

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Гайниязов Игорь Мадыхатович

**Разработка алгоритмического и программного обеспечения
для обработки сигналов программно-аппаратного комплекса
измерения и сопоставления движений**

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург — 2024

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» на кафедре Интеллектуальных информационных технологий Института фундаментального образования.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Обабков Илья Николаевич.

Официальные оппоненты: Тычков Александр Юрьевич,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Пензенский государственный университет»,
заведующий кафедрой «Радиотехника и радиоэлектронные системы»;

Обухов Артём Дмитриевич,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ
ВО «Тамбовский государственный техниче-
ский университет», ведущий научный сотруд-
ник НИЛ «Лаборатория медицинских VR тре-
нажерных систем для обучения, диагностики и
реабилитации» управления фундаментальных
и прикладных исследований;

Романов Алексей Михайлович,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«МИРЭА – Российский технологический уни-
верситет», г. Москва, профессор кафедры био-
кибернетических систем и технологий.

Защита состоится 17 сентября 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета УрФУ 2.3.12.13 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=6029>

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сафиуллин Николай Тахирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Традиционно, в научных работах стремятся к полному представлению движений с возможностью 3D визуализации. Однако в данном исследовании задача ставится иначе и предполагает более простой подход: сравнение текущего движения, зарегистрированного датчиками, с известным заранее шаблоном (цифровым паттерном) движения. При этом, желательно иметь наименьший объем данных, так как все цифровые паттерны известны заранее, и задача состоит в том, чтобы оперативно предоставить обратную связь о качестве исполнения движения.

Если сравнивать начальные цифровые паттерны движений целиком, то это превращается в крайне сложную задачу из-за избыточности параметров. Для достижения результата необходимо вычислить расстояние между цифровыми паттернами движения со сложностью алгоритма $O(n^2)$.

Рассмотрим матрицы размерности $M_1 \times N$ и $M_2 \times N$, где M_1 и M_2 представляют собой количество временных точек ученика и тренера соответственно, а N - количество выходных каналов датчиков. Задача заключается в определении степени близости движений тренера и ученика. Это является более конкретной и упрощенной задачей по сравнению с созданием общих моделей движения. В рамках данной работы рассматриваются методики снижения размерности цифрового паттерна движения с сохранением информации о самом движении.

В итоге можно выделить несколько областей применения комплексов контроля движений: анализ движений, реабилитация, обучение и естественные интерфейсы.

В сфере VR-реабилитации нашли применение платформы для реабилитации после инсульта, основанной на контроле движений kinect (А. Kashheev, G. Tokunov). В данной диссертационной работе рассматривается контроль мелкой моторики, в отличие от работы «Интеллект и инновации». Исследования по выбранному направлению внесли вклад в биомеханику и реабилитацию, позволив ввести термин биомеханической избыточности в описании данных о движении. В данной работе этот термин играет важную роль, поскольку одна часть работы посвящена снижению избыточности с помощью корреляционного анализа, а другая часть - правильному сжатию данных без потерь. Среди институтов стоит выделить Сеченовский Университет (за разработку датчиков определения движения людей L. Ichkitidze, V. Zaborova, A. Tsymbal) и Московскую государственную академию физической культуры (А. Tambovskij)

Национальный исследовательский университет «МИЭТ» внес свой вклад в исследование погрешностей МЭМС с помощью анализа по вариации Аллана (А. Arhipov, А. Timoshenkov). Результаты исследования помогли оценить

датчики BMI160, применяемые в работе. Зарубежные компании Xsens (D. Roetenberg, H. Luinge, C. Baten) и Perception NEURON (S. Ryan, F. Steph) являются аналогами систем захвата движений на МЭМС, которые применяются для исследований движений в спорте. Благодаря работам, выполненным на базе этих систем, удалось собрать статистику возможных архитектур систем контроля движений и вариантов их применения.

Цель диссертационной работы заключается в — разработке и применении алгоритмического обеспечения в программно-аппаратном комплексе для обучения технике движения кисти человека с использованием методики сравнения исследуемого движения с эталонным.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи**:

- Анализ состояния предметной области.
- Анализ особенностей информационных сигналов программно-аппаратного комплекса контроля движений.
- Разработка алгоритмического обеспечения программно-аппаратного комплекса контроля движений.
- Проведение экспериментальной апробации программно-аппаратного комплекса контроля движений.

Объектом исследования являются методы визуализации, трансформации, обработки и анализа информации в компьютерных системах контроля движений.

Предметом исследования являются алгоритмы сравнения сигналов, определяющие степень схожести движений, и алгоритмы снижения размерности хранящихся исходных сигналов движений.

Научная новизна.

1. Разработана методика хранения информации о движении кисти человека на основе анализа информационных сигналов с МЭМС-датчиков, позволяющая учитывать дрейф нулевого уровня выходных каналов датчиков единожды.

Соответствует 5 пункту паспорта специальности.

2. Обоснована возможность уменьшения размерности матрицы с данными о движении кисти человека от 24 до 48 раз без потери значимой информации о самом движении, основанная на вейвлет-преобразовании и корреляционном анализе.

Соответствует 12 пункту паспорта специальности.

3. Разработана научно-обоснованная методика для сравнения цифровых паттернов движений, обеспечивающая увеличение быстродействия программно-аппаратного комплекса от 14 до 17 раз по сравнению с аналогичными решениями без сжатия матрицы с данными о движении.

Соответствует 14 пункту паспорта специальности.

Теоретическая и практическая значимость работы Теоретический вклад данной работы представлен в виде новой методологии, которая успешно решает проблему дрейфа нулевого уровня на выходных каналах сенсоров, а также способна уменьшить размерность входных данных, сохраняя при этом критически важную информацию о движении при сопоставлении паттернов движений. Учёт дрейфа нулевого уровня выполняется однократно на этапе предобработки данных. Практическая ценность исследования выражается в разработанном программно-аппаратном комплексе для мониторинга движений. Комплекс поддерживает анализ биомеханической избыточности и сопоставление движений. Этот подход применим в дистанционном обучении, телемедицине и виртуальной реальности, снижая вычислительную нагрузку.

