \lambda \cdot q_V + (1 - \lambda) \cdot q_N$ . Тип ошибки выбирается по результатам обучаемого модуля при достаточной уверенности ( $\max(p_k) \geq \tau_e$ ), иначе сохраняется результат правил.

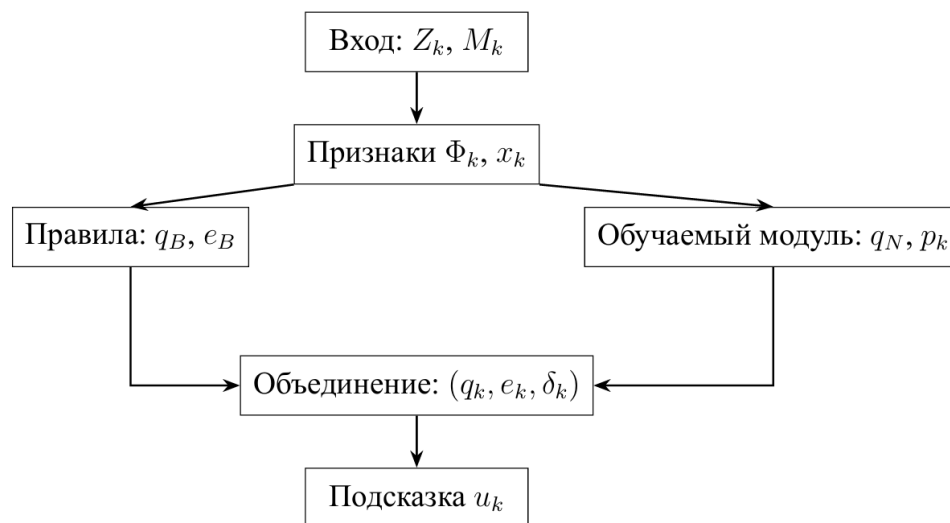


Рисунок 1 — Архитектура гибридного алгоритма

Гибридная схема имеет два принципиальных преимущества: правила обеспечивают гарантированный baseline, не зависящий от объёма обучающей выборки и работающий как страховка при низкой уверенности модели; два независимых контура упрощают отладку — для любого ошибочного решения можно установить, на каком этапе произошёл сбой.

### Формирование визуальной подсказки

Решение  $(q_k, e_k, \delta_k)$  преобразуется в управляющий вектор  $u_k = (\mu_k, \omega_k, \gamma_k, T_k^u, \sigma_k)$  для модуля AR-визуализации, где  $\mu_k$  — тип шаблона (маркер целевого положения для ошибки амплитуды, стрелка направления, подсветка цели, темповой индикатор, коридор траектории),  $\omega_k$  — пространственная привязка,  $\gamma_k \in \{1, 2, 3\}$  — интенсивность,  $T_k^u$  — длительность показа,  $\sigma_k \in \{0, 1\}$  — сигнал адаптации сценария при устойчиво низком качестве.

## **Программная реализация и экспериментальная оценка**

### **Программный прототип**

Алгоритм реализован как модульный Python-пакет. Конвейер обработки включает загрузку скелетных CSV/JSON-данных, предобработку (интерполяция пропусков, сглаживание скользящим средним, нормализация координат относительно плеча), сегментацию на микрофазы, вычисление признаков, базовый контур правил, обучаемые модули (классический классификатор и TCN), объединение результатов и формирование параметров подсказки. Прототип не содержит собственного извлекателя позы из RGB --- входом служат готовые скелетные координаты, что позволяет подключить любой внешний детектор. Все случайные процедуры фиксированы seed-параметрами; прототип работает на CPU без GPU.

### **Экспериментальный протокол**

Основной эксперимент выполнен на синтетическом наборе из 80 скелетных микрофаз (по 10 на каждый из 8 классов: корректное выполнение и 7 типов отклонений), сгенерированных на основе кинематической модели достижения целевой области. Выборка разделена на обучающую (56) и тестовую (24) части со стратификацией по метке ошибки (`test\_size = 0{,}33`, `seed = 2026`). Обучаемые компоненты тренированы только на train-выборке; все метрики --- на test-выборке. Конфигурация TCN: `hidden\_channels = 10`, `epochs = 180`, `learning\_rate = 0{,}045`.

Демонстрационная проверка проведена на фрагменте RENAB24-6 (упражнение «отведение руки», участник PM\\_032). Эталонная модель построена статистически по корректным повторениям как среднее  $\sqrt{m}$  2 стандартных отклонения признаков. Проверка носила бинарный характер (correct/incorrect) ввиду отсутствия детальной разметки типов ошибок в наборе.

