

СПОСОБЫ АУГМЕНТАЦИИ ДАННЫХ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НАРУШЕНИЙ РАВНОВЕСИЯ И РАБОТЫ ГОЛЕНОСТОПА



Н.С. Глушаченко

*Магистрант кафедры программного обеспечения информационных технологий
БГУИР
nglushachenko1@gmail.com*



Д.В. Деменковец

*Старший преподаватель кафедры программного обеспечения информационных технологий БГУИР, магистр
demenkovets@bsuir.by*

Н.С. Глушаченко

Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники по специальности «Программное обеспечение информационных технологий». Область научных интересов связана с анализом и разработкой моделей и алгоритмов построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений

Д.В. Деменковец

Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники по специальности «Программное обеспечение информационных технологий». Область научных интересов связана с программированием встроенных систем, методами тестирования запоминающих устройств, промышленной автоматизацией, программированием промышленных микроконтроллеров.

Аннотация. Рассмотрена задача построения системы поддержки принятия решений для диагностики нарушений равновесия и работы голеностопного сустава. Проведён сравнительный анализ классической стабилотрии и двигательно-когнитивных тестов с биологической обратной связью на балансировочном диске с акселерометром. Выполнен обзор открытых датасетов и констатируется отсутствие наборов данных с балансировочного диска, что обосновывает проецирование данных силовых платформ на координатное пространство нестабильной платформы. Описаны четыре метода аугментации временных рядов, позволяющие сформировать сбалансированную обучающую выборку при дефиците клинических данных.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, стабилотрия, биологическая обратная связь, балансировочный диск, центр давления, голеностопный сустав, аугментация данных

Введение. Особую роль в повышении эффективности восстановления пациентов с нарушениями опорно-двигательного аппарата играют двигательно-когнитивные тесты с использованием биологической обратной связи (БОС). В таких тестах пациент выполняет целенаправленные действия с помощью движений своего тела: управляет виртуальным объектом на экране, перемещая центр давления (ЦД) путём изменения углов наклона голеностопа или перемещая центр давления своего тела с целью зафиксироваться в определённой точке-мишени [1, 2].

Для количественной оценки процесса управления позой применяются два взаимодополняющих подхода: стабилотрия и двигательные тесты с использованием БОС. При проведении стабилотрии пациент удерживает равновесие в статической позе и регистрируются колебания ЦД [10]. В двигательно-когнитивных тестах с БОС пациент целенаправленно перемещает свой ЦД в указанные зоны на экране [5]. Именно второй тип тестов позволяет выявить нарушения голеностопа, которые не обнаруживаются в статических пробах. Кроме силовых платформ для оценки состояния голеностопного сустава применяются балансировочные диски, оснащённые акселерометрами. В отличие от силовых платформ, балансировочный диск создаёт управляемую нестабильность: пациент стоит на качающейся поверхности, а встроенные датчики регистрируют углы наклона платформы. Подобный подход позволяет выявлять пациентов с хронической нестабильностью голеностопа и обеспечивает их реабилитацию. При этом, ключевым диагностическим параметром выступает угол наклона. Принципиальное преимущество нестабильных платформ заключается в целенаправленной нагрузке на голеностопный сустав [12]. Несмотря на высокую информативность обоих подходов, с ростом объёмов регистрируемых данных возникает проблема их ручной интерпретации. Для снижения нагрузки на врачей-ортопедов и автоматизации процесса постановки диагноза рассматривается применение специализированных программных средств [7].

Аппаратное обеспечение исследований. Традиционно для проведения стабилотрических исследований и анализа работоспособности двигательного аппарата применяются стационарные аппаратно-программные комплексы и силовые платформы. Подобные системы с высокой точностью регистрируют динамику смещения центра давления, однако их существенными недостатками являются высокая стоимость, большие габариты и жёсткая привязка к специализированным учреждениям здравоохранения [9, 10].

В противовес традиционным стационарным подходам может применяться портативный координационно-диагностический комплекс, который может быть установлен непосредственно на балансировочный диск. В таком случае для регистрации движений пациента используется встроенный акселерометр, вычисляющий углы наклона [7, 11]. Изменения положения центра давления испытуемого регистрируются в виде углов отклонения от положения равновесия платформы. Разработка портативных постурографических устройств на основе акселерометров описана в работе Dolinay et al.