Методология и методы исследования. Результаты, представленные в диссертационной работе, получены с применением методов системного анализа, вариации Аллана, корреляционного анализа, вейвлет-преобразования и алгоритма искажения временной шкалы.

1. Предложенная методика хранения информации о движении кисти человека, основанная на анализе сигналов с МЭМС-датчиков, позволяет единожды учитывать дрейф нулевого уровня выходных каналов датчиков в задаче сопоставления цифровых паттернов движения.
2. Предложенная методика уменьшения матрицы с данными о движении обеспечивает снижение исходного размера от 24 до 48 раз без потери значимой информации о движении.
3. Предложенная методика сравнения цифровых паттернов движений обеспечивает увеличение быстродействия разработанного программно-аппаратного комплекса от 14 до 17 раз по сравнению с аналогичными решениями без сжатия матрицы с данными о движении.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием известных математических, алгоритмических и инженерных методов, адекватных задачам исследования, а также их согласованностью с результатами, полученными другими авторами. Выводы работы перепроверялись с применением независимых методик.

Внедрение результатов диссертационного исследования. Результаты диссертационного исследования используются в Уральском Гуманитарном институте УрФУ. Акт использования программного обеспечения от 20.09.2022

Апробация работы. Результаты диссертации были представлены и обсуждены на различных научных конференциях и семинарах (в том числе международных):

- на 27 международной конференции по машинному зрению, системам виртуального окружения «GraphiCon» (Пермь, 2017 г.);
- на IV международной конференции «Физика. Технологии. Инновации ФТИ–2017» (Екатеринбург, 2017 г.);

- на семинарах сектора компьютерной визуализации и лаборатории анализа сложных систем в Институте Математики и Механики УрО РАН (Екатеринбург, 2017, 2019 – 2021 гг.);
- на научно–практической конференции «Молодые учёные и научно-технический прогресс России» (Екатеринбург, 2018 г.);
- на всероссийском конкурсе научно–технологических проектов «Сириус» (Сочи, 2019 г.);
- на 29 международной конференции по машинному зрению, системам виртуального окружения «GraphiCon» (Брянск, 2019 г.);
- международный форум по когнитивным нейронаукам на «Cognitive neuroscience – 2019» (Екатеринбург, 2019 г.);
- на международной конференции по инженерным, компьютерным и информационным наукам «Сибиркон» (Екатеринбург, 2019 г.);
- на всероссийской конференции по машинному зрению «Наука и глобальные вызовы XXI» (Пермь, 2020 г.);
- на международной конференции 2020 Global Smart Industry Conference «GloSIC» (Челябинск, 2020 г.);

Личный вклад. Автор обосновал возможность разработки комплекса контроля движений кисти человека на МЭМС для решения задач исследования, разработал как аппаратную, так и программную часть системы с беспроводным способом передачи данных, а также методики сжатия данных на основе вейвлет-преобразования и понижения размерности данных с целью более точного и быстрого решения задачи сравнения цифровых паттернов движений между собой. Получил соответствующие статистические оценки, подтверждающие работоспособность предложенных методик.

Публикации. По результатам диссертации лично автором и в соавторстве опубликованы 18 работ, в том числе 7 научных статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 5 статей в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science;

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из списка основных обозначений и соглашений, введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 128 наименования, приложений. Кроме того, работа содержит 56 иллюстраций, 20 таблиц и 3 алгоритмические вставки на псевдокоде.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, а также основные научные результаты диссертации и ее краткое содержание. Приводятся основные положения, выносимые на защиту, сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость проведенного исследования.

Первая глава посвящена анализу состояния предметной области, в том

числе: описаны проблемы контроля движений в реабилитационной, спортивной, образовательной и интерфейсных сферах; проведен анализ современного состояния аппаратно-программных систем для контроля движений человека; приведена классификация технологий контроля движений; систематизированы алгоритмы обработки информации в системах контроля движений на МЭМС; приведены используемые алгоритмы для сравнения паттернов движений между собой; рассмотрена биомеханическое представление кисти человека. На основании анализа состояния предметной области сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава. В современных системах контроля движения ключевую роль играет качество и точность сигнала, поступающего с датчиков. Понимание особенностей этого сигнала, его характеристик и потенциальных искажений является основой для эффективного анализа и последующей обработки данных. В данной главе акцентируется внимание на детальном анализе сигнала, полученного от акселерометра и гироскопа, что позволяет создать подходящую архитектуру программно-аппаратного комплекса для максимально точного отслеживания движений.

Важным этапом исследования является обоснование выбора конкретных моделей датчиков. Будет проанализирована степень влияния различных факторов на информационный сигнал, включая ошибки измерений, температурную зависимость и другие потенциальные искажения.

Заключительной частью главы станет демонстрация формирования матрицы с данными о движении. Этот этап позволит обосновать и продемонстрировать, как за методики хранения информации о движении можно учитывать дрейф нулевого уровня выходных каналов датчиков единойжды.

Системы контроля движений основаны на сборе и анализе данных с различных датчиков. Акселерометры и гироскопы играют ключевую роль в измерении параметров движения. Целью данной работы является системный анализ и обработка информации, полученной от этих датчиков, для выявления характеристик движений и их коррекции.

Акселерометр измеряет линейное ускорение по каждой из координатных осей (m/c^2). Данные с датчика можно представить в виде:

$$a(t) = [a_x(t), a_y(t), a_z(t)] \quad (1)$$

Гироскоп измеряет мгновенный вектор угловой скорости по координатным осям ($^\circ/c$). Данные с гироскопа можно представить в виде:

$$\omega(t) = [\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t)] \quad (2)$$

Срабатывание по внешнему событию использует внешние стимулы, такие

как нажатие на *кнопку начала движения*, для начала регистрации. В этом случае, момент регистрации t_s определяется внешним событием $e(t)$:

$$\begin{aligned} t_s &= t \text{ если } e(t) = \text{событие активировано} \\ t_s &\neq t \text{ иначе} \end{aligned} \tag{3}$$

Таким же образом завершается запись сигнала.

