Анализ и контроль биомеханики движений человека на основе нечёткой логики

И. А. Шергин*, А. П. Рыжов‡

Предлагается метод анализа и контроля техники выполнения физических упражнений по видеопотоку с одной камеры: модель оценки позы переводит кадры в координаты ключевых точек тела, признаковое пространство — в биомеханически интерпретируемые характеристики, а нечёткий вывод по базе правил эксперта-тренера формирует голосовые корректировки в реальном времени.

Ключевые слова: оценка позы человека, нечёткая логика, киберфизические системы, биомеханика движений.

1. Введение

По данным Всемирной Организации Здравоохранения, недостаточная физическая активность охватывает около 31% взрослого населения мира [1], для восполнения этого нужно заниматься физическими упражнениями, оздоровительный эффект которых достигается лишь при правильной технике выполнения, в массовом случае это достигается под контролем эксперта-тренера, чей ресурс ограничен. Безмаркерная оценка позы человека (human pose estimation, HPE) по видео с одной камеры создала основу для автоматизации контроля. В статье представлен метод, закрывающий этот разрыв — от монокулярной оценки позы до адресных голосовых корректировок — как киберфизическая система (КФС) с человеком в контуре; составляющие метода опубликованы в [3, 4].

Шергин Иван Андреевич — аспирант каф. интеллектуальных информационных технологий ф-та ВМК МГУ, e-mail: i.a.shergin@gmail.com.

Shergin Ivan Andreevich — PhD student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Department of Intelligent Information Technologies.

‡*Рыжов Александр Павлович* — профессор, д.т.н. каф. интеллектуальных информационных технологий ф-та ВМК МГУ, e-mail: alexander.ryjov@gmail.com.

Ryzhov Alexander Pavlovich — Professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Department of Intelligent Information Technologies.

Опубликовано на условиях лицензии CC-BY 4.0
Published under CC-BY 4.0

2. Постановка задачи

Выполнение упражнения представляется набором кадров $Exercise = \{frame_t \mid t = 1, \ldots, T\}$, модель оценки позы — отображением

$$M\colon frame_t \mapsto \{\, keypoint_i^t = (x_i^t, y_i^t, z_i^t, v_i^t) \mid i = 1, \ldots, N_p \,\},$$

где $N_p = 33$ — число ключевых точек, $v_i^t \in [0, 1]$ — степень видимости точки. Знания тренера моделируются базой нечётких правил [2]: для каждого признака f совместно с экспертом задаются терм-множество $A_f = \{A_f^j\}$ и функции принадлежности, а правила связывают термы признаков с корректировками.

Задача: по видеопотоку и конфигурации упражнения (референсные позы, терм-множества, база правил $Rules_{fuzzy}$, корректировки $Corrections_{fuzzy}$) построить работающий в реальном времени оператор нечёткого вывода

$$\gamma\colon Rules_{fuzzy} \times F_t^{fuzzy} \to Corrections_{fuzzy},$$

где F_t^{fuzzy} — фаззифицированный вектор признаков в момент t, так, чтобы занимающийся получал корректировки, а контур управления замыкался через изменение его движения. Требования к оператору γ в статье не рассматриваются.

3. Метод

Метод организован как конвейер: захват видео → оценка позы → анализ ключевых точек → вычисление признаков → сегментация выполнения → нечёткий вывод → голосовая корректировка; в терминах КФС конвейер замыкает контур управления движением человека. Более подробное описание архитекетуры метода представлено в работе [3].

Признаковое пространство. В общем случае признаковое пространство вводится как $F_t = FBase_t \cup FAgg_t$, $|FBase_t| = N_1$, $|FAgg_t| = N_2$, и переводит координаты в термины тренера, устраняя зависимость от положения в кадре, расстояния до камеры и антропометрии, где $FBase_t$ - множество базовых признаков (вычисляются на основе ключевых точек), а $FAgg_t$ - множество агрегационных признаков (вычисляются на основе базовых признаков). N_1 и N_2 зависят от конкретного упражнения. Примеры признаков: углы между частями тела и углы относительно вертикали/горизонтали; расстояния между частями тела, калиброванные по росту пользователя; скорости движения частей тела.