Метрики: Accuracy и macro-F1 --- классификация типа ошибки; MAE\_q --- ошибка оценки качества; MAE\\_delta --- ошибка выраженности отклонения; `t_{avg}` (мс) --- время обработки микрофазы.

## Результаты и обсуждение

Результаты сравнения методов представлены в таблице.

Базовый алгоритм показывает относительно невысокую точность классификации (Accuracy = 0{,}625), что ожидаемо для жёстких порогов. Обучаемые модули достигают безошибочной классификации на синтетическом наборе. Гибридная схема с TCN даёт наилучшую оценку качества (MAE\_q = 0{,}083 против 0{,}250 у baseline), что подтверждает эффективность объединения двух контуров. Все варианты работают быстрее реального времени (максимум 0{,}205 мс на микрофазу при длительности 1--3 с).

Демонстрационная проверка на RENAB24-6 подтвердила способность алгоритма обработать реальные скелетные данные через полный конвейер. Ограничения: синтетический набор не отражает всей вариативности реальных движений; бинарная проверка не позволяет оценить многоклассовую точность; результаты не являются клинической валидацией.

**Таблица 1 — Сравнение методов на тестовой выборке синтетического набора**

| Метод                       | Accuracy     | Macro-F1     | MAE_q        | Время, мс    |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Правила (baseline)          | 0,625        | 0,521        | 0,250        | 0,008        |
| Обуч. классификатор         | 1,000        | 1,000        | 0,399        | 0,051        |
| Гибрид (прав. + класс.)     | 1,000        | 1,000        | 0,101        | 0,063        |
| Нейросетевой TCN            | 1,000        | 1,000        | 0,346        | 0,194        |
| <b>Гибрид (прав. + TCN)</b> | <b>1,000</b> | <b>1,000</b> | <b>0,083</b> | <b>0,205</b> |

## Заключение

В работе предложен гибридный алгоритм анализа позы верхней конечности и формирования параметров адаптивной визуальной обратной связи для биотехнических реабилитационных систем с дополненной реальностью. Научная новизна заключается в интеграции трёх составляющих: формализации оценки корректности движения на уровне микрофазы с каталогом типов ошибок и



количественной мерой отклонения; гибридной архитектуры, объединяющей интерпретируемый контур правил с обучаемым временным модулем; полного цикла преобразования скелетных координат в параметры визуальной подсказки для AR-модуля.

Экспериментальное сравнение пяти вариантов на синтетическом наборе показало, что гибридная схема с TCN даёт наилучшее качество ( $MAE_q = 0,083$  против  $0,250$  у baseline) при времени обработки менее  $0,21$  мс на микрофазу. Практическая значимость состоит в создании модульного прототипа, пригодного для встраивания в AR-систему и не привязанного к конкретному детектору позы или устройству.

Перспективные направления: расширение проверки на реальных видеоданных, улучшение оценки выраженности отклонения  $\Delta_k$ , интеграция с устройством дополненной реальности, пользовательское исследование восприятия визуальных подсказок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Azuma R.T. A Survey of Augmented Reality // Presence: Teleoperators and Virtual Environments. 1997. Vol. 6. No. 4. P. 355–385. DOI: 10.1162/pres.1997.6.4.355.
2. Sigrist R., Rauter G., Riener R., Wolf P. Augmented Visual, Auditory, Haptic, and Multimodal Feedback in Motor Learning: A Review // Psychonomic Bulletin & Review. 2013. Vol. 20. P. 21–53. DOI: 10.3758/s13423-012-0333-8.
3. Ahmed T., Thopalli K., Rikakis T., Turaga P., Kelliher A., Huang J.-B., Wolf S.L. Automated Movement Assessment in Stroke Rehabilitation // Frontiers in Neurology. 2021. Vol. 12. P. 720650. DOI: 10.3389/fneur.2021.720650.
4. Cao Z., Hidalgo G., Simon T., Wei S.-E., Sheikh Y. OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2021. Vol. 43. No. 1. P. 172–186. DOI: 10.1109/TPAMI.2019.2929257.

5. Shotton J., Fitzgibbon A., Cook M., Sharp T., Finocchio M., Moore R., Kipman A., Blake A. Real-Time Human Pose Recognition in Parts from Single Depth Images // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2011. P. 1297–1304. DOI: 10.1109/CVPR.2011.5995316.

6. Abu Farha Y., Gall J. MS-TCN: Multi-Stage Temporal Convolutional Network for Action Segmentation // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2019. P. 3575–3584. DOI: 10.1109/CVPR.2019.00369.

7. Černek A., Sedmidubský J., Budiková P. Pose Estimation Analysis and Fine-Tuning on the REHAB24-6 Rehabilitation Dataset // Information Systems. 2025. DOI: 10.1016/j.is.2025.102579.