На основе предыдущих исследований с одним датчиком, в реальной практике для создания полной скелетной модели кисти требуется 16 датчиков. Был проведен анализ биомеханических моделей кисти в первой главе диссертационной работы и было показано, что кисть можно описать в простом случае из 16 суставов, таким образом нужно 16 гироскопов и 16 акселерометров (в совмещенном датчике). Это минимальное количество датчиков, которое позволяет достоверно описать все степени свободы кисти человека.

Тестовый сигнал представляет собой запись всех выходных данных со всех датчиков за определенный период времени — от момента нажатия кнопки старта до момента нажатия кнопки завершения записи. Эта запись содержит как данные с акселерометра, так и с гироскопа каждого из датчиков.

В системах анализа техники движения высокого уровня мастерства, таких как игра на пианино или другие сложные моторные задачи, важнейшую роль играет определение эталонных паттернов движений. Эти паттерны отражают наиболее типичные и оптимальные особенности движений специалиста, обладающего высокой степенью мастерства.

Основной целью обработки данных является получение четкой и надежной информации о характере движения кисти, минимизируя искажения, вызванные шумами и погрешностями датчиков. В этом контексте основной задачей системного анализа стоит определение оптимального баланса между объемом исходных данных для обработки и вычислительной эффективностью на этапе сравнения.

С одной стороны, качественное усреднение и, следовательно, более точное представление о типичном движении требует большого объема реальных данных. Это позволяет учитывать множество нюансов и вариаций движения, делая эталонный сигнал репрезентативным.

С другой стороны, алгоритмы сравнения, особенно в условиях реального времени, должны быть максимально быстрыми. Алгоритмы с вычислительной сложностью $O(n^2)$ квадратично увеличивают время обработки с увеличением объема данных, что может стать критическим для систем, где требуется быстрый отклик.

В данном контексте, системный анализ направлен на поиск оптимального компромисса между объемом данных для усреднения и вычислительной эффективностью на этапе сравнения. Такой баланс позволит получить максимально точное представление о движении при минимальных затратах на

обработку в реальном времени.

Пусть N — количество данных, $E(N)$ — ошибка усреднения на основе N данных, а $C(N)$ — вычислительная сложность алгоритма сравнения для N данных.

Целью является минимизация ошибки усреднения $E(N)$ и одновременно минимизация вычислительной сложности $C(N)$. Введем функцию потерь $L(N)$:

$$L(N) = \alpha E(N) + \beta C(N) \quad (4)$$

где:

- α и β — весовые коэффициенты, которые определяют относительную важность ошибки усреднения и вычислительной сложности, соответственно. Таким образом, цель оптимизации:

$$\min_N L(N) \quad (5)$$

Основное влияние факторов на сигнал: Дрейф нулевого уровня выходного значения датчика определяет изменение выходного сигнала датчика при отсутствии внешних воздействий. Это ключевая характеристика, которая влияет на общую надежность и точность измерений.

Пропуск данных искажает информацию во время формирования эталонного движения, что негативно скажется на сравнении эталонного и тестового сигналов в реальной работе.

Исходя из поставленной задачи, имеются два противоречивых требования: на одной стороне необходимо обеспечить максимально возможное количество реальных значений сигнала, получаемых в течение одной секунды времени. Это связано с желанием достичь высокой точности и детализации данных о движении.

Однако, на другой стороне нужно обеспечить минимально компактное представление этих данных при их сопоставлении с эталонными записями движения. Требуется найти баланс между сохранением информативности и экономичностью хранения данных для последующего анализа.

Общая схема трансформации данных до сравнения цифровых паттернов представлена на Рис.1.



Рисунок 1: Способы формирования цифровых паттернов движения: эталонные и исследуемый

Для записи эталонных движений проводится предварительный анализ, общая схема которого выглядит следующим образом.

1. Выделение целевых движений вместе с экспертом.
2. Установка полного набора датчиков.
3. Выполнение всех вариаций целевых действий.
4. Получение матриц с данными.
5. Формирование такой эталонной матрицы с данными о движении, которая будет учитывать, но не будет фокусироваться на компенсации дрейфа нулевого уровня выходных сигналов.

Самыми подходящими датчиками являются ВМ160. Они имеют лучший 16 Битный АЦП преобразователь и совмещают гироскоп и акселерометр.

Для каждого набора данных сформирован обобщенный цифровой паттерн, описывающий конкретное движение. Для каждого из 7 типов действий было записано по 8 вариаций, которые сохраняют крайние состояния выполнения движений по скоростям и амплитудам.

Из этих вариаций эталонного выполнения действия можно сформировать одну эталонную матрицу по представленному алгоритму. В каждом значении выходного уровня сигнала каждой вариации движения на гироскоп действует дрейф нулевого уровня с $\pm 3/\text{сек}$ и на акселерометр $\pm 40\text{mg}$.

Существующие сенсорные коррекции движения (по Бернштейну Н.А.) имеют больший уровень разрешенной зоны изменений.