[11], где продемонстрирована возможность создания компактного и недорогого устройства, регистрирующего наклоны платформы с помощью акселерометра и передающего данные в реальном времени для анализа постурального контроля. Данный подход подтверждает применимость акселерометрических датчиков как альтернативы дорогостоящим силовым платформам. В качестве альтернативы стационарным системам проводятся исследования применимости портативных решений. Показано, что даже игровые контроллеры (в частности, Nintendo Wii Balance Board) обеспечивают измерения ЦД, сопоставимые с лабораторными силовыми платформами [4].

Принципиальное отличие координационно-диагностического комплекса на балансировочном диске от классической силовой платформы состоит в том, что регистрируемой величиной являются не координаты ЦД в миллиметрах, а углы наклона в градусах. Аналогичный подход реализован в работе Laessoe et al. [12], где инструментальный wobble board с акселерометрическими датчиками продемонстрировал надёжную дифференциацию здоровых субъектов и пациентов с хронической нестабильностью голеностопа по вариации медиолатерального угла наклона. При этом стабилметрические метрики (СКО, средняя скорость, площадь эллипса), первоначально определённые для координат ЦД в миллиметрах, математически тождественны при применении к угловым координатам (в градусах). Для обеспечения высокого качества данных, поступающих в систему поддержки принятия решений, были оптимизированы временные характеристики записи. Если на ранних этапах развития стабилметрических исследований частота дискретизации фиксировалась на уровне 5 Гц из-за технологических ограничений, то в современных исследованиях оптимальной частотой дискретизации является 100 Гц [9].

Анализ открытых стабилметрических данных. Поскольку сбор обширных клинических баз ограничен, важным этапом является анализ существующих открытых наборов данных. Наиболее релевантным набором для задач, связанных с анализом колебаний ЦД, является A Public Data Set of Human Balance Evaluations [15]. Набор включает записи 163 субъектов в возрасте от 18 до 86 лет, протестированных в четырёх условиях: открытые/закрытые глаза на жёсткой и мягкой поверхностях. Каждое из четырёх условий повторяется три раза, что даёт около 1 956 отдельных записей.

Набор Balance-UCSD-VPL [16] содержит 11 028 клипов по 120 фреймов с частотой 60 Гц. Записи содержат временные ряды CoP в медиолатеральном и антеропостериорном направлениях для 21 здорового субъекта, а также синхронизированные 3D-координаты скелетных точек тела. Субъекты выполняли случайные движения на силовой платформе без перемещения стоп, что включает как статические, так и квазидинамические задачи.

Набор OLST [17] содержит синхронизированные данные ЦД для 32 субъектов (17 из которых старше 64 лет) при выполнении теста на одной ноге.

Анализ данных двигательных тестов и мультимодальные наборы данных. Открытые датасеты, содержащие записи тестов с активным перемещением ЦД к мишени, значительно менее распространены, чем данные статической стабилметрии. Это обусловлено тем, что подобные протоколы (LOS-тесты, игровые тренажёры с БОС) часто реализуются на проприетарном оборудовании с закрытыми форматами данных. Набор Balance-Multiview [18] содержит свыше 6 миллионов фреймов от 20 субъектов. Включает синхронизированные 2D-координаты скелета (4 камеры) и данные ЦД. Субъекты выполняют не только статические, но и динамические постуральные задачи с перемещениями, что приближает протокол к тестам на предел устойчивости. Мультимодальный набор Suprapostural Coordination Dataset [19], включает данные 48 здоровых молодых людей, выполнявших задания как на стабильной поверхности, так и на балансировочной платформе (медиолатеральная нестабильность). Однако данный набор ориентирован на оценку двигательных функций при свободном перемещении пациентов и напрямую не затрагивает оценку работы голеностопа. Следует отметить недостаток данных,

полученных при использовании нестабильной платформы. Большая часть данных получена при использовании силовой платформы, которая позволяет оценить только работу вестибулярного аппарата и не затрагивает оценку подвижности голеностопа. Поэтому были рассмотрены методы проецирования данных ЦД, полученных на силовых платформах, на координатное пространство балансировочного диска (пересчет миллиметров в углы наклона) с последующей аугментацией временных рядов для формирования обучающей выборки.