Упражнение задается как последовательность референсных поз, которые необходимо выполнить человеку. Вводится метрика сравнения произвольной позы $user$ и референсной ref: $\mu_A(user, ref) = \sum_{i \in A}(a^i_{user} - a^i_{ref})^2$, где a^i - значение угла в градусах i-ой части тела, а A - верхняя или нижняя половина тела человека. Полученное значение нормируется наибольшей достижимой разницей до референсной позы $\mu^{\max}_A(ref)$ (макс. 180°). Благодаря чему можно получить нормированное значение метрики сравнение поз:

$$\mu^{norm}_{pc}(user, ref) = \sqrt{\frac{\sum_A \alpha_A \, \mu_A(user, ref)/\mu^{\max}_A(ref)}{\sum_A \alpha_A}} \in [0, 1],$$

где $\alpha_A \in \mathbb{R}_+$ — веса важности. Переход к действию k фиксируется, когда поза становится ближе к референсной позе ref_k, чем к ref_{k-1}, в смысле μ^{norm}_{pc}; из моментов переходов получаются длительности действий и повторов, а на их основе – оценки интенсивности и выносливости темпа выполнения. Пространство дополняют симметрия позы и синхронность движения частей тела.

Более подробное описание представлена в работе [4].

Принятие решений. База правил организована иерархически: на нижнем уровне вычисляются частные лингвистические оценки аспектов техники (положение, темп, симметрия, синхронность), на верхнем — агрегирование и приоритезация корректировок. Вывод Мамдани с пороговым выбором команд предъявляет одну команду согласно приоритетам классов ошибок; команда прослеживается до сработавших правил (объяснимость), а персонализация адаптирует функции принадлежности и состав правил к возможностям пользователя.

Список литературы

[1] World Health Organization, “Nearly 1.8 billion adults at risk of disease from not doing enough physical activity”, электронный ресурс, https://www.who.int/news/item/26-06-2024-nearly-1.8-billion-adults-at-risk-of-disease-from-not-doing-enough-physical-activity, 2024.

[2] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets”, *Information and Control*, **8**, 1965, 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.

[3] I. A. Shergin, A. P. Ryjov , N. K. Novikova, N. M. Akhmedzhanov, “Exercise performance monitoring system by Hybrid Intelligence tools: Architecture”, *Moscow University Journal. Series 15. Computational Mathematics and Cybernetics*, 2026, 79–86.

[4] I. A. Shergin, A. P. Ryjov, “Exercise performance monitoring system by Hybrid Intelligence tools: Feature space”, *Moscow University Journal. Series 15. Computational Mathematics and Cybernetics*, 2026, 71–83.

Статья поступила 10 октября 2026 г.

Analysis and control of human movement biomechanics based on fuzzy logic

I. A. Shergin, A. P. Ryzhov

We propose a method for analyzing and controlling exercise technique from a single camera video stream: a pose estimation model converts frames into body keypoint coordinates, a feature space maps them into biomechanically interpretable characteristics, and fuzzy inference over an expert trainer’s rule base generates voice corrections in real time.

Keywords: human pose estimation, fuzzy logic, cyber-physical systems, movement biomechanics.

References

[1] World Health Organization, “Nearly 1.8 billion adults at risk of disease from not doing enough physical activity”, electronic resource, https://www.who.int/news/item/26-06-2024-nearly-1.8-billion-adults-at-risk-of-disease-from-not-doing-enough-physical-activity, 2024.

[2] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets”, *Information and Control*, **8**, 1965, 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.

[3] I. A. Shergin, A. P. Ryjov , N. K. Novikova, N. M. Akhmedzhanov, “Exercise performance monitoring system by Hybrid Intelligence tools: Architecture”, *Moscow University Journal. Series 15. Computational Mathematics and Cybernetics*, 2026, 79–86.

[4] I. A. Shergin, A. P. Ryjov, “Exercise performance monitoring system by Hybrid Intelligence tools: Feature space”, *Moscow University Journal. Series 15. Computational Mathematics and Cybernetics*, 2026, 71–83.

Received on October 10, 2026