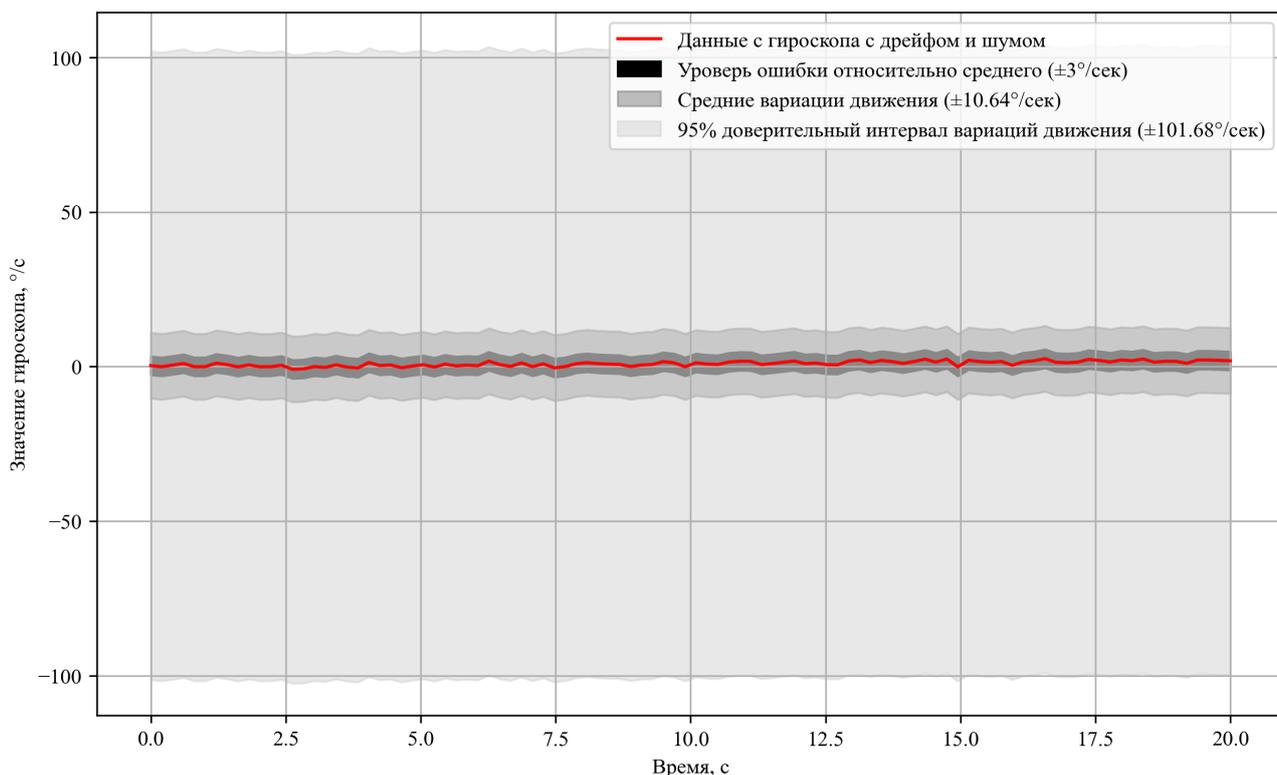


Рисунок 2: График дрейфа нулевого значения гироскопа вместе с доверительными интервалами нормальных вариаций значений датчика

Для гироскопа среднее значение вариации для точки является ± 10.64 , максимальное ± 101.68 . Для акселерометра среднее значение вариации: $\pm 140\text{mg}$, а максимальное - $\pm 386\text{mg}$.

Таким образом строя специальные доверительные интервалы (95% по генеральной совокупности) около среднего значения - можно выстраивать в более чем 3 раза более широкие коридоры значений, которые будут уже по своему дизайну учитывать типичные для датчиков ошибки. Такая разрешенная зона позволяет доводить соотношение сигнал/шум около каждой точки от 11 до 30 Дб (см. Рис. 2).

В итоге получается, что имея средний уровень значений нескольких эталонных вариаций действий - можно выстраивать широкую разрешенную зону отклонений. Такая зона перекрывает существующие постоянные ошибки и позволяет убрать из фокуса вниманий дрейф нулевого уровня выходных сигналов датчиков. Уровень ошибок при этом не будет превышать 5 процентов для каждого типа движений.

Для каждого класса движений характерен свой уникальный уровень среднего значения в каждой точке матрицы данных о движении, и эти значения не коррелируют между собой на статистически значимом уровне (коэффициент корреляции менее 0,7) при анализе различных движений. Это обусловлено разной последовательностью техники действий при выполнении этих движений.

В результате получается, что на входе мы осуществляем отбор данных с

минимальным уровнем шума и максимальным количеством релевантной информации о движении. Эти данные, хотя и содержат избыточность, представляют дополнительную ценность для эталонного цифрового паттерна движения. Они обладают широкой зоной изменчивости движения по сравнению с нулевым уровнем дрейфа, что позволяет его учитывать единожды на эта формирования цифровых паттернов движений.

Таким образом, можно говорить о разработке специального метода для сокращения размерности матрицы данных о движении путем трансформации как столбцов, так и строк. Это позволит достичь более компактного и информативного представления матрицы данных о движении за счет уменьшения излишнего описания без потери информационной ценности.

Третья глава В начале данной главы представляется информация о формировании набора данных (НД), который подвергается всем последующим обработкам.

Далее исследуется методика преобразования матрицы с данными о движении, основанная на вейвлет-преобразовании, но не являющаяся его полным аналогом. Описывается метод правильной сортировки столбцов в матрице данных о движении. Обосновывается выбор масштаба вейвлет-преобразования и типа применяемого вейвлета.

Также представляется методика исключения столбцов матрицы с данными о движении, что позволяет уменьшить уровень избыточности в описании движения. В результате получаются компактные матрицы с данными о движении, которые могут быть сравнены на автономном вычислительном устройстве.

Здесь (см. рис 3) можно увидеть как влияет порядок столбцов матрицы движения на конечный результат. В случае неотсортированных столбцов идет смещение разнотипных датчиков, что приводит к тому, что большинство графиков схожи друг с другом. Применение аппроксимирующих коэффициентов приводит к быстрому усреднению значений датчиков между собой в случае, если рядом находятся датчики разного типа.