Аугментация стабилOMETрических данных для построения СППР. Были реализованы четыре базовых метода аугментации временных рядов. Каждый из методов математически моделирует реальные физиологические или аппаратные флуктуации, возникающие при сборе данных на балансировочной платформе:

1. Добавление Гауссовского шума (Jittering). К исходным координатам X и Y добавляется случайный шум с нормальным распределением. С физиологической точки зрения этот метод имитирует естественный мышечный микротремор [11].

2. Масштабирование амплитуды (Scaling). Амплитуда отклонения ЦД напрямую зависит от роста, веса и высоты центра масс пациента. Масштабирование позволяет синтезировать данные, имитирующие пациентов различной комплекции [8, 14].

3. Вращение системы координат (Rotation). Данная трансформация критически важна для нивелирования ошибок позиционирования. На практике пациенты (особенно дети) не всегда ставят стопы на балансировочный диск идеально ровно относительно осей датчика [8]. Обучение на повернутых траекториях позволяет алгоритму выделять инвариантные признаки патологии, не зависящие от постановки ног [14].

4. Временная деформация (Time Warping). В контексте двигательного-когнитивных тестов с БОС скорость реакции пациентов варьируется. Деформация имитирует различную скорость сближения пациента с мишенью и задержки когнитивной реакции, сохраняя при этом общую топологию пройденного пути [8, 14].

Заключение. В настоящей работе рассмотрены способы аугментации данных для реализации системы поддержки принятия решений для диагностики нарушений равновесия и работы голеностопного сустава. Обоснована актуальность двигательного-когнитивных тестов с БОС и их преимущество перед статической стабилOMETрией для выявления скрытых нарушений голеностопа, а также показана роль инструментальных балансировочных дисков как портативной альтернативы стационарным комплексам. Систематизированы доступные датасеты и констатировано отсутствие открытых наборов данных с записями координат ЦД непосредственно с балансировочного диска. Описаны методы расширения данных, каждый из которых имеет физиологическое или аппаратное обоснование. Использование аугментации позволяет сбалансировать обучающую выборку и повысить обобщающую способность классификаторов по миноритарным классам патологий. Полученные результаты свидетельствуют о том, что интеграция недорогих портативных балансировочных платформ способна обеспечить диагностическую точность, сопоставимую с традиционными стационарными комплексами. Архитектура предоставляет врачу-ортопеду объективный, оцифрованный инструмент для оценки динамики реабилитации.

Список литературы

- [1] Prieto T. E. et al. Measures of postural steadiness: differences between healthy young and elderly adults //IEEE Transactions on biomedical engineering. – 1996. – Т. 43. – №. 9. – С. 956-966.
- [2] Collins J. J., De Luca C. J. Open-loop and closed-loop control of posture: a random-walk analysis of center-of-pressure trajectories //Experimental brain research. – 1993. – Т. 95. – №. 2. – С. 308-318.
- [3] Tremblay M. S. et al. Systematic review of sedentary behaviour and health indicators in school-aged children and youth //International journal of behavioral nutrition and physical activity. – 2011. – Т. 8. – №. 1. – С. 98.
- [4] Kennedy M. W. et al. Enhanced feedback in balance rehabilitation using the Nintendo Wii Balance Board //2011 IEEE 13th international conference on e-health networking, applications and services. – IEEE, 2011. – С. 162-168.
- [5] Lange B. et al. Development of an interactive game-based rehabilitation tool for dynamic balance training //Topics in stroke rehabilitation. – 2010. – Т. 17. – №. 5. – С. 345-352.
- [6] Девялтовская М.Г., Платонов А.В., Козловский Д.А. Биологическая обратная связь с визуальным каналом и стабилOMETрией: учеб.-метод. пособие. – Минск: БелМАПО, 2021. – 23 с.