В соответствии с правилом Найквиста, если исходный сигнал имеет самую высокую частоту f_{max} , он требует выборки частоты $f_s = 2f_{max}$. Следовательно, на каждом уровне разложения n каждая информационная выходной канал рекурсивно разделяется пополам на идеальной частоте среза. Поскольку сигналы, полученные от МЭМС отбирались на частоте 212 Гц, диапазон действительных частотных составляющих сигнала находится между 0 и 106 Гц для первого уровня вейвлет-преобразования. В таких исследованиях основной энергетический диапазон для повседневной деятельности варьировался от 0,2 до 20 Гц, что позволяет по временной шкале **дважды применять вейвлет-преобразование** при сохранении возможности восстановить исходный сигнал. Объем данных в этом случае уменьшается в 2^2 раза по столбцам или в 16 раз с учетом строк (двумерное дискретное вейвлет-преобразование). Таким

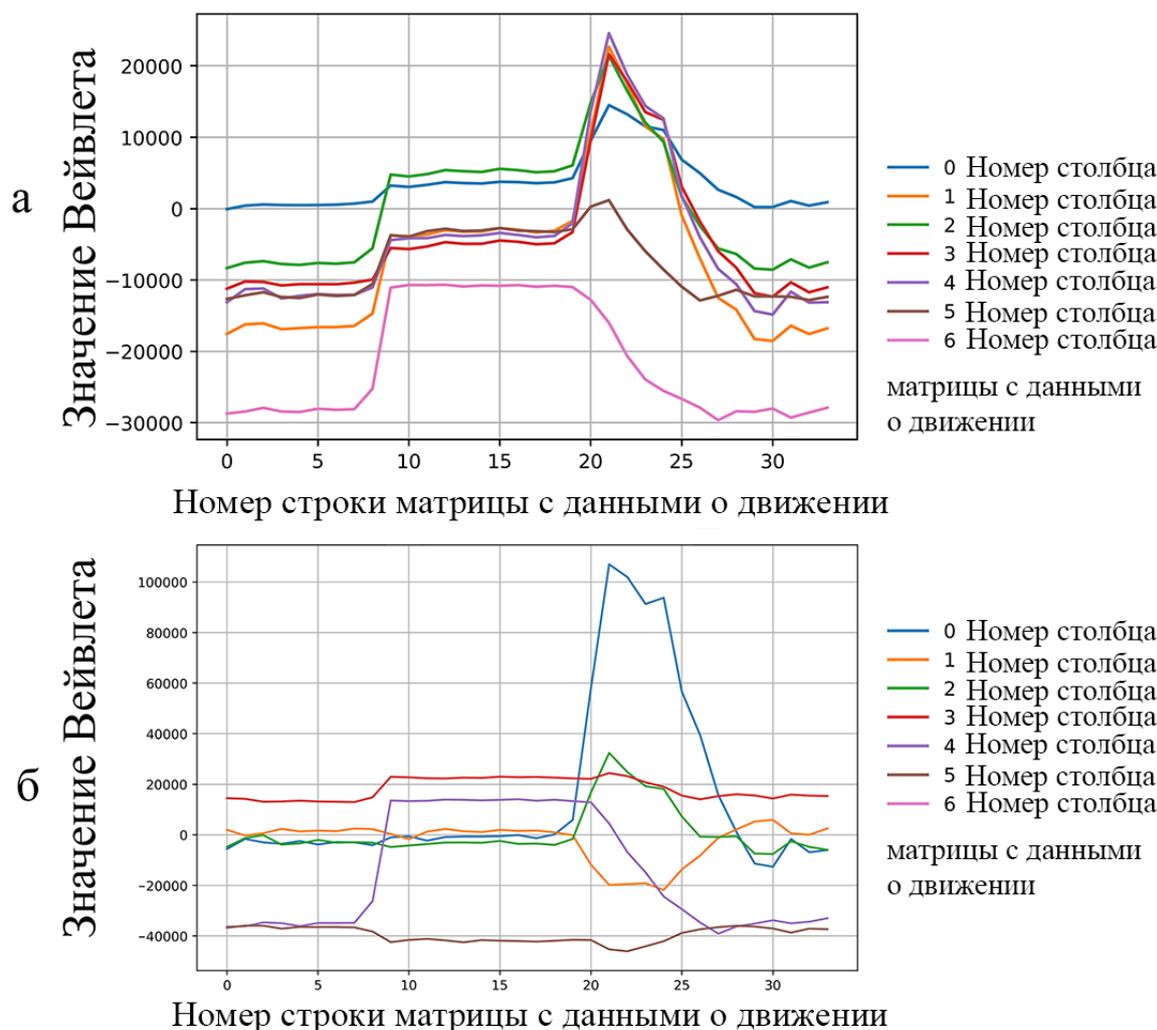


Рисунок 3: Результаты вейвлет-преобразования с (а) неотсортированными столбцами матрицы движения и (б) отсортированными.

образом из изначальных 96 столбцов получается 24 столбца.

Получившаяся компактная матрица по-прежнему имеет столбцы с корреляцией, показывающей наличие линейных связей между ними.

С учетом вейвлет-преобразования, применение корреляционного анализа показывает, что избыточны из 24 столбцов матрицы движения:

- 14 для НД, зарегистрированный при движении всей кисти во время проведения прямой линии при помощи карандаша;
- 9 для НД, зарегистрированный при движении указательного пальца при движении в горизонтальной плоскости;
- 8 для НД, зарегистрированный при сгибе безымянного пальца;
- 14 для НД, зарегистрированный при движении ладонью от себя;
- 16 для НД, зарегистрированный при движении ладонью влево;
- 14 для НД, зарегистрированный при движении ладонью на себя;
- 16 для НД, зарегистрированный при движении ладонью вправо.

Алгоритм принятия решений исключения столбцов из расчетов

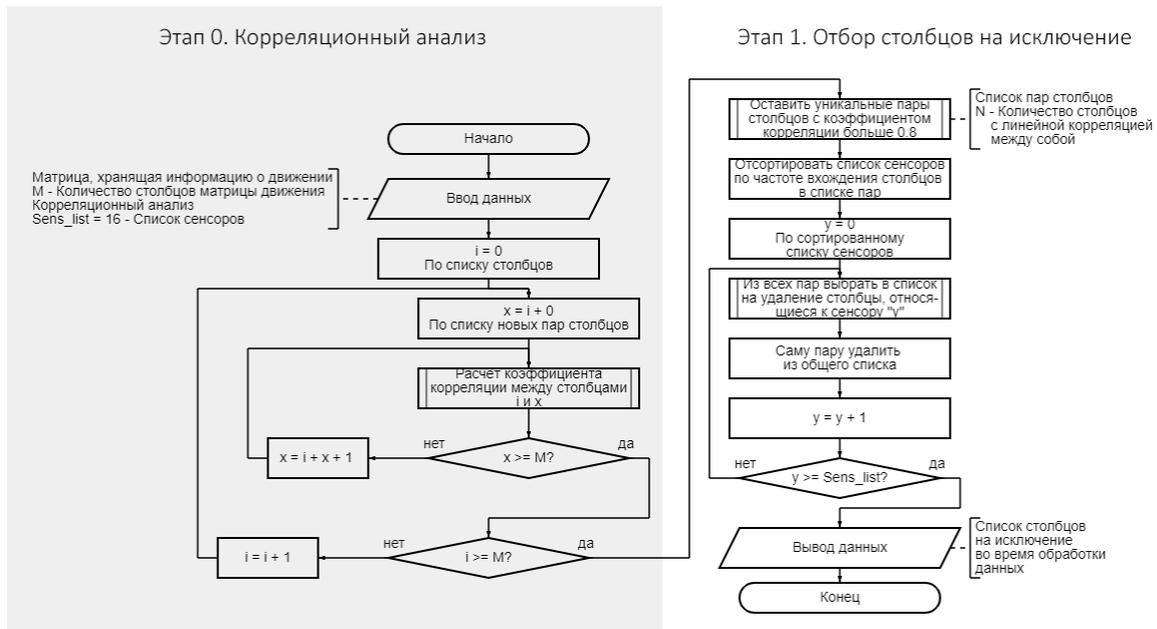


Рисунок 4: Алгоритм принятия решений исключения столбцов из расчетов

Алгоритм отбора признаков строится следующим образом:

1. На вход функции отбора идет матрица взаимных корреляций. Столбцы и строки соответствуют номеру столбцов матрицы движения.
2. В начале стоп-лист столбцов матрицы движения пустой.
3. По мере прохождения по столбцам отбираются столбцы матрицы движения с корреляцией больше или равно 0,9. Они же добавляются в стоп-лист.
4. Если номера столбца нет в стоп-листе, то переходим к следующему столбцу и далее возвращаемся к шагу 3. Таким образом действуем, пока не закончатся столбцы матрицы движения.

Столбцы, которые представляют из себя линейную комбинацию из других столбцов - можно убирать без потери информативности описания движения.

Четвёртая глава Уменьшение размерности матрицы с информацией о движении обеспечивает решение глобальной задачи компактного хранения данных, что приводит к снижению требуемых вычислительных ресурсов при сравнении цифровых паттернов на устройствах с ограниченной мощностью. Основным методом определения расстояния между двумя цифровыми паттернами является алгоритм динамического искажения временной шкалы, который обладает вычислительной сложностью $O(n^2)$.

В данном разделе иллюстрируется функционирование комплекса контроля движений кисти человека. Были проведены оценки, подтверждающие точность идентификации движений, включая оценки вероятности ошибок первого и второго рода. Были получены оценки расстояний с использованием метрики, основанной на алгоритме динамического искажения временной шкалы, для каждого класса движений. Эти оценки отражают степень отличия раз-

личных классов движений друг от друга.

Реализация алгоритма в программном обеспечении была продемонстрирована, и было показано, как увеличилась эффективность комплекса контроля движений в ходе экспериментального использования. Было рассчитано соотношение затраченного машинного времени для тестовых и исследуемых наборов данных.

При сравнении цифровых паттернов использовался алгоритм динамического искажения временной шкалы, который может сопоставлять их между собой.

Данная функция была применена для четырех наборов данных. Для двух контрольных и двух тестовых. Между собой они отличаются только нормированием значений. Всего было произведено 224 сравнения паттернов для одного запуска. В целях получения более объемной статистики количество запусков было равным 50.

Для оценки эффектов от оптимизации сложности системы будут применяться следующие метрики: время выполнения выбранного алгоритма обработки данных и объем памяти, необходимый для полного цикла обработки данных, начиная с приема исходного пакета данных о движении и заканчивая сравнением полученного паттерна движения с эталонными. Анализ выполнялся в среде PyCharm 2021.2, с использованием Python версии 3.9. Время измерялось с помощью стандартной функции Python `time.perf_counter()`, а память определялась с помощью функции `sys.getsizeof()`.

После измерения всех расстояний между цифровыми паттернами движения необходимо убедиться, что цифровой паттерн действительно способен качественно отличать схожие образцы. Для этого для каждого эталонного цифрового паттерна каждого типа движения был построен 95% доверительный интервал расстояний.