- [7] Глушаченко Н.С., Деменковец Д.В., Куйко Н.С. Способ сбора данных при использовании координационно-реабилитационного комплекса для исследования координации детей с нарушением опорно-двигательного аппарата // Компьютерные системы и сети: сб. ст. 60-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2024. – С. 710–715.
- [8] Fawaz H. I. et al. Data augmentation using synthetic data for time series classification with deep residual networks //arXiv preprint arXiv:1808.02455. – 2018.
- [9] Scoppa F. et al. Clinical stabilometry standardization: basic definitions–acquisition interval–sampling frequency //Gait & posture. – 2013. – Т. 37. – №. 2. – С. 290-292.
- [10] Гаже П.М., Вебер Б. Постурология / Пер. с франц.; под ред. М.М. Александяна. – СПб.: СПбМАПО, 2008. – 316 с.
- [11] Dolinay J. et al. Posturography device based on accelerometer //Int J Syst Appl Eng Develop. – 2014. – Т. 8. – С. 155-62.
- [12] Laessoe U. et al. Evaluation of functional ankle instability assessed by an instrumented wobble board //Physical therapy in sport. – 2019. – Т. 35. – С. 133-138.
- [13] Quijoux F. et al. Center of pressure characteristics from quiet standing measures to predict the risk of falling in older adults: a protocol for a systematic review and meta-analysis //Systematic reviews. – 2019. – Т. 8. – №. 1. – С. 232.
- [14] Halmich C. et al. Data augmentation of time-series data in human movement biomechanics: A scoping review //PloS one. – 2025. – Т. 20. – №. 7. – С. e0327038.
- [15] Santos D. A., Duarte M. A public data set of human balance evaluations //PeerJ. – 2016. – Т. 4. – С. e2648.
- [16] Balance-UCSD-VPL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/UCSD-VPL/Balance-UCSD-VPL> – Дата доступа: 24.03.2026.
- [17] Copeland D. et al. Multimodal Synchronized Motion Capture, Force Plate, and Radar Dataset of the One-Legged Stand Test for Fall-Risk Assessment //PhysioNet. – 2026.
- [18] Balance-Multiview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/UCSD-VPL/Balance-Multiview> – Дата доступа: 24.03.2026
- [19] Mangalam M. et al. A multimodal biomechanical and eye-tracking dataset of suprapostural coordination in healthy young adults //Scientific Data. – 2025. – Т. 12. – №. 1. – С. 1311.

Авторский вклад

Глушаченко Никита Сергеевич – аналитический обзор и отбор открытых наборов стабилметрических данных. Реализация алгоритмов искусственного расширения временных рядов для решения проблемы дисбаланса медицинских данных путем добавления шума, масштабирования, вращения координат и временной деформации. Оценка применимости методов аугментации. Сравнение использования силовых и нестабильных платформах в задачах стабилметрии и оценки работы голеностопа

Деменковец Денис Викторович – постановка исследовательской задачи по автоматизации диагностики нарушений равновесия и созданию системы поддержки принятия решений. Формирование методологии цифровой обработки стабилметрических сигналов.

METHODS FOR DATA ENHANCEMENT IN THE IMPLEMENTATION OF A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR DIAGNOSING BALANCE DISORDERS AND ANKLE FUNCTION

N. S. Glushachenko

Master's student of the Department of Software for Information Technologies, BSUIR

D.V. Demenkovets

Senior Lecturer, Department of Software for Information Technologies, BSUIR, Master of Technical Sciences

Abstract. This paper considers the problem of developing a decision support system for diagnosing balance disorders and assessing ankle joint function. A comparative analysis was conducted of conventional stabilometry and motor-cognitive tests using biofeedback on a balance disc equipped with an accelerometer. A review of publicly available datasets was conducted, and it was found that no datasets were available from the balancing disk, which justifies projecting data from stable platforms onto the coordinate space of an unstable platform. Four methods for augmenting time series are described, which allow for the creation of a balanced training sample when clinical data is scarce.

Keywords: decision support system, stabilometry, biofeedback, balance disc, center of pressure, ankle joint, data augmentation.