Алгоритм построения Доверительного Интервала Расстояний (ДИР) на основе метода динамической трансформации временной шкалы (DTW) может быть описан следующим образом:

- Берем первый эталонный паттерн, состоящий из усреднения 8 записей.
- Для первого эталона вычисляем расстояние от всех его исходных записей до него самого и строим 95% доверительный интервал вокруг полученной статистики.

$$\text{ДИР}_{mean1} = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 DTW(\text{Eta}_1, \text{Ishod}_j) \quad (6)$$

где ДИР_{mean1} - среднее значение доверительного интервала расстояний для первого эталонного цифрового паттерна движений,
DTW - алгоритм динамической трансформации временной шкалы,
 Eta_1 - первый эталонный цифровой паттерн движений,

Ishod - исходная запись первого цифрового паттерна движения,
i - номер исходной записи эталонного примера движений.

$$STD_1 = \sqrt{\frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 DTW(Eta_1, Ishod_j) - ДИР_{mean1}}^2 \quad (7)$$

где STD_1 - стандартное отклонение для выявленной статистики расстояний первого цифрового эталонного паттерна движений к его исходным записям,

$ДИР_{mean1}$ - среднее значение доверительного интервала расстояний для первого эталонного цифрового паттерна движений,

DTW - алгоритм динамической трансформации временной шкалы,

Eta_1 - первый эталонный цифровой паттерн движений,

Ishod - исходная запись первого цифрового паттерна движения,

i - номер исходной записи эталонного примера движений.

$$ДИР_1 = [ДИР_{mean1} - V_{0.975} \times \frac{STD_1}{\sqrt{n}} ДИР_{mean1} + V_{0.975} \times \frac{STD_1}{\sqrt{n}}] \quad (8)$$

Где:

STD_1 - стандартное отклонение для выявленной статистики расстояний первого цифрового эталонного паттерна движений к его исходным записям,

$ДИР_{mean1}$ - среднее значение доверительного интервала расстояний для первого эталонного цифрового паттерна движений,

$V_{0.975}$ - значение квантиля нормального распределения, соответствующее 95% доверительному интервалу,

n - число исходных примеров.

- Считаем такую же статистику для всех остальных исходных записей по отношению к первому эталону.
- Повторяем шаги для каждого из оставшихся эталонных паттернов, чтобы получить соответствующие средние расстояния и доверительные интервалы. Для каждого класса будут значения для попадания в класс и для его не попадания (если это другое известное движение)
- Проверяем, пересекается ли ДИР для расстояний до цифровых паттернов схожих движений с доверительными интервалами других типов движений. Этого не должно быть.
- Если происходит пересечение, это указывает на то, что значения расстояния лежат в диапазоне, где невозможно однозначно классифицировать движение.
- Используя ДИР, мы можем отнести неизвестное исследуемое движение к определенному классу на основе того, попадает ли его расстояние в доверительный интервал этого класса или нет.

- Если нет попадания ни в один из классов - значит это неизвестное движение.

Таким образом, ДИР позволяет нам принять решение о принадлежности движения к определенному классу на основе анализа расстояний и пересечений с доверительными интервалами для различных типов движений.

Для расстояний до образцов схожих движений, ДИР не должен пересекаться с доверительными интервалами других типов движений. Если такое пересечение происходит, это означает, что существует диапазон значений, в котором невозможно достоверно отнести движение к определенному классу.

Таблица 2: Исходный набор данных с применением вейвлет-преобразования и нормированием данных.

	Ср. значение расстояния того же типа движений	Ср. значение расстояния для остальных движений	ДИР для того же типа движений	ДИР для остальных движений	Есть ли пересечение с другими диапазонами
Линия	2,8	8,2	От 2,72 до 3,03	От 7,76 до 8,79	Нет
Сгиб	3,7	4,8	От 3,45 до 4,12	От 4,76 до 5,02	Нет
Отведение	3,2	4,0	От 3,06 до 3,42	От 3,96 до 4,19	Нет
От себя	2,5	3,2	От 2,41 до 2,77	От 3,12 до 3,29	Нет
Влево	2,0	2,7	От 1,95 до 2,16	От 2,62 до 2,87	Нет
На себя	2,7	3,5	От 2,49 до 3,06	От 3,45 до 3,60	Нет
Вправо	2,1	2,8	От 2,01 до 2,23	От 2,81 до 2,94	Нет

Таблица 3: Ошибки первого и второго рода в датасете.

Ошибок первого рода (ложноположительные), % от датасета	Ошибок второго рода (ложноотрицательные), % от датасета
2,33	2,61

Как видно из таблицы все условия соблюдены, в остальных наборах данных присутствует как минимум одно нарушение условий на качественное сопоставление паттернов.

Быстродействие комплекса увеличено от 14 до 17 раз.

В главе были представлены:

1. Проверено влияние методик уменьшения размерности данных на производительность системы контроля движений.

2. Проведены исследования с использованием четырех наборов данных для оценки качества модели движения человека.
3. Применен алгоритм DTW для расчета расстояний между эталонными цифровыми паттернами и записанными действиями.
4. Оценена дискриминируемость классов движений с использованием доверительных интервалов на основе четырех наборов данных.
5. Изучен эффект уменьшения признакового пространства модели движения.
6. Реализована программная составляющая комплекса.

В заключении подводятся итоги, проводится анализ примененных подходов и методик и кратко описываются основные результаты диссертации.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Проведен анализ алгоритмов преобразования и сравнения цифровых паттернов движений, взятых с МЭМС, в сфере захвата движений.
2. Разработан программно-аппаратный комплекс, основанный на использовании МЭМС, для сравнения исследуемых и тестовых движений. Проанализирована электрическая схема аппаратной части системы, что позволило разработать авторские печатные платы для сенсоров ВМ160.
3. Разработана методика сокращения объема первичной информации до 24-48 раз при сохранении точности результатов ее анализа. Представлен способ сортировки столбцов матрицы с данными о движении для увеличения компактности матрицы. Сформированы 7 эталонных цифровых паттернов действий.
4. Реализованная система с применением всех методик позволяет увеличить быстродействие системы от 14 до 17 раз по сравнению с аналогичными решениями без сжатия матрицы с данными о движении.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования заключаются в:

1. Разработать логику для микроконтроллера, включающую алгоритмы обратной связи для идентификации и отсека неиспользуемых столбцов в матрице данных о движении. Это позволит минимизировать избыточные данные путём их обработки на уровне микроконтроллера.
2. Внедрить на микроконтроллере вейвлет-преобразование и алгоритм динамического искажения времени, обеспечивая тем самым частичное выполнение вычислений на одноплатном компьютере.
3. Оптимизировать алгоритм динамического временного выравнивания для более эффективного сравнения цифровых паттернов движения. Улучшения могут включать в себя внедрение C-расширений для повышения производительности, параллельную обработку данных для ускорения вычислений и применение ассоциативных массивов для хранения и доступа к данным.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Гайниyarов И.М. Метод снижения размерности данных о движении, основанный на вейвлет-преобразовании / **Гайниyarов И.М.**, Обабков И.Н. // Инженерный вестник Дона. – 2021. – Т. 72. – №. 9 (72). – С. 246-255. (0,63 п.л. / 0,51 п.л.).
2. Гайниyarов И.М. Уменьшение признакового пространства моделей движения кисти / **Гайниyarов И.М.** // Инженерный вестник Дона. – 2021. – Т. 71. – №. 8 (71). – С. 252-259. (0,5 п.л. / 0,5 п.л.).
3. Averbukh V. L. Problems Arising in the Design of Workstations Based on Augmented Reality / Averbukh V. L., **Gajniyarov I.M.** // 2020 GloSIC. – IEEE, 2020. – С. 55-59. (0,32 п.л. / 0,21 п.л.). (Scopus, WoS).
4. Averbukh V. L. The Tasks of Designing and Developing Virtual Test Stands / Averbukh V. L., Pavel V., **Gajniyarov I.M.**, Starodubtsev I.S. // 2020 GloSIC. – IEEE, 2020. – P. 49-54. (0,44 п.л. / 0,11 п.л.). (Scopus, WoS).
5. Gajniyarov I.M. The Motion Capture as Behavior Analyzing Method of Spontaneous Motor Activity in Human Infants / **Gajniyarov I.M.**, Obabkov I.N., Starodubtsev I.S., Lvova O., Suleimanova E., Antipina I. // 2019 SIBIRCON. – IEEE, 2019. – PP. 681-684. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.). (Scopus).
6. Gajniyarov I.M. Animatronic Hand Model on the Basis of ESP8266 / **Gajniyarov I.M.**, Starodubtsev I.S., Samedov R., Sibogatova A., Antipina I., Zolotareva Y. // 2019 SIBIRCON, – IEEE, 2019. – PP. 500-503. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.). (Scopus).
7. Gajniyarov I.M. Motion capture in educational robotics / **Gajniyarov I.M.**, Obabkov I.N., Khlebnikov N.A. // AIP Conference Proceedings, vol. 1886, №1, – AIP Publishing, 2017. (0,5 п.л. / 0,35 п.л.). (Scopus, WoS).

Патенты и свидетельства о регистрации программы:

8. Гайниyarов И. М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017617823. Обработка данных с трехосевого гироскопа/акселерометра фильтром Калмана, настроенного под Arduino MEGA 2560 /Правообладатель УрФУ, Авторы **Гайниyarов И. М.**, Серков К.В, Морозов А.А. – заявка №2017614693; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 12.07.2017
9. Гайниyarов И. М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019611071. Прошивка ESP8285 для сбора данных с 18 ВМ160 и дальнейшей передачи POST методом /Правообладатель УрФУ, авторы **Гайниyarов И. М.**, Серков К.В, Обабков И.Н., Зозуля А.А. – заявка №2018665481; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 28.12.2018
10. Гайниyarов И. М. Свидетельство о государственной регистрации програм-

мы для ЭВМ №2020662364. Визуализатор потоковых CSV данных GY-VM160 из UDP пакетов /Правообладатель ИММ УрО РАН, авторы **Гайниядров И. М.** – заявка №2020662364; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 12.10.2020

11. Гайниядров И. М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021664101. Анализ шумов в МЭМС сенсорах с помощью вариации Аллана /Правообладатель ИММ УрО РАН, авторы **Гайниядров И. М.** – заявка №2021663218; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 31.08.2021
12. Гайниядров И. М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022667983. Визуализатор двигательных паттернов после вейвлет-преобразования /Правообладатель ИММ УрО РАН, авторы **Гайниядров И. М.** – заявка №2022667084; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 20.09.2022.

Другие публикации:

13. Гайниядров И.М. Морозов А.А. Сравнение алгоритмов фильтрации сырых данных для маркерной киберфизической системы захвата движений / **Гайниядров И.М.**, Морозов А.А. // Молодой ученый. – 2017. – №16, – С.192–195. (0,19 п.л. / 0,15 п.л.).
14. Гайниядров И.М. Методика захвата движений как средство естественного интерфейса / **Гайниядров И.М.**, Обабков И.Н., Хлебников Н.А. // GraphiCon международная конференция по машинному зрению. – 2017. – С. 193–196. (0,25 п.л. / 0,21 п.л.).
15. Гайниядров И.М. Технология захвата движений и образовательные роботы / **Гайниядров И.М.**, Морозов А.А. //IV Международная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации». – 2017. – С. 127–128. (0,13 п.л. / 0,11 п.л.).
16. Гайниядров И.М. Аниматронная модель руки на базе ESP8266 / **Гайниядров И.М.**, Стародубцев И.С. и др. // GraphiCon. – 2019. – С. 274–278. (0,32 п.л. / 0,23 п.л.).
17. Гайниядров И.М. Исследование мелкой моторики в VR / **Гайниядров И.М.**, Валиева Э.Р. и др. // Международный форум COGNITIVE NEUROSCIENCE. – 2019. – С. 221–222. (0,13 п.л. / 0,11 п.л.).
18. Гайниядров И.М. Построение модели движения кисти руки на базе микроэлектромеханических сенсоров и алгоритма динамической трансформации временной шкалы / **Гайниядров И. М.**, Стародубцев И. С. //Интеллектуальные системы в науке и технике. Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века. – 2020. – С. 165-170. (0,38 п.л. / 0,28 п.